



ANDREZA PATRÍCIA BATISTA

**ANÁLISE DE ATENUAÇÃO DE SINAIS POR FENÔMENOS
ATMOSFÉRICOS EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE
REDES 5G/6G**

LAVRAS – MG

2023

ANDREZA PATRÍCIA BATISTA

**ANÁLISE DE ATENUAÇÃO DE SINAIS POR FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS EM
SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE REDES 5G/6G**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistema e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodriguez

Orientador

LAVRAS – MG

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Batista, Andreza Patrícia.

Análise de atenuação de sinais por fenômenos atmosféricos em
sistemas de comunicações de redes 5G/6G / Andreza Patrícia

Batista. - 2023.

88 p. : il.

Orientador(a): Demóstenes Zegarra Rodriguez.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. 5G. 2. 6G. 3. Atenuação sinal RF. I. Rodriguez, Demóstenes
Zegarra. II. Título.


ANDREZA PATRÍCIA BATISTA

**ANÁLISE DE ATENUAÇÃO DE SINAIS POR FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS EM
SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE REDES 5G/6G**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistema e Automação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 17 de Fevereiro de 2023.

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodriguez UFLA
Prof. DSc. Luiz Henrique Andrade Correia UFLA
Prof. DSc. Dante Coaquira Begazo USP

Documento assinado digitalmente
 DEMOSTENES ZEGARRA RODRIGUEZ
Data: 13/03/2023 20:33:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. DSc. Demóstenes Zegarra Rodriguez
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

*A Deus, que sempre me guia.
À minha querida mãe, Antônia, e, ao meu pai, Deir.
Aos meus dois amados, esposo, Daniel, e, filho, Augusto.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, pelas providências, inclusive está do mestrado. Quando achei que não daria, usou de um anjo que me falou "tenta e vejamos até onde conseguimos"(meu esposo).

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais, que me deram o dom da vida e, mesmo na simplicidade, me proporcionaram a mim ensinamentos que escola nenhuma me ensinou. Minha admirável mãe, Antônia de Fátima, que sempre me encheu de palavras sábias, minha companheira de viagem quando precisei. Nos meus medos sempre está comigo. Mãe que foi mãe duas vezes durante a minha gestação, que cuidou do meu filho quando eu precisei, sem palavras para dizer o quanto amo. Ao meu querido pai Waldeirio, que não media esforços para ficar com Augusto, meu filho, quando eu precisei. Buscava-nos em Formiga, dormia em Formiga. Meus irmãos Andréa e Adenilson; e minhas sobrinhas Thayná e Manuela, os quais amo muito.

Ao meu amado esposo, Daniel Aparecido, que há nove anos caminha comigo, que sonha meus sonhos. Ele não mediu esforços para que eu conquistasse este diploma, incentivando-me, ficava com o nosso filho horas para eu dedicar ao mestrado. Paizão, homem de fé, sonhador, a quem eu amo demais.

Meu pequenininho, Augusto Antônio, que Deus me deu como graça na vida. Ser mãe dele é a melhor parte de mim. A minha vida mudou há três anos atrás quando ele nasceu. Aprendi o que é o verdadeiro amor, deixar de viver em função de mim e me doar em função de alguém. Seu sorriso é o meu; é a melhor "balada" que pude frequentar, cada noite em claro tem valido a pena; eu te amo demais.

Aos meus amigos, mesmo longe, com o auxílio das redes sociais, fizeram-se próximos.

Ao meu orientador, Demóstenes Zegarra Rodriguez, por sempre me auxiliar, pela disponibilidade, por cada reunião que fazia comigo, cada apresentação que me escutou. Admiro muito ele, por tanta dedicação e sabedoria, para todos que me perguntam, eu falo: "se meu orientador não fosse tão bom, já teria desistido. Ele ama o que faz e faz bem feito". Obrigada por tudo, professor.

Aos meus colegas de trabalho, em especial ao Setor de laboratórios do IFMG-Campus Formiga. Aos servidores e funcionários da UFLA, pela dedicação ao trabalho e pelo suporte que me concederam.

*Que diremos, pois, diante dessas coisas? Se Deus é por nós, quem será contra nós?
(Romanos 8,31)*

RESUMO

A sociedade moderna vem exigindo das redes móveis, uma taxa de transmissão de dados cada vez mais elevada, com latências baixas. Para atender tais expectativas, as tecnologias das redes de telecomunicação evoluíram até alcançarem a 5G, que está sendo implantada ao redor do mundo pelas operadoras de telefonia. Além dessa nova tecnologia, estudos já se direcionam para a padronização da 6G até o ano de 2030. Esses tipos de redes, possuem bandas de frequências com espectros de ondas milimétricas, que podem sofrer degradações do sinal causadas por fenômenos atmosféricos, tais como chuvas e gases atmosféricos. Os diâmetros do tamanho da gota de chuva variam, basicamente, com a taxa de precipitação; sendo que a atenuação do sinal de radiofrequência é crescente para a intensidade de chuvas maiores. Os gases atmosféricos também são propulsores da degradação do sinal, devido à presença do oxigênio e vapor de água. Para realização de estudos desses tipos de atenuação, alguns modelos são utilizados, como os da União Internacional de Telecomunicações—Setor de Radiocomunicações (ITU-R). Nesse contexto, é proposta uma metodologia de utilização das Recomendações da ITU-R P.530-18, ITU-R P.837-7, ITU-R P.838-3, ITU-R P.618-13, ITU-R P.839-4 e ITU-R P.1511-12 para atenuações do sinal causadas por chuvas; e ITU-R P.676-12, ITU-R P.836-6, ITU-R 1510-1 e P.835-6 para atenuação causada por gases atmosféricos. É apresentado um método para acesso aos mapas digitais da taxa de precipitação, proporcionando uso em qualquer linguagem de programação. Além disso, também é realizado um comparativo dos dados provenientes da taxa de precipitação, da cidade de Belo Horizonte-MG, usando os mapas digitais da ITU-R e de Estação Meteorológica Local, usando a distribuição de Gumbel. No caso da Rec. ITU-R P.618-13, é feita uma averiguação da influência do fator β , para porcentagens de taxas de precipitações excedidas, diferentes de 0,01%, estudado no enlace Terra-Satélite em atenuações causadas por chuvas. Então, fluxogramas contendo o passo a passo dos usos das recomendações são realizados e verificado a atenuação do sinal para várias cidades ao redor do mundo, com coordenadas geográficas bem distintas.

Palavras-chave: 5G; 6G; Atenuação do sinal RF; Fenômenos Atmosféricos; ITU-R; Distribuição de Gumbel

ABSTRACT

Modern society has been demanding from mobile networks an increasingly high data transmission rate, with low latencies. To meet such expectations, telecommunications network technologies have evolved to reach 5G, which is being implemented around the world by telephone operators. In addition to this new technology, studies are already geared towards the standardization of 6G by the year 2030. These types of networks have frequency bands with millimeter wave spectra, which can suffer signal degradation caused by atmospheric phenomena, such as rain and atmospheric gases. Raindrop size diameters vary primarily with the rate of precipitation; and the attenuation of the radiofrequency signal is increasing for the intensity of greater rainfall. Atmospheric gases are also drivers of signal degradation, due to the presence of oxygen and water vapour. To carry out studies of these types of attenuation, some models are used, such as those of the International Telecommunications Union—Radiocommunications Sector (ITU-R). In this context, a methodology is proposed for using the Recommendations of ITU-R P.530-18, ITU-R P.837-7, ITU-R P.838-3, ITU-R P.618-13, ITU-R P.839-4 and ITU-R P.1511-12 for signal attenuation caused by rain; and ITU-R P.676-12, ITU-R P.836-6, ITU-R 1510-1 and P.835-6 for attenuation caused by atmospheric gases. A method for accessing precipitation rate digital maps is presented, providing use in any programming language. In addition, a comparison of data from the precipitation rate, from the city of Belo Horizonte-MG, using the digital maps of the ITU-R and the Local Meteorological Station, using the Gumbel distribution, is also carried out. In the case of Rec. ITU-R P.618-13, an investigation is made of the influence of the factor β , for percentages of exceeded precipitation rates, different from 0.01%, studied in the Earth-Satellite link in attenuations caused by rains. Then, flowcharts containing the step-by-step use of the recommendations are performed and the signal attenuation is verified for several cities around the world, with very different geographic coordinates.

Keywords: 5G; 6G; Attenuation of the RF signal; Atmospheric phenomena; ITU-R; Gumbel distribution

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Variações da pressão atmosférica, densidade do vapor de água e da temperatura em função da altitude	18
Figura 2.1 – Evolução das redes celulares, de 1G a 6G, com uma aplicação representativa para cada geração.	24
Figura 2.2 – Representação das ondas eletromagnéticas	24
Figura 2.3 – Impacto da chuva na propagação de ondas eletromagnéticas.	25
Figura 2.4 – Taxa de chuva superada em 0,01% de um ano médio.	28
Figura 2.5 – Zonas climatológicas.	29
Figura 2.6 – Impacto da frequência de operação na atenuação com diferentes bandas de frequência, na polarização horizontal.	30
Figura 2.7 – Geometria do modelo de um enlace de comunicações por satélite destacando os principais comprimentos.	31
Figura 2.8 – Atenuações troposféricas da cidade de Munique, em função do ângulo de elevação.	35
Figura 3.1 – Árvore demonstrativa do uso das recomendações	41
Figura 3.2 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por chuvas, considerando um enlace Terra-Terra.	42
Figura 3.3 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por chuvas em enlaces do tipo Terra-Satélite.	43
Figura 3.4 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por gases atmosféricos.	45
Figura 3.5 – Cálculo do novo comprimento do caminho do sinal em relação à coordenada determinada pelo método	49
Figura 3.6 – Mapa Inmet das Estações Meteorológicas Brasileiras	50
Figura 3.7 – Cálculo realizado na função <i>rainpl</i>	53
Figura 3.8 – Função <i>gaspl</i> do <i>software</i> MATLAB.	62
Figura 3.9 – Altitudes geradas da ITU por meio do <i>software</i> MATLAB para a cidade de Belo Horizonte	63
Figura 3.10 – Distância entre os valores das coordenadas reais e das coordenadas aproximadas devido à conversão para a ITU.	64

Figura 3.11 – Estudos sobre as altitudes da cidade de Belo Horizonte.	64
Figura 4.1 – Taxa de precipitação excedida de 0,01% do grupo de estudo da ITU (SG 3) comparada com o método proposto, utilizando o erro relativo e os mapas digitais.	66
Figura 4.2 – Cidade de Tóquio com a taxa de precipitação de 0,01% utilizando dados do grupo de estudo da ITU S3 e utilizando o método do erro relativo proposto com as correções de distâncias pertinentes.	67
Figura 4.3 – Atenuação do sinal causada por chuvas para as 15 cidades	68
Figura 4.4 – Máxima precipitação anual da cidade de Belo Horizonte de dados do INMETRO	70
Figura 4.5 – Atenuação do sinal causada por chuvas comparando dados de Estações locais (INMET) e ITU da cidade de Belo Horizonte.	70
Figura 4.6 – Polarização do sinal de radiofrequência causada por chuvas na cidade de Belo Horizonte, horizontalmente e verticalmente, utilizando dados da ITU.	71
Figura 4.7 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Paulo para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β	72
Figura 4.8 – Variação da atenuação do sinal da cidade de Tóquio para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β	72
Figura 4.9 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Francisco para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β	73
Figura 4.10 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Petersburgo para diferentes taxas de precipitação, para variação do ângulo de elevação em 10 GHz.	74
Figura 4.11 – Variação da atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes taxas de precipitação para variação do ângulo de elevação em 10 GHz.	74
Figura 4.12 – Atenuação do sinal causada pelo enlace Terra-Terra para a cidade de São Petersburgo para variação do ângulo de elevação em 10GHz.	76
Figura 4.13 – Variação da atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes taxas precipitação, variando o ângulo de elevação de 10° a 90°, em frequências de 10 GHz e 20 GHz.	77
Figura 4.14 – Atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes em 20 GHz para polarização horizontal e vertical.	77

Figura 4.15 – Atenuação causada por gases atmosféricos na cidade de Belo Horizonte
variando a altitude, dados dos mapas digitais da ITU. 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados da Estação Metrológica do INMETRO, da cidade de Belo Horizonte	51
Tabela 3.2 – Constantes do modelo de desagregação de chuvas diárias	56
Tabela 1 – Coeficientes para kH	86
Tabela 2 – Coeficientes para kV	86
Tabela 3 – Coeficientes para αH	86
Tabela 4 – Coeficientes para αV	86
Tabela 5 – Dados espectroscópicos para atenuação de oxigênio	87
Tabela 6 – Dados espectroscópicos para atenuação do vapor de água	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Ângulos que devem ser utilizados para os três tipos de polarização do sinal diferente.	30
Quadro 3.1 – Parâmetros de simulação utilizados em Sistemas de Transmissões de alta frequência como os das redes 5G/6G	40
Quadro 3.2 – Intensidade de chuva utilizando o método e grupo de estudos da ITU . . .	48
Quadro 3.3 – Dados da latitude e longitude da cidade de Tóquio.	49
Quadro 3.4 – Dados simulação para cidade de Tóquio para atenuação causada pelas chuvas em enlace Terra-Terra	50
Quadro 3.5 – Dados das latitudes e longitudes do estado de Minas Gerais	51
Quadro 3.6 – Dados das latitudes e longitudes das cidades brasileiras	51
Quadro 3.7 – Dados das latitudes e longitudes das cidades do mundo	51
Quadro 3.8 – Intensidade de chuvas das cidades do estado de Minas Gerais, brasileiras e mundiais estudadas dos mapas digitais da ITU-R P.837-7	52
Quadro 3.9 – Variáveis das equações da distribuição de Gumbel	56
Quadro 3.10 – Intensidade de chuvas da cidade de Belo Horizonte, por meio dos mapas digitais da ITU e da distribuição de Gumbel	56
Quadro 3.11 – Valores da latitude e longitude da cidade de Belo Horizonte/MG, utilizando os mapas digitais dos gases atmosféricos, ITU-R P.835	63
Quadro 3.12 – Grandezas da Cidade de Belo Horizonte-MG, para diferentes valores de altitudes	65
Quadro 4.1 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em São Paulo na frequência de 55GHz	75
Quadro 4.2 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em Tóquio na frequência de 55GHz	75
Quadro 4.3 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em São Francisco.	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	19
1.1.1	Objetivos específicos	19
1.2	Justificativa	20
1.3	Organização do trabalho	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Sistema de celular móvel	22
2.2	Atenuação do sinal causado por fenômenos atmosféricos	24
2.2.1	Atenuação do sinal devido às chuvas	24
2.2.1.1	Recomendação ITU-R P.530-18	25
2.2.1.1.1	Estimativas de longos prazos para precipitações de chuvas locais	27
2.2.1.1.2	Recomendação ITU-R P.837-7	28
2.2.1.1.3	Coordenadas geográficas	28
2.2.1.1.4	Recomendação ITU-R P.838-3	29
2.2.1.2	Recomendação ITU-R P.618-13	30
2.2.1.2.1	Recomendação ITU-R P.1511-2	34
2.2.1.2.2	Recomendação ITU-R P.839-4	35
2.2.2	Atenuação do sinal devido aos gases atmosféricos	36
2.2.2.1	Recomendação da ITU-R P.676-12	36
2.2.2.1.1	Recomendação ITU-R P.835	38
2.2.2.1.2	Recomendação ITU-R P.1510	38
2.2.2.1.3	Recomendação ITU-R P.836	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	Metodologia proposta para determinar a atenuação de sinal causada por chuvas em diferentes cidades ao redor do mundo	46
3.1.1	Recomendações ITU-R P.530-18, P.837-7, P.838-3 e Intensidade de chuvas de Belo Horizonte-MG	46
3.1.2	Intensidade de chuvas de Belo Horizonte-MG pela distribuição de Gumbel.	54
3.1.3	Recomendação ITU-R P.618-13, ITU-R P.839-4	57

3.2	Metodologia proposta para determinar a atenuação do sinal causado por gases atmosféricos	61
3.2.1	Recomendação ITU-R 676-12, ITU-R P.836-6, ITU-R P.1510 e ITU-R P.835-6	62
4	RESULTADOS	66
4.1	Simulações da atenuação do sinal provocada por chuvas	66
4.2	Atenuação do sinal causada por chuvas para enlace Terra-Satélite . . .	71
4.3	Atenuação do sinal devido aos gases atmosféricos	77
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as pessoas vivem uma era totalmente dependente dos novos meios de comunicação, sendo a internet a principal. A demanda por maior largura de banda tem se tornado crescente, com o aumento entre 60% e 80% ao ano. Este cenário, provém de novos serviços de comunicação, como *streaming* de vídeo, internet das coisas, reuniões virtuais, dados em nuvens, jogos on-line, gerando um alto tráfego de dados nas redes (CHEN; MACHO; HORCHE, 2018). No estudo realizado por Sheikh et al. (2018), houve um aumento no tráfego global de dados em cerca de 200 vezes na última década. Estima-se que as redes móveis como a 5G, terão mais de 20 bilhões de dispositivos conectados à internet para os próximos anos, sendo esperado um crescimento de tráfego em 20.000 vezes de 2010 até 2030.

A evolução das redes móveis teve início com as gerações, 1G e 2G, que possuíam configurações iniciais por sinais de áudio analógicos, na primeira geração, e, na segunda, os áudios digitais, evoluindo, então, para a terceira geração, 3G, que dimensionava a quantidade de usuários nas redes para comunicações de voz e mensagens de texto. Porém, seus usuários, começaram a demandar uma grande transmissão de conteúdo de vídeo e imagem de qualidade, surgindo então a quarta geração (FETTWEIS; ALAMOUTI, 2014). A rede 4G, atendeu às expectativas nas melhorias na qualidade de transmissão, porém, para a sociedade moderna, um novo preterimento surgiu, transmissão de dados em tempo real, como *streaming* de vídeos, jogos em tempo real e a vida virtualizada. Assim, as operadoras de telefonia móvel tiveram que investir em espectros de frequência de ondas milimétricas e latências mais baixas, voltando então os estudos, para as novas redes *wireless*, 5G (SILVA et al., 2020; KANSAL; SINGH; SAXENA, 2017).

Uma configuração esperada para a tecnologia 5G é o fornecimento de multisserviços, que se dividem em uma rede física com várias redes lógicas isoladas. A evolução das redes móveis tem melhorado os serviços orientados a dados, sendo mais rápidos e atendendo três dimensões principais: Banda Larga móvel melhorada (*eMBB*), Comunicações Massivas do tipo máquina (*mMTC*) e Comunicações Ultraconfiáveis e de Baixa Latência (*URLLC*) (FOUKAS et al., 2017; POPOVSKI et al., 2018; ALHASANI et al., 2019; SILVA; DINIS; GUERREIRO, 2020; SILVA; DINIS, 2017).

Na quinta geração, aumentou-se a velocidade de transmissão de dados na rede, viabilizando a conectividade das pessoas aos equipamentos de *IoT* (Internet das Coisas). Porém, nos próximos anos, espera-se não conectar apenas pessoas, mas também recursos de computação,

veículos, dispositivos, sensores e, até mesmo, agentes robóticos. Para atender um mundo digitalizado, inteligente e totalmente conectado surgem estudos em redes 6G (GIORDANI et al., 2020).

Neste contexto, é importante manter uma boa Qualidade de Experiência (*QoE*) do usuário, que relaciona à satisfação do cliente com os serviços de telecomunicação em geral. Caso o usuário, considere que o produto entregue por sua prestadora não está sendo suficientemente bom para o valor que está pagando, ele pode abandonar o provedor do serviço em questão (NUNES, 2017). Em sistemas de transmissão de dados, o comprimento do caminho percorrido pelo sinal, tem impactos diretos, pois, em caso que se aumenta a distância percorrida pelo sinal, a probabilidade de maiores distúrbios em uma comunicação tende a ocorrer. Taxa de perdas de pacotes (*PLR*) causa impactos na qualidade de voz e de vídeo recebidos no usuário final (SOUSA, 2011).

Um dos principais problemas que podem afetar a *QoE*, dos usuários das redes sem fio, são os fenômenos atmosféricos. A degradação do sinal pode acontecer por obstáculos, difrações entre outros aspectos físicos. As chuvas e gases atmosféricos, têm se tornado fenômenos físicos preocupantes, devido aos novos espectros de banda serem de proporções da ordem de ondas milimétricas. As chuvas atenuam o sinal quando, o comprimento de onda do sinal se aproxima do tamanho de uma gota de chuva típica (1,5 mm), que causa absorção de potência. Outras influências negativas das chuvas para o sinal transmitido são o fenômeno da difração e polarização (SABU et al., 2017; SHAYEA et al., 2018; SAMAD; DIBA; CHOI, 2021; KORAI; LUINI; NEBULONI, 2018). Como a distribuição do diâmetro do tamanho da gota de chuva varia, basicamente, com a taxa de precipitação, também é crescente a atenuação do sinal para as ondas milimétricas principalmente para a intensidade de chuvas maiores, por isso, a importância dos estudos desse fenômeno em redes 5G/6G (GARCIA, 2003).

No caso dos gases atmosféricos, a degradação do sinal ocorre devido à presença do oxigênio e do vapor de água. As moléculas interagem com as ondas de rádio, levando a uma absorção molecular, ocasionando a redução da amplitude do sinal. Isso, porque, o nível quântico da energia rotacional da molécula é mudado em razão da absorção, ocasionando ressonância em uma frequência específica ou em uma faixa de frequência (ARRUDA, 2008; SILVA; BEGAZO; RODRÍGUEZ, 2019). Os gases atmosféricos têm uma parcela de atenuação do sinal nas bandas de frequências mais elevadas. Conforme as estações do ano se alteram e o clima ao redor do mundo também, as grandezas de temperatura, densidade do vapor de água e pressão

atmosférica em diversas localidades diferem, caracterizando na alteração da atenuação do sinal de radiofrequência em vários pontos distintos.

Alguns modelos para estudos de atenuação de sinal por fenômenos atmosféricos podem ser aplicados, como, por exemplo, os estudados pelos autores Ghanim et al. (2018) e Koraï, Luini e Nebuloni (2018), que citam os modelos da União Internacional de Telecomunicações—Setor de Radiocomunicações (*ITU-R*) como os mais amplamente usados, principalmente para estudos da atenuação do sinal causada por chuvas. Um grupo de estudo da ITU, SG 3, disponibilizou códigos para uso dos mapas digitais das taxas de precipitações utilizando a Rec. ITU-R 837 (Características da precipitação para modelagem de propagação)¹, na linguagem de programação em MATLAB.

Sendo assim, utilizando as Rec. ITU-R P.530, usada no enlace Terra-Terra e Rec. ITU-R P.618, para enlace Terra-Satélite, é possível estipular atenuação do sinal causada pela influência do nível de precipitação pluvial em determinadas localidades. Para isso, faz-se necessário, conhecer previamente a intensidade de chuva da cidade de estudo. Para isso, as recomendações citadas indicam a obtenção da taxa de precipitação local. Caso isso não seja possível, uma forma de determinar esses dados são, por meio dos mapas digitais da Rec. ITU-R P.837-7. Para as estações locais, dados da precipitação diária anuais devem estar disponíveis. Então, é possível estipular a intensidade de chuva utilizando algum método de cálculo. De acordo com Pereira, Duarte e Sarmiento (2017), um método bastante utilizado, para esse modelo de análise de frequências de variáveis hidrológicas, é a distribuição de Gumbel.

O autor Scheiblaue (2017) estuda diferentes atenuações causadas por fenômenos atmosféricos, inclusive para enlace Terra-Satélite devido às chuvas, com porcentagem de precipitações excedidas diferentes do valor padrão de 0,01%. Porém, não realiza variações de coordenadas geográficas que acarreta uma alteração significativa no comportamento da atenuação do sinal em cidades com o módulo da latitude da estação terrestre abaixo de 36°, para taxas de precipitações diferente de da padrão de 0,01%. De acordo com a ITU-R (2007), em módulos de latitudes menores do que 36°, necessita-se um ajuste na atenuação do sinal, por meio de uma nova equação que considera alguns parâmetros, dentro eles o fator β (beta), que altera a exponencial da equação de acordo com sua variação. Este, é zero para módulos acima de 36° e variação para valores abaixo, que interferem diretamente no novo valor de atenuação calculado.

¹ <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg3/Pages/iono-tropo-spheric.aspx?View=%7B36b3168f-af49-4c95-9854-34a89b02bb35%7DSortField=TitleSortDir=Asc>

Em Li et al. (2018), Winkel e Jessner (2018), estudos aplicando a Rec. ITU-R P.676 são utilizados para a atenuação causada por gases atmosféricos e pode-se verificar que a variação de altitudes, altera a atenuação do sinal. O autor Silveira (2015), o qual cita em seu estudo, que a pressão atmosférica diminui com o aumento da altitude. A diminuição da pressão atmosférica é simultânea à diminuição do vapor de água em função da altitude, conforme apresentado na Figura 1.1a. A temperatura também se altera com a altitude, porém, não de maneira monotônica como a pressão atmosférica e a densidade do vapor de água, como mostra a Figura 1.1b, fenômenos físicos que interferem diretamente na degradação do sinal.

Estudos para atenuação causada pelas chuvas são realizados pelo autor Dimce (2019). Ele verifica a degradação causada devido à polarização do sinal da antena, porém, não estuda configurações e localizações geográficas diferentes. Entende-se que, para coordenadas geográficas distintas as atenuações de sinais causadas por esses dois tipos de fenômenos atmosféricos são diferentes. Em Garcia (2003) é mostrado que climas tropicais possuem taxas de precipitação mais elevadas do que climas temperados, por isso, a importância da determinação correta dos mapas digitais da base de estudo neste trabalho. Em Silva et al. (2020), usa-se o enlace Terra-Terra para determinar o impacto das chuvas e gases atmosféricos na qualidade de voz.

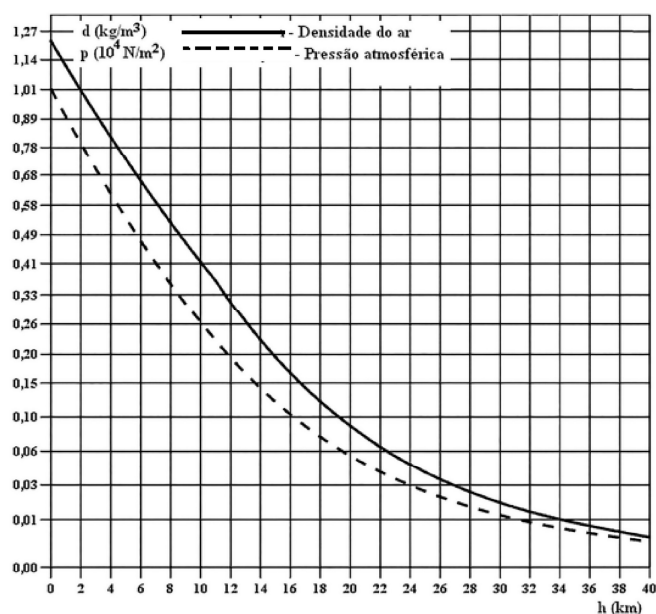
Na literatura, escassos são os estudos sobre atenuação de sinais em sistema de transmissão por efeito de fenômenos atmosféricos, principalmente que considerem localizações geográficas específicas, influência da altitude na atenuação do sinal e comparativo de dados locais com dados dos mapas digitais. Além disso, há averiguação da influência do β do enlace Terra-Satélite para atenuação do sinal causada pelas chuvas em regiões nas zonas climatológicas tropicais.

Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia para uso dos mapas digitais disponibilizados pela ITU-R, que poderá ser utilizada em qualquer linguagem de programação. O grupo de estudo (SG 3) disponibiliza códigos de alguns dos mapas digitais das recomendações, porém, na linguagem do *software* MATLAB. Este, necessita de licença paga, conforme verificado no site do MathWorks ². Também, propõem o uso do método da distribuição de Gumbel para determinar a intensidade de chuva da cidade de Belo Horizonte, realizando um comparativo com as taxas de precipitações da Rec. ITU-R P.837, levando em consideração as coordenadas geográficas. E, por fim, estuda a influência de variações de altitudes na atenuação do sinal causada por gases atmosféricos.

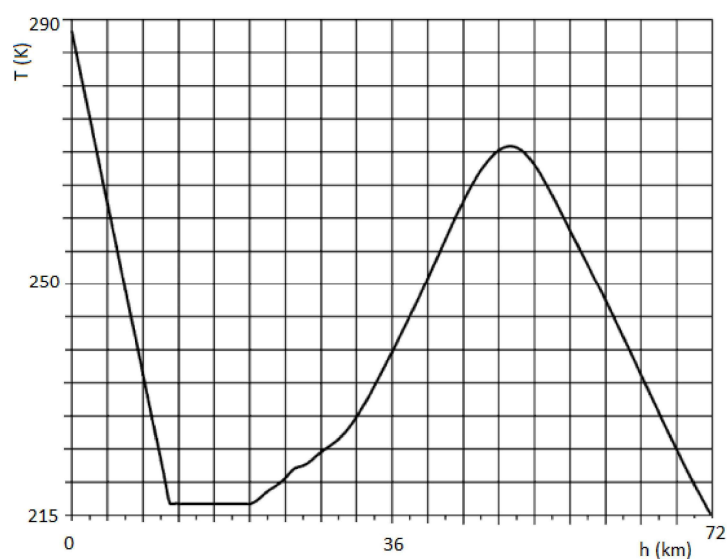
² <https://www.mathworks.com/pricing-licensing.html>

Figura 1.1 – Variações da pressão atmosférica, densidade do vapor de água e da temperatura em função da altitude

(a) Pressão ATM e Densidade de Água



(b) Temperatura



Fonte: adaptado de (SILVEIRA, 2015)

Diante disso, foi criado uma metodologia para utilização das recomendações da ITU-R para as atenuações do sinal de radiofrequência causadas por fenômenos atmosféricos, considerando o passo a passo de qual recomendação deve ser utilizada por meio de fluxogramas. E ainda, propõe um método que possibilita a utilização dos mapas digitais em qualquer linguagem de programação. Além disso, comparar dados dos mapas digitais encontrados pelo método proposto com dados de estações meteorológicas locais com o uso da distribuição de Gumbel.

1.1 Objetivo

Neste trabalho, estudou-se o impacto de fenômenos atmosféricos, causados pelas chuvas e gases atmosféricos, em sistemas de redes de radiofrequência, para os casos de redes 5G e 6G. O objetivo principal é propor uma metodologia para determinar a atenuação na transmissão de sinais devido às chuvas, utilizando as recomendações ITU-R P.530-18, ITU-R P.837-7 e ITU-R P.838-3 no enlace Terra-Terra; ITU-R 618-13, ITU-R 839-4 e ITU-R P.1511-2 no enlace Terra-Satélite. Para as atenuações causadas pelos gases atmosféricos, utilizou-se a ITU-R P.676-12, ITU-R P.836-6, ITU-R P.835-6 e ITU-R 1510-12. Para isso, fluxogramas explicativos dos passos de utilização das recomendações são propostos para aplicação em diferentes regiões, por meio das coordenadas geográficas. Assim, de posse dos parâmetros de entrada, relacionados aos fenômenos atmosféricos, coordenadas geográficas e parâmetros de sistema de transmissão de radiofrequência, será possível determinar a atenuação do sinal proveniente naquela localidade.

1.1.1 Objetivos específicos

Especificamente, os objetivos deste trabalho, são os seguintes:

- Propor uma metodologia para uso das Recomendações ITU-R P.530, ITU-R P.676 e ITU-R P.618, as quais são sumariadas por diagramas de fluxos para cada uma delas;
- Verificar a atenuação do sinal causada pelas chuvas no enlace Terra-Terra em 15 cidades diferentes ao redor do mundo;
- Implementar códigos para determinar as grades de valores dos mapas digitais para três recomendações que estudam atenuação dos sinais: sendo duas para enlaces Terra-Terra e uma Terra-Satélite;
- Utilizar uma metodologia para determinar a taxa de precipitação do município de Belo Horizonte-MG (Gumbel), coletada em estações meteorológicas locais e fazer a comparação com os dados provindos dos mapas digitais da ITU-R, do enlace Terra-Terra, atenuação causadas por chuvas;
- Mostrar o erro da aproximação do método proposto usando a grade da ITU, com os valores do código disponível em MATLAB do grupo de estudo (SG 3) da ITU;
- Verificar a mudança de atenuação do sinal devido às alterações do comprimento do caminho, quando se aproxima as coordenadas geográficas da grade de valores da ITU;

- Estudar atenuação do sinal devido à alteração da polarização e variação do ângulo de elevação, em função da atenuação provinda de chuvas;
- Estimar a atenuação excedida para o enlace Terra-Satélite causada por chuvas para outras porcentagens de tempo de um ano médio, influenciado pela latitude da estação terrestre entre regiões, dentre eles, os Trópicos de Câncer e Capricórnio, para cinco cidades diferentes;
- Implementar códigos para verificação das mudanças da atenuação para diferentes altitudes na cidade de Belo Horizonte, por meio da atenuação do sinal causada pelos gases atmosféricos;

1.2 Justificativa

Conforme mencionado por Teng et al. (2020), construções e implementações das redes móveis da quinta geração estão em andamento nas operadoras de telecomunicação em várias partes do mundo, trazendo novos desafios e aumentando a complexidade da gestão das companhias telefônicas.

Para manter a boa qualidade de experiência do usuário (QoE), dos aplicativos 5G, é importante garantir o serviço sem existir inatividade do serviço prestado. Para essa proposta ser atendida, falhas devem ser detectadas e corrigidas para um bom funcionamento do sistema. Atenuações dos sinais por fenômenos atmosféricos podem ser um bom propulsor desse exemplo de problema, já que redes móveis de tecnologia 5G trabalham com comprimentos de ondas milimétricas, em que podem sofrer degradação provenientes de efeitos causados por chuvas e gases atmosféricos.

Logo, melhorias nas métricas da ITU vêm sendo aplicadas nas recomendações, tentando abranger as mais diversas formas das atenuações dos sinais causadas pelos fenômenos atmosféricos. Alguns dos grupos de estudos da ITU como o (SG 3)³ realizam trabalhos em propagação de ondas de rádio, criando *software* para *download* no auxílio do uso dos mapas digitais. Porém, para os mapas da taxa de precipitação, pressão atmosférica, temperatura e densidade do vapor de água utilizam a linguagem de programação em MATLAB, em que o *software* desse tipo de linguagem é pago. Outro problema, que acarreta esses códigos pré estabelecido, é que podem

³ <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg3/Pages/default.aspx>

sofrer desatualizações ao longo dos anos se não forem alterados juntos das recomendações e mesmo possuir uma função que não rode em versões mais antigas do MATLAB.

Por isso, a proposta deste trabalho é o estudo dos fenômenos atmosféricos no sinal de radiofrequência para coordenadas geográficas de localizações específicas, utilizando as recomendações da ITU-R para enlace Terra-Terra em casos de atenuação causada por chuvas e gases atmosféricos e enlace Terra-Satélite para casos de atenuação causada por chuvas. Este último possibilita um estudo de alteração da atenuação para latitudes da estação terrestre entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio da Terra para diferentes porcentagens excedidas para um ano médio diferente de 0,01%.

Assim, o uso da metodologia proposta, orienta qual recomendação se faz necessária, como usá-las e, ainda, abrirá a oportunidade do uso dos mapas digitais em qualquer linguagem de programação. Portanto, seria necessário apenas baixar os arquivos em formatos .txt ou .xlsx.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é composto por este capítulo introdutório e por mais três capítulos, sendo eles: Capítulo 2, abordagem dos principais conceitos e recomendações necessárias para realização do projeto, recomendações da ITU e estimativas de longo prazo; Capítulo 3, apresentação das metodologias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho; Capítulo 4, apresentação dos resultados obtidos na fase final do desenvolvimento da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados conceitos e recomendações técnicas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho, tendo como tópicos principais, conceitos sobre as tecnologias das redes móveis de celulares até a rede 5G/6G, fundamentos sobre modelos de propagação de sinais, tipos de modulações e, por fim, atenuação do sinal causada por fenômenos atmosféricos.

2.1 Sistema de celular móvel

O surgimento do primeiro telefone móvel ao público ocorreu nos Estados Unidos, em 1946, para atender cerca de 25 cidades do país. Cada sistema possuía um único transmissor de alta potência e uma grande torre. Utilizava-se de sistemas modulação por frequência (*FM*), mecanismo que exigia busca manual por meio de um canal aberto de rádio com acesso a um operador móvel para a realização de chamadas. As chamadas eram controladas por um botão de fala, em que possibilitava apenas uma pessoa falando naquela comunicação, com 120kHz de largura de banda de RF.

Em meados de 1960 e 1970, surgiu o conceito de celular, pelos laboratórios Bell, quando percebeu a capacidade de fornecer comunicação sem fio a uma população inteira, com *hardware* de radiofrequências confiáveis em portes menores e com maior rigidez, sendo implementado, o primeiro sistema celular no mundo em 1979, pela Companhia Japonesa de Telefone e Telégrafo *Nippon Telephone and Telegraph Company (NTT)* no Japão (RAPPAPORT, 2009; SILVEIRA, 2016).

Surge então as gerações das redes móveis, sendo a primeira 1G, com transmissão de voz analógica. No ano seguinte, a comunicação começou a utilizar a tecnologia *AMPS (Advanced Mobile Phone)*, no qual o sistema funcionava por modulação *FDMA (Frequency Division Multiple Access)*, tendo frequências nas bandas de 824 a 894 MHz, sendo o serviço todo analógico e, por isso, a qualidade de voz era ruim (VIEIRA, 2021).

A segunda geração foi desenvolvida no final de 1980, baseada em sistemas *Global System for Mobile Communications (GSM)*, que permitiam o envio de sinal digital para transmissão de voz e fornecia serviços de entrega, de mensagem de texto e imagens em baixa velocidade. O sistema utilizava largura de banda de 30 a 200 kHz, com dois métodos de acesso ao canal *Time Division Multiple Access (TDMA)* e *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*. Logo em seguida, surgiu o primeiro sistema *Code Division Multiple Access (CDMA)* (AGARWAL et al., 2019).

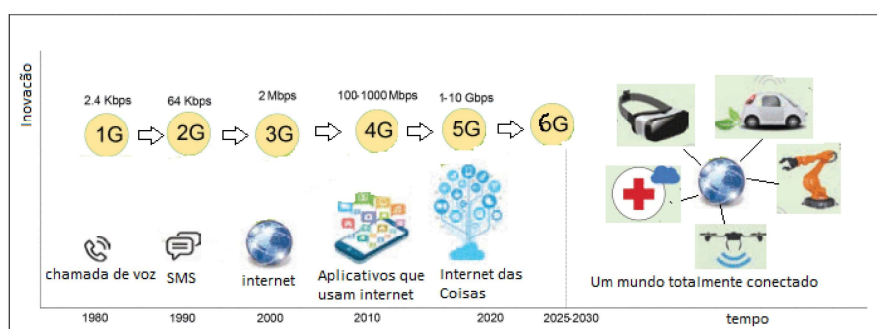
O 3G, iniciou em 2000, com largura de banda de 15 a 20 MHz, oferecendo tecnologia de dados de alta velocidade, sendo acessível televisão/vídeo, envia/recebe *e-mails* com grandes mensagens, serviços como *Roaming Global* (AGARWAL et al., 2019).

Melhorias foram exigidas à terceira geração, evoluindo para o 4G. Essa nova rede, possuía serviços adicionais como Jornais Multimídia para assistir programas de TV com mais clareza e envio de dados mais velozes que as antecessoras. Com largura de banda na ordem de ultralarga, contendo então a tecnologia *Long Term Evolution (LTE)*, com infraestrutura de rede totalmente *IP* e utilizando tecnologias sem fio avançadas (VORA, 2015; AGARWAL et al., 2019).

No final de 2010, chegou à padronização da 5G, considerada a tecnologia de comunicação sem fio completa, sem limitações. Um mundo totalmente conectado sem fio, vista como a rede dos quatro W, *wireless World Wide Web* (SHARMA, 2013). As redes *backbone* da 5G têm ondas milimétricas, com rápidas implantações e conectividades em malhas, com cooperação entre as estações de base. Outra característica são as antenas de direção de feixe altamente direcionais, contendo transmissão *Beamforming* entre os dispositivos móveis e a estação, maior duração da bateria, menor probabilidade de interrupção, taxas de bits maiores, onde são necessárias coberturas do sinal em áreas mais extensas. Outro aspecto importante está na infraestrutura, com custos mais baixos e maior capacidade de agregação de vários usuários simultâneos no espectro, licenciado e não licenciado (por exemplo, a convergência de *Wi-Fi* e celular) (VIEIRA, 2021).

Expectativas são que a evolução à nova geração, 6G, como vista na Figura 2.1, seja padronizada e implementada até o início de 2030 (VISWANATHAN; MOGENSEN, 2020). As características esperadas são: taxas de dados de 1 Tb/s, eficiência energética elevada, podendo suportar dispositivos *IoT* (Internet das Coisas) sem bateria, latência de ponta a ponta inferior a 1ms, com banda de frequências de até 3 THz e com inteligência conectada com capacidade de aprendizado de máquinas (LETAIEF et al., 2019). Além disso, considera-se que eliminará barreiras de tempo e espaço, para realização de cirurgias remotamente, atendendo às exigências do setor de saúde, em que a qualidade de serviço (QoS) seja rigorosamente atendida, disponibilizando conexões contínuas com (99,99999 % de confiabilidade), latência ultrabaixa (sub_milissegundo) e suporte de mobilidade (GIORDANI et al., 2020).

Figura 2.1 – Evolução das redes celulares, de 1G a 6G, com uma aplicação representativa para cada geração.



Fonte: adaptado de (GIORDANI et al., 2020)

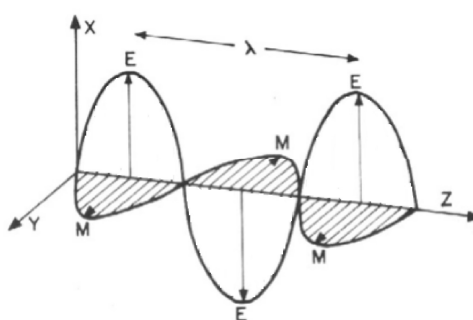
2.2 Atenuação do sinal causado por fenômenos atmosféricos

Uma das principais instituições destinadas à padronização e regularização de ondas de rádio e telecomunicação, é a União Internacional de Telecomunicações (ITU). Inicialmente fundada como *International Telegraph Union* (ou União Internacional de Telégrafos), em Paris, no dia 17 de maio de 1865, atualmente é a organização internacional mais antiga do mundo (SOUSA, 2011).

2.2.1 Atenuação do sinal devido às chuvas

As atenuações provenientes das chuvas são causadas pelas gotas de água líquidas, que acarretam espalhamentos e absorção das ondas eletromagnéticas. Esse tipo de onda, as quais estão representadas na Figura 2.2, são caracterizadas como não guiadas, pois a antena não apresenta influência sobre o trajeto da onda no espaço, apenas uma direção preferencial de irradiação (PIAU, 2013).

Figura 2.2 – Representação das ondas eletromagnéticas



Fonte: adaptado de (PIAU, 2013)

Sendo:

\vec{E} o Campo Elétrico;

\vec{M} o Campo Magnético;

X o plano de Excitação do Campo Elétrico;

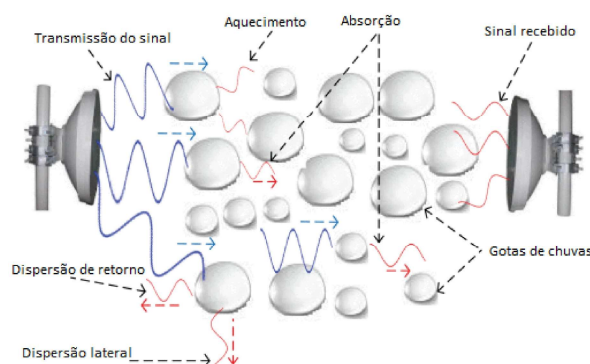
Y o plano de Excitação do Campo Magnético;

Z a Direção de Propagação da Onda Eletromagnética.

λ o comprimento de onda.

À medida que o comprimento de onda do sinal se aproxima do tamanho de uma gota de água típica (1,5 mm), proporciona maiores atenuações dos sinais de radiofrequência. Isso ocorre devido à dispersão que difunde o sinal e a absorção que envolve a ressonância das ondas eletromagnéticas com as moléculas individuais de água. As gotículas presentes no meio encontram ligações moleculares mais fracas e podem interagir facilmente com as ondas eletromagnéticas, surgindo então aquecimentos, absorção, espalhamentos do sinal, como pode ser visto na Figura 2.3 (SABU et al., 2017).

Figura 2.3 – Impacto da chuva na propagação de ondas eletromagnéticas.



Fonte: adaptada de (SHAYEA et al., 2018)

O sistema ITU-R recomenda algumas considerações para o desvanecimentos excedente a 0,01% de tempo de links terrestre LOS *Line Of Sight*, tendo como base a Recomendação ITU-R P.530-18 para enlace Terra-Terra e a Recomendação ITU-R 618-13 para enlaces Terra-Satélite (ITU-R, 2021; ITU-R, 2007).

2.2.1.1 Recomendação ITU-R P.530-18

Os sinais de radiofrequência podem ser degradados por hidrometeoro, tais como: chuvas, neves, granizo e neblina. Para frequências abaixo de 5GHz, os cálculos das atenuações

causadas pelas chuvas não eram considerados, porém para frequências maiores, existe uma influência significativa nas atenuações dos sinais. Uma estatística ao longo prazo de atenuação proveniente das chuvas pode ser estipulada, conforme ITU-R (2021), na Rec. ITU-R P.530-18 (Dados de Propagação e Métodos de Previsão necessários para o Projeto de Sistemas Terrestres de Linha de Visão), utilizando quatro passos:

1. Obter a taxa de chuva $R_{0,01}$ excedida em 0,01%, do tempo (com um tempo de integração de 1 min). Esses dados podem ser adquiridos por Estações Meteorológicas locais, fornecidos a longo prazo, ou por mapas digitais, provindos da Rec. ITU-R P.837;
2. Cálculo da Atenuação Específica, γ_R , para intervalos de frequências, variações de polarização e elevação do sinal. As equações e coeficientes para tais cálculos são encontrados na Rec. ITU-R P.838;
3. Cálculo do comprimento efetivo do caminho, d_{eff} , do link multiplicando o comprimento real do caminho d (km), por um fator de distância r . De acordo com a Equação 2.1, $R_{0,01}$ é a taxa da chuva excedida de 0,01% (mm/h), onde α é coeficiente encontrado nas Tabelas 3 e 4, provindas da Rec. ITU P.838-3, Anexo 1 deste trabalho.

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633}R_{0,01}^{0,073\alpha}f^{0,123} - 10,579(1 - \exp(-0,024d))} \quad (2.1)$$

Sendo f , frequências em GHz, α , expoente dado no modelo de Atenuação Específica do item 2. Porém, para o cálculo do comprimento efetivo, para frequências mais altas e um caminho em um link muito curto, o valor de r aumenta com a redução do caminho d . Em que r deve respeitar um limite máximo de até 2,5. Por esse motivo, a ITU recomenda valores acima de 1 km para o comprimento do caminho (ITU-R, 2021);

4. Logo, a estimativa da atenuação do caminho excedida para taxa de precipitação de chuvas excedidas de 0,01% é dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R d r (dB) \quad (2.2)$$

Em que, γ_R é determinada na seção 2.2.1.1.3.

2.2.1.1.1 Estimativas de longos prazos para precipitações de chuvas locais

As chuvas em grandes quantidades ou precipitações máximas são responsáveis por gerarem altos volumes de águas em um espaço pequeno de tempo. Para se estabelecer as frequências de suas grandezas, ou seja, sua previsão de precipitação máxima, são necessárias medidas ao longo de um período relativamente longo, baseadas em estatísticas de eventos passados e em modelos matemáticos, para simulação do tempo atmosférico e obtenção da taxa de precipitação excedida de 0,01% de uma localidade (PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017; CASTRO CAMILA NASCIMENTO PADILHA SILVA, 2011).

Para modelagem de eventos de precipitação, utiliza-se de métodos de variações de frequências aleatórias, compostos por teorias de probabilidades. Um dos contextos para tais cálculos, é a distribuição de Gumbel (SABINO, 2018), sendo um método para análise de frequência de variáveis, considerado método de distribuição de eventos extremos (OGASSAWARA; OLIVEIRA, 2017; PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017; PEREIRA, 2018). Além disso, possui a vantagem de não ter que consultar tabelas de probabilidades, devido ao ajuste ser feito apenas por meio da média e do desvio padrão, como explica o autor Pereira, Duarte e Sarmento (2017).

As equações do método da distribuição de Gumbel utilizam duas estatísticas descritivas: média, \bar{x} e desvio padrão, σ . E a obtenção de mais dois parâmetros, α e μ . Elas têm como base, a quantidade de anos que se deseja o estudo TR e, então, é possível determinar a precipitação média anual local, X_{TR} (OGASSAWARA; OLIVEIRA, 2017).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{1,2826}{\sigma} \quad (2.5)$$

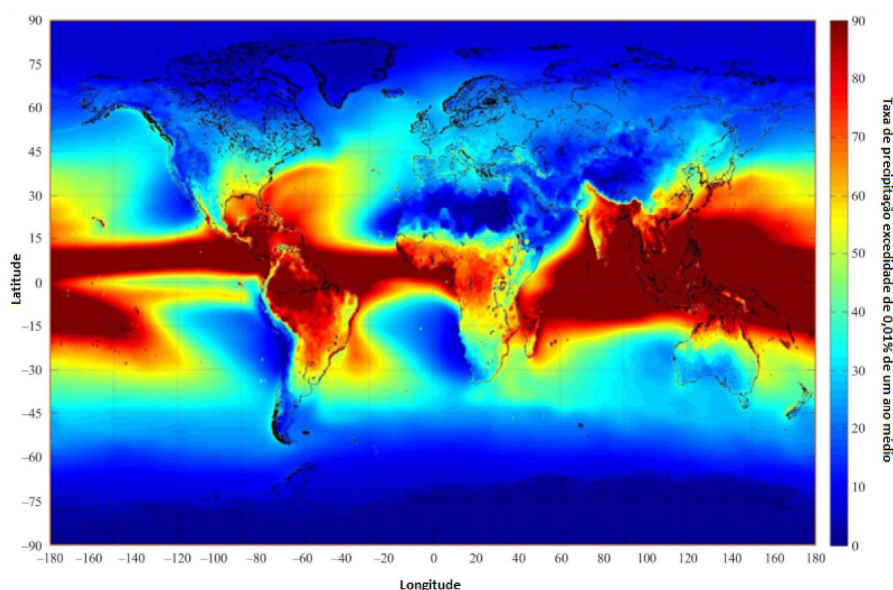
$$\mu = x - 0,45\sigma \quad (2.6)$$

$$X_{TR} = \frac{-\ln[-\ln(1 - \frac{1}{TR})]}{\sigma} + \mu \quad (2.7)$$

2.2.1.1.2 Recomendação ITU-R P.837-7

A Rec. ITU-R P.837 (Características de Precipitação para Modelagem de Propagação), possui mapas digitais, conforme pode ser visto na Figura 2.4, com taxas de precipitações anuais excedidas em 0,01%, dadas em mm/h. Tendo como entradas, latitudes e longitudes em graus, dos municípios, os mapas digitais possuem valores de grades para latitude entre -90° e $+90^\circ$ e longitude de -180° a $+180^\circ$, em ambos os casos, os passos são de $0,125^\circ$ (ITU-R, 2017c).

Figura 2.4 – Taxa de chuva superada em 0,01% de um ano médio.

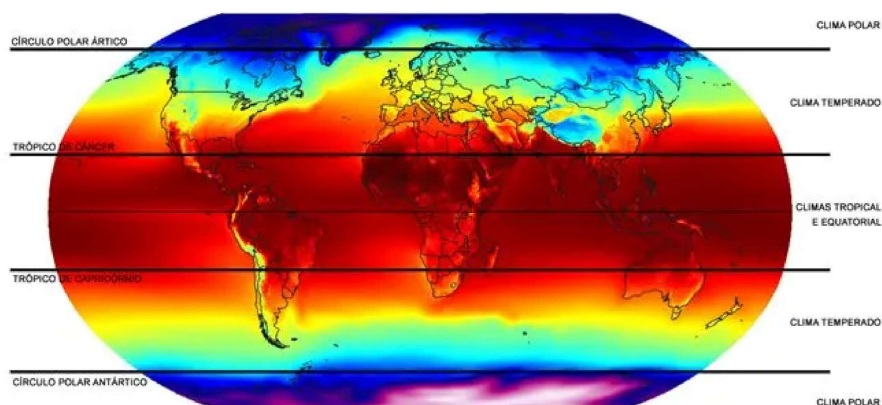


Fonte: adaptado de (ITU-R, 2017c)

2.2.1.1.3 Coordenadas geográficas

As coordenadas geográficas são consideradas as localizações de cidades na superfície terrestre. Elas são especificadas como linhas imaginárias que cortam o planeta Terra, nos sentidos horizontais (latitude) e verticais (longitude). Existem duas linhas principais, a Linha do Equador (horizontal), tudo acima se refere ao hemisfério Norte e, abaixo, ao hemisfério Sul. A segunda linha se encontra verticalmente na Terra, Linha do Meridiano de Greenwich (PENA, 2022).

Figura 2.5 – Zonas climatológicas.



Fonte: adaptado de (COSTA, 2015)

Os paralelos mais importantes estão nas linhas horizontais, sendo os Trópicos de Câncer, na latitude 23 graus e 27 minutos, e, o Trópico de Capricórnio, na latitude -23 graus e 27 minutos. Nessas linhas são referenciadas mudanças climatológicas, como pode ser visto na Figura 2.5, em que a faixa mais avermelhada representa a zona de clima tropical, ultrapassando alguns graus as extremidades das linhas dos dois trópicos.

2.2.1.1.4 Recomendação ITU-R P.838-3

A Atenuação Específica, γ_R , pode ser obtida, através da equação:

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (\text{dB/km}) \quad (2.8)$$

Os coeficientes a , b , c e m para k e α , podem ser encontrados no Anexo 1, nas Tabelas de 1 a 3. São determinados como funções de frequências, f (GHz), por meio das duas Equações 2.9 e 2.10, desenvolvidas por meio das curvas ajustadas para coeficiente de lei de potências.

$$\log_{10}k = \sum_{j=1}^4 (a_j \exp[-(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j})^2]) + m_k \log_{10}f + c_k \quad (2.9)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^4 (a_j \exp[-(\frac{\log_{10}f - b_j}{c_j})^2]) + m_\alpha \log_{10}f + c_\alpha \quad (2.10)$$

Onde f é a frequência (GHz), k qualquer valor de k_{Vertical} ou $k_{\text{Horizontal}}$ e, por fim, α é qualquer valor de α_{Vertical} ou $\alpha_{\text{Horizontal}}$, em que os coeficientes possuem constantes para

polarização vertical e horizontal, tanto para α quanto para k , onde os ângulos que devem ser utilizados nas polarizações, são mostrados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Ângulos que devem ser utilizados para os três tipos de polarização do sinal diferente.

Polarização	Horizontal	Circular	Vertical
Ângulo	0°	45°	90°

Fonte: da autora

Em todas as geometrias de caminho, os coeficientes das equações podem ser calculados a partir das equações:

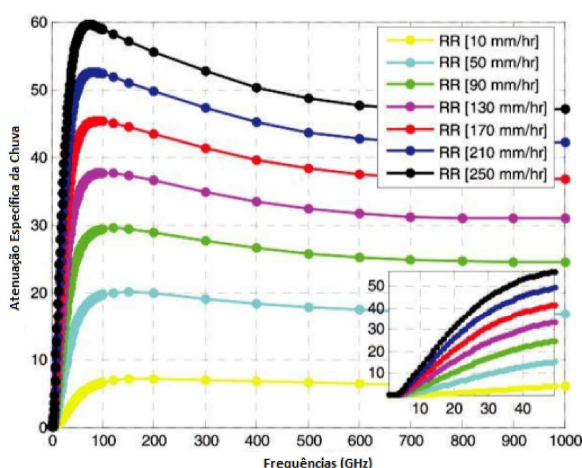
$$k = [k_H + k_V + (k_H + k_V)\cos^2\theta\cos^2\tau]/2 \quad (2.11)$$

$$\alpha = [k_H\alpha_H + k_V\alpha_V + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos^2\tau]/2k \quad (2.12)$$

Sendo, θ , o ângulo de elevação do caminho e τ o ângulo de inclinação da polarização (ITU-R, 2005).

O autor Shayea et al. (2018) realiza um estudo da Atenuação Específica de Chuva que representa chuva por unidade de distância em função do comprimento do caminho para determinar a atenuação total da chuva. A Atenuação Específica tem o perfil mostrado conforme Figura 2.6 em polarização horizontal.

Figura 2.6 – Impacto da frequência de operação na atenuação com diferentes bandas de frequência, na polarização horizontal.



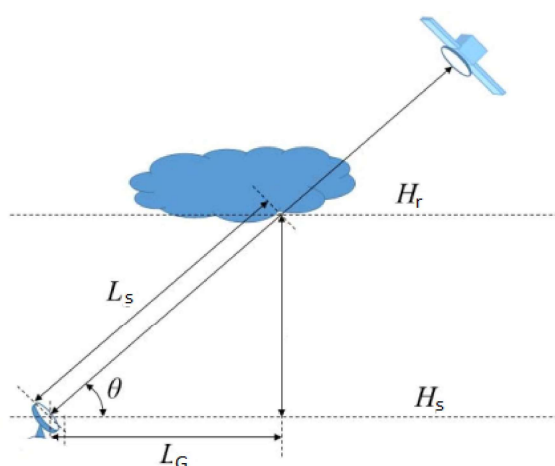
Fonte: adaptado de (SHAYEA et al., 2018)

2.2.1.2 Recomendação ITU-R P.618-13

A predição da atenuação por chuva em um enlace Terra-Satélite pode ser estimada utilizando estatísticas de longo prazo para frequências de até 55GHz, por meio, da Rec. ITU-R

P.618-13 (Dados de Propagação e Métodos de Previsão Necessários para o Projeto de Sistemas de Telecomunicações Espaço-Terra) (ITU-R, 2007). Esse tipo de enlace necessita de três tipos de modelagem descritivas: (i) estabelecer uma relação entre interação das gotas de chuvas e o comprimento da onda; (ii) estabelecer relação entre o perfil da intensidade de chuva ao longo do enlace e a taxa de precipitação na estação terrestre; e, por último, (iii) modelagem estatística pontual da intensidade da chuva na estação terrena. O primeiro relaciona a gota de chuva exposta ao campo elétrico, em que ocorre a absorção de energia, cujo fenômeno é dependente da frequência do sinal. O segundo refere-se à intensidade de chuvas que pode ter variações tanto no sentido vertical quanto no horizontal, neste caso, a Rec. ITU-R P.618, possui alguns parâmetros obrigatórios, mostrados na Figura 2.7, em que são utilizados no terceiro item que representa a modelagem matemática (DIAS et al., 2018).

Figura 2.7 – Geometria do modelo de um enlace de comunicações por satélite destacando os principais comprimentos.



Fonte: adaptado de (DIAS et al., 2018)

H_s : altura acima do nível médio do mar da estação terrestre (km);

H_r : altura da chuva;

L_s : comprimento do caminho inclinado;

L_G : projeção horizontal.

θ : ângulo de elevação (graus);

Outros parâmetros também se fazem necessários para serem utilizados nas equações desse tipo de enlace, tais como:

ϕ : latitude da estação terrestre (graus);

$R_{0,01}$: taxa de precipitação pontual para o local, dado por 0,01% de um ano médio (mm / h);

f: frequência (GHz);

R_E : raio efetivo da Terra (8500 km).

Os dados locais para a altura da estação terrestre acima do nível do mar, em caso de não estarem disponíveis, podem ser encontrados nos mapas de altitude topográfica fornecidos na Rec. ITU-R P.1511.

Para determinar a atenuação causada para esse tipo de enlace, alguns passos de cálculos devem ser seguidos:

1. Determinar a altura da chuva, H_r , que pode ser encontrada na Rec. ITU-R P.839.
2. Calcular o comprimento do caminho inclinado, L_s , especificado abaixo da altura da chuva.

Para ($\theta \geq 5^\circ$)

$$L_s = \frac{(H_r - H_s)}{\text{sen}\theta} \quad \text{Km} \quad (2.13)$$

Onde, o cálculo do comprimento do percurso, abaixo da altura da chuva, é influenciado pelo raio efetivo de curvatura da Terra, R_E , para ângulos de elevação menores que 5° ($\theta < 5^\circ$) (DIAS et al., 2018).

$$L_s = \frac{2(H_r - H_s)}{(\text{sen}^2\theta + \frac{2(H_r - H_s)}{R_E})^{1/2} + \text{sen}\theta} \quad \text{Km} \quad (2.14)$$

Para casos em que a diferença, entre a altitude da altura da chuva e a altitude da altura da estação forem menores ou iguais a zero, a atenuação de chuva prevista para qualquer porcentagem de tempo é zero e não se efetuam as etapas seguintes;

3. Cálculo da projeção horizontal, L_G , sendo o comprimento do caminho inclinado:

$$L_G = L_s \cos\theta \quad \text{km} \quad (2.15)$$

4. Encontrar a taxa de precipitação excedida em 0,01% de um ano médio, $R_{0,01}$, que pode ser obtida de estações meteorológicas locais, ou por meio, dos mapas digitais fornecidos pela Rec. ITU-R P.837. Em caso que, $R_{0,01}$ for igual a zero, a atenuação da chuva prevista para qualquer porcentagem de tempo é igual a zero e não é necessária a próxima etapa;

5. Calcular a Atenuação Específica, γ_R , utilizando os coeficientes que dependem da frequência encontrados na Rec. ITU-R P.838 e a taxa de precipitação do item anterior.

$$\gamma_R = kR_{0,01}^\alpha \quad \text{dB/km} \quad (2.16)$$

Para a obtenção do comprimento equivalente do caminho, ou seja, comprimento que produz o valor total da atenuação idêntico ao do enlace, são necessários dois fatores de ajustes: redução horizontal $r_{0,01}$ e ajuste vertical $v_{0,01}$, em ambos a Atenuação Específica é calculada com a taxa de precipitação excedida de 0,01%. Sendo então necessários os cálculos abaixo:

6. Fator de redução horizontal:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (2.17)$$

7. Fator de ajuste vertical

$$\zeta = \tan^{-1}\left(\frac{H_r - H_s}{L_G r_{0,01}}\right) \quad \text{degrees} \quad (2.18)$$

Se o valor de ζ for maior que o ângulo de elevação ($\zeta > \theta$)

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \quad \text{km} \quad (2.19)$$

Caso contrário,

$$L_R = \frac{H_r - H_s}{\sin \theta} \quad \text{km} \quad (2.20)$$

Um ajuste de latitude também acontece para valores de latitude da estação terrena, em caso o módulo da latitude for menor que 36° ($|\phi| < 36^\circ$):

$$\chi = 36 - |\phi| \quad (2.21)$$

Caso módulo seja maior

$$\chi = 0 \quad (2.22)$$

Então,

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} (31(1 - e^{-\frac{\theta}{1+\chi}}) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0,45)} \quad (2.23)$$

Deste modo, o comprimento efetivo do caminho é dado por:

$$L_E = L_{RV0,01} \quad \text{dB} \quad (2.24)$$

Então a atenuação excedida durante 0,01% do tempo é dado por:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad \text{dB} \quad (2.25)$$

8. Atenuação estimada a ser excedida em outras porcentagens de tempo, de um ano médio, entre 0,001% a 5%, são realizadas com um ajuste feito pela Equação 2.26, utilizando a atenuação excedida de 0,01% de um ano médio, conforme a equação abaixo:

$$A_p = A_{0,01} \left(\frac{p}{0,01} \right)^{-(0,655+0,033\ln(p)-0,045\ln(A_{0,01})-\beta(1-p)\text{sen}\theta)} \quad \text{dB} \quad (2.26)$$

Onde, p é o percentual da taxa e β pode ser determinado levando em consideração valores da latitude da estação terrestre, ângulo de elevação e porcentagem de precipitação de um ano médio, conforme mostrado abaixo:

$$\beta = 0 \quad , (p \geq 1\% \text{ ou } |\phi| \geq 36^\circ)$$

$$\beta = -0,005(|\phi| - 36) \quad , (p < 1\% \text{ e } |\phi| < 36^\circ \text{ e } \theta \geq 25^\circ)$$

$$\beta = -0,005(|\phi| - 36) + 1,8 - 4,5\text{sen}\theta \quad , (\text{caso contrário}) \quad (2.27)$$

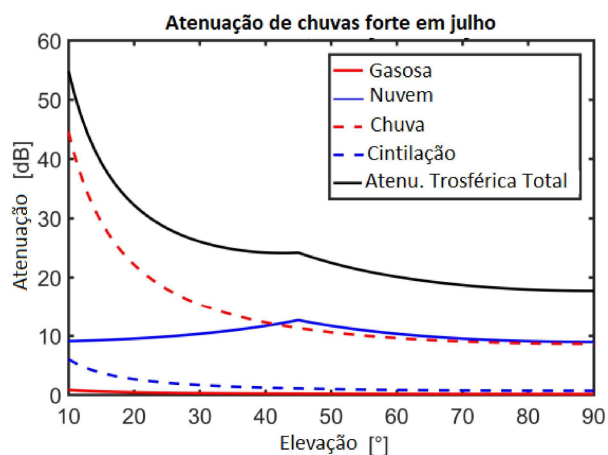
Scheiblaue (2017) verificou a influência do ângulo de elevação na atenuação do sinal, em que as atenuações máximas ocorrem nas elevações mais baixa, conforme mostrado na Figura 2.8a. Variações de atenuações ocorrem em diferentes taxa de precipitações em função do angulo de elevação, conforme pode ser visto na Figura 2.8b (SCHEIBLAUER, 2017).

2.2.1.2.1 Recomendação ITU-R P.1511-2

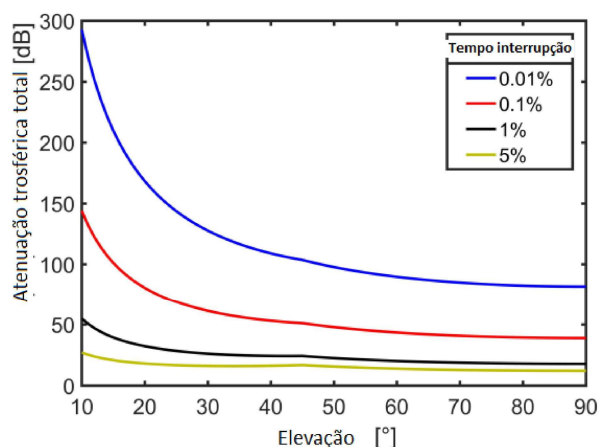
A Rec. ITU-R P.1511 (Topografia para Modelagem de Propagação Terra-espaço) é utilizada para informações de topografias do solo, para a previsões de atenuações e espalhamentos. São necessários cálculos regionais ou continentais para todas as localidades do globo.

Figura 2.8 – Atenuações troposféricas da cidade de Munique, em função do ângulo de elevação.

(a) Atenuação do sinal no mês de julho em Munique



(b) Atenuação em Munique com variação da taxa precipitação



Fonte: adaptado de (SCHEIBLAUER, 2017)

As alturas médias acima do nível do mar são encontradas em pastas de arquivos compactados, contendo mapas digitais da topografia, no site da ITU, que são usados para casos em que os dados não estão disponíveis de forma local ou mesmo exista uma boa resolução espacial.

2.2.1.2.2 Recomendação ITU-R P.839-4

A Rec. ITU-R P.839 (Modelo de Altura de Chuva para Métodos de Previsão), determina a altura média da chuva, h_0 , por meio de um mapa mundial da altura da isotérmica de 0°C , com resolução de $1,5^\circ$ para latitude e longitude, em que os mapas também são fornecidos em um arquivo zipado.

A altura média anual da chuva, acima do nível médio do mar, h_r , pode ser obtida da isoterma 0° C.

$$h_r = h_0 + 0,36 \quad \text{km} \quad (2.28)$$

Os dados são fornecidos de 0° a 360°, para longitudes e de +90° a -90° para latitudes (ITU-R, 2013). Em casos da estação terrestre esteja localizada acima da altura de chuva, não haveria precipitações em forma líquida, como nos casos de topos de montanhas elevadas (DIAS et al., 2018).

2.2.2 Atenuação do sinal devido aos gases atmosféricos

A atenuação do sinal causado pelos gases atmosféricos tem duas moléculas com papéis principais causadoras das atenuações dos sinais: o oxigênio (considerado componente seco) e o vapor de água (componente úmido). A previsão da atenuação em função da frequência utiliza as geometrias do caminho e parâmetros atmosféricos e o vapor de água, pode utilizar a Rec. da ITU-R P.676-12 (Atenuação por Gases Atmosféricos e Efeitos Relacionados) (WINKEL; JESSNER, 2018; ITU-R, 2019).

2.2.2.1 Recomendação da ITU-R P.676-12

A Recomendação usa três tipos de métodos, para previsão da atenuação gasosa específica e do caminho. O primeiro é considerado por Li et al. (2018), como uma fórmula simples aplicável às equações de transferência radiativas e realiza cálculos de linha por linha da absorção gasosa, assumindo a pressão atmosférica, temperatura e densidade do vapor de água de acordo com a altitude, no espaço terrestre (LI et al., 2018; ITU-R, 2019). Os demais não serão estudadas neste trabalho.

Se os dados locais não estiverem disponíveis, uma combinação de recomendações pode ser utilizada para determinar a atenuação do sinal causada por gases atmosféricos, por meio de mapas digitais, tais como a Rec. ITU-R P.835, sendo a atmosfera média anual de referência global; a Rec. ITU-R P.1510, mapa da temperatura média anual de superfície; e, por fim, a Rec. ITU-R P.836, mapas de densidade de vapor de água de superfície vs. probabilidade de excedência.

A Atenuação Específica em frequências de até 1000 GHz dividida ao ar seco e ao vapor de água pode ser verificada precisamente para valores variados de pressão, temperatura e umidade, sendo um somatório das linhas espectrais individuais de oxigênio e vapor de água. A

atenuação em 60 GHz possui muitas linhas de absorção amplas de oxigênio que são fundidas a pressão em nível do mar, formando uma linha única de absorção ampla, com atenuação de sinal bem elevada (ITU-R, 2019).

A Atenuação Gasosa Específica é dada por:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820(N''_{oxygen}(f) + N''_{waternapour}(f)) \quad (\text{dB/km}) \quad (2.29)$$

Sendo, γ_o e γ_w atenuações específicas, provindas do ar seco (oxigênio, nitrogênio induzido por pressão e atenuação de Debye não ressonante) e do vapor de água. Respectivamente, f é a frequência (GHz), $N''_{oxygen}(f)$ e $N''_{WaterVapour}(f)$ são partes imaginárias das refratividades complexas dependentes da frequência, dados por:

$$N''_{oxygen}(f) = \sum_{i(oxygen)} S_i F_i + N''_D(f) \quad (a)$$

$$N''_{waternapour}(f) = \sum_{i(waternapour)} S_i F_i \quad (b) \quad (2.30)$$

S_i , é a força da i -ésima linha de oxigênio ou vapor de água, F_i , o fator de forma da linha de oxigênio ou vapor de água, em que as somas se estendem por todas as linhas espectrais das Tabelas 5 e 6 do Anexo 1, onde são encontrados os coeficientes a e b .

A força da linha é dada por:

$$S_i = a_1 \times 10^{-7} p \theta^3 \exp[a_2(1 - \theta)] \quad (\text{para oxigênio})$$

$$= b_1 \times 10^{-1} p e \theta^{3,5} \exp[b_2(1 - \theta)] \quad (\text{para vapor de água}) \quad (2.31)$$

Onde:

p : pressão de ar seco (hPa);

e : pressão parcial de vapor de água (hPa) (pressão barométrica total, $p_{tot} = p + e$);

$\theta = 300 / T$;

T : temperatura (K);

$N''_D(f)$ é o contínuo seco devido à absorção de nitrogênio induzida por pressão e o espectro não ressonante de Debye, do oxigênio abaixo de 10 GHz e atenuação de nitrogênio para pressão acima de 100 GHz, conforme dado pela equação:

$$N''_D(f) = f p \theta^2 \left[\frac{6,14 \times 10^{-5}}{d[1 + (\frac{f}{d})^2]} + \frac{1,4 \times 10^{-12} p \theta^{1,5}}{1 + 1,9 \times 10^{-5} f^{1,5}} \right] \quad (2.32)$$

Onde, d , é o parâmetro de largura para o espectro Debye:

$$d = 5,6 \times 10^{-4} (p + e) \theta^{0,8} \quad (2.33)$$

A pressão parcial do vapor de água, e , em qualquer altitude pode ser obtida a partir da densidade do vapor de água, ρ , e a temperatura, T , naquela altitude utilizando a expressão:

$$e = \frac{\rho T}{216,7} \quad (2.34)$$

Os dados espectroscópicos para o oxigênio, são fornecidos na Tabela 5, e os dados espectroscópicos para o vapor de água, são fornecidos na Tabela 6 do Anexo 1 (ITU-R, 2019).

2.2.2.1.1 Recomendação ITU-R P.835

Os dados da Recomendação são utilizados para os locais de interesse quando se trata de variações sazonais e mensais. Assim, as médias mensais, condicionadas às horas do dia 00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 UTC, dos perfis verticais de temperatura, pressão e densidade de vapor de água da recomendação, foram retiradas de cálculos de conjunto de dados de 32 níveis de alturas. Sendo uma altura de referência localizada ao redor do local da superfície da Terra até cerca de 30 km acima da sua superfície. Os dados são de 15 anos do ECMWF (ERA15). A base de dados possui grades de 0° a 360° para longitudes e +90° a -90° para latitudes, com resoluções de 1,5°, em ambas. Todos os dados são armazenados em arquivos, usando o padrão de precisão simples, de ponto flutuante IEEE 754 (4 bytes, 32 bits) em um formato Big-Endian.

2.2.2.1.2 Recomendação ITU-R P.1510

A Recomendação ITU-R P.1510 contém mapas mensais e anuais de temperatura média da superfície. Os dados de temperatura média mensal da superfície, T_{ii} (K), onde $ii = 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11$ e 12 , a 2 metros acima da superfície da Terra, são parte integrante desta Recomendação e estão disponíveis como mapas digitais. Seus dados são disponibilizados em arquivo compactado, que são de carácter livre (ITU-R, 2017a).

2.2.2.1.3 Recomendação ITU-R P.836

O vapor de água atmosférico e o oxigênio causam absorção em comprimentos de ondas milimétricas. A concentração de oxigênios atmosféricos é relativamente constante, porém, o

vapor de água varia tanto geograficamente quanto com o tempo. Os valores anuais da densidade de vapor de água da superfície, correspondem à altura da escala, $vsch$, em km, excedida em 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 95 e 99% de um ano médio e são parte dos mapas digitais da Rec. ITU-R P.836 (ITU-R, 2017b).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentadas as etapas desenvolvidas para determinar a atenuação do sinal de radiofrequência para fenômenos atmosféricos, tais como, atenuação devido às chuvas e aos gases atmosféricos.

Para as simulações dos três cenários da atenuação do sinal de radiofrequência foram utilizados os parâmetros do Quadro 3.1. Uma árvore demonstrativa, como pode ser vista na Figura 3.1, foi criada para demonstrar as sequências do uso das recomendações da ITU-R, referente aos dois tipos de fenômenos atmosféricos que foram estudados, chuvas e gases atmosféricos. Dois tipos de enlaces são utilizados para atenuações causadas pelas chuvas, sendo eles: Terra-Terra e Terra-Satélite. As atenuações provenientes dos gases atmosféricos, usou-se o enlace Terra-Terra. As recomendações dos enlaces, necessitam utilização de mais algumas recomendações, também tratadas pela ITU-R, as quais são demonstradas subsequentes para cada tipo de atenuação por meio da árvore.

Quadro 3.1 – Parâmetros de simulação utilizados em Sistemas de Transmissões de alta frequência como os das redes 5G/6G

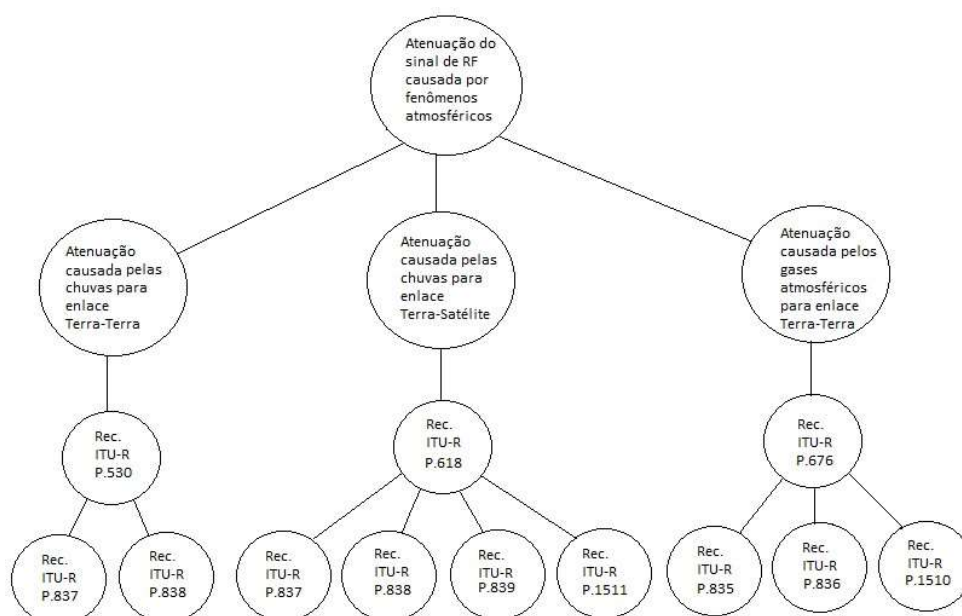
	Enlace Terra-Terra (chuvas)	Enlace Terra-Satélite (chuvas)	Enlace Terra-Terra (gases atmosféricos)
Intervalos Frequências	1 GHz a 300 GHz	1 GHz a 55 GHz	1 GHz a 300 GHz
Comprimento do caminho do sinal	1 km	0,99358 km; 1 km; 1,00642 km	1 km
Polarização	Vertical/ Horizontal	Vertical/ Horizontal	-
Ângulo de elevação	90°	10° a 90°	-
Altitudes	-	-	918 m; 2143,6 m; 4053,7 m; 6376,2 m; 9088,7 m
Variação da latitude	-	-36° a +36°	-
Quantidades de cidades nos estudos	15	5	1

Fonte: da autora

As atenuações do sinal de radiofrequência para redes 5G/6G encontram-se em intervalos de 1GHz a 3THz. Porém, para enlace Terra-Terra, as recomendações da ITU indicam estudos entre 1GHz a 1000GHz. Como os autores Silva, Begazo e Rodríguez (2019) mostraram que

em 2018, as implementações de frequências 5G nos EUA foram nos intervalos de 27,5 até 40 GHz. Os autores Shayea et al. (2018) apontam que a frequência com atenuação extra do sinal dos gases atmosféricos encontra-se em 60 GHz, providas principalmente pelas moléculas de oxigênio. Na recomendação ITU-R P.676, mostra que a atenuação do nitrogênio é induzida por pressão em frequências acima de 100 GHz. Os autores Riva et al. (2014) justificam que, para frequências nas faixas de 20 a 300 GHz, o oxigênio e vapor de água são os únicos componentes gasosos que afetam a propagação de onda eletromagnética. Logo, o presente trabalho, optou-se em simular os intervalos de 1 GHz a 300 GHz para esse tipo de enlace. Já para o caso do enlace Terra-Satélite, a Rec. ITU-R P.618 estabelece o valor limite de estudo de frequências em no máximo 55 GHz, logo as simulações foram nos intervalos de 1 GHz a 55 GHz.

Figura 3.1 – Árvore demonstrativa do uso das recomendações

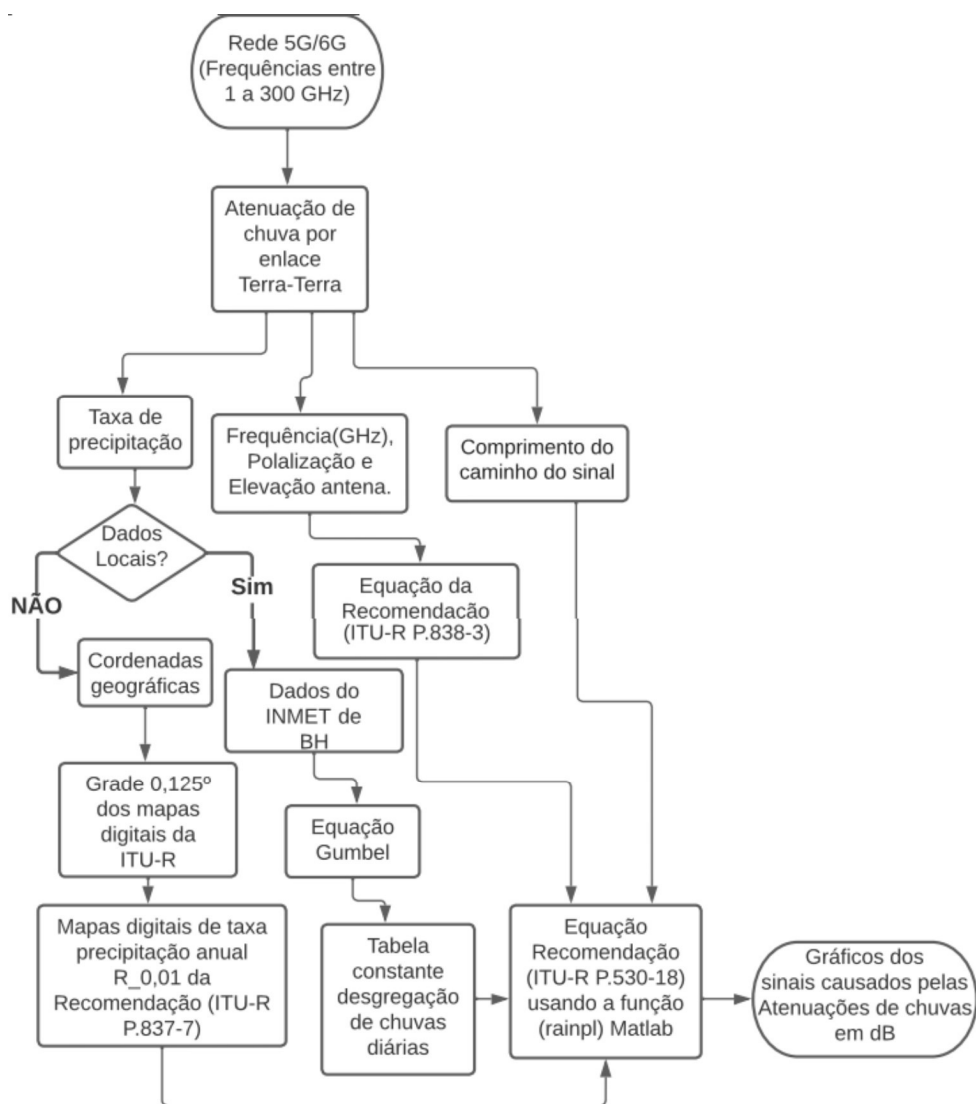


Fonte: da autora

O primeiro fluxograma apresentado na Figura 3.2 representa a atenuação causada pelas chuvas para enlace Terra-Terra. Cinco variáveis de entradas são usadas: comprimento do caminho, intervalo de frequências, polarização do sinal, ângulo de elevação e, finalmente, a taxa de precipitação de chuva. A última pode ser determinada por dois métodos: pelos mapas digitais da Rec. ITU-R 837-7 ou por dados locais de Estações Meteorológicas. O comprimento do caminho do sinal (distância do enlace) depende da distância entre as antenas emissora e receptora; o intervalo de frequência para esse tipo de enlace descrito na recomendação é de 1 GHz a 1000 GHz; a polarização do sinal pode ser vertical ou horizontal; por fim, o ângulo de elevação varia de 0° a 90°, sendo este o ângulo entre o plano horizontal e a linha de visão medido no plano

vertical. Sua referência é em zero graus, ou seja, uma linha horizontal na direção do horizonte, a partir da antena, melhor entendido na Figura 2.7 descrito como o ângulo θ .

Figura 3.2 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por chuvas, considerando um enlace Terra-Terra.



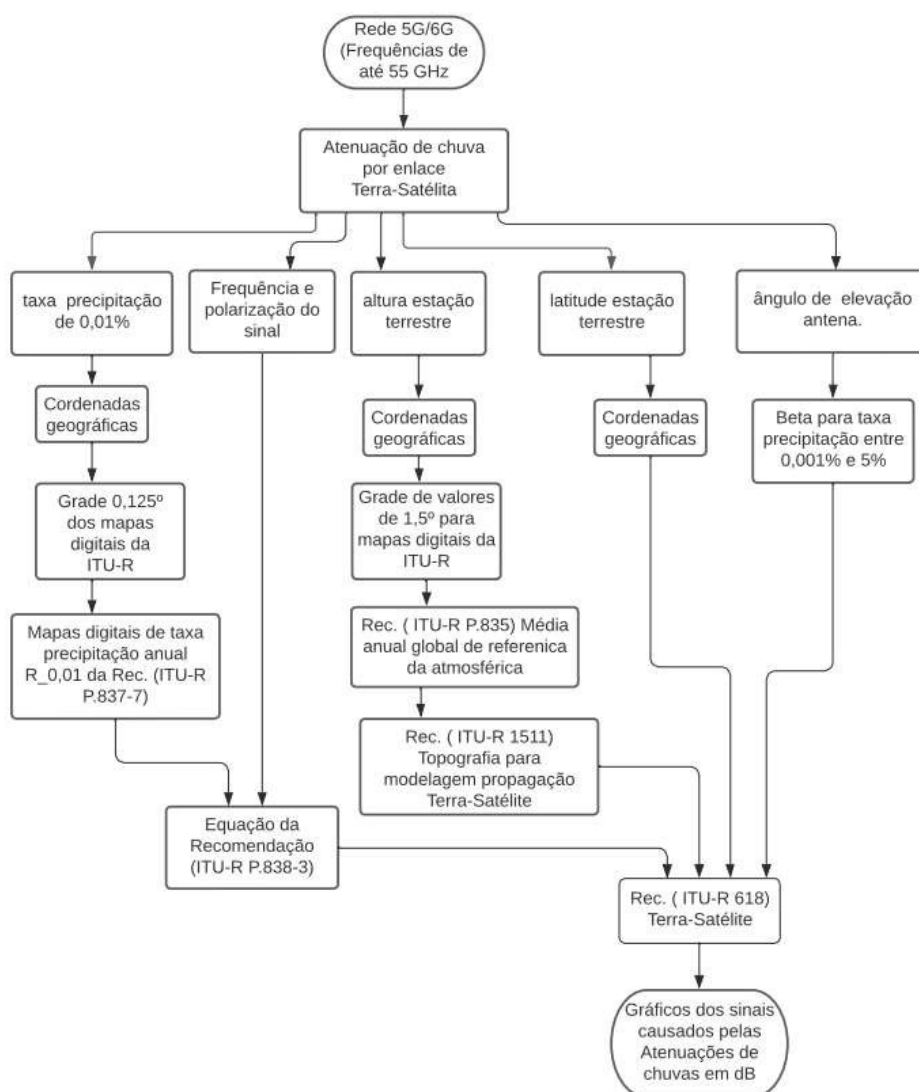
Fonte: da autora.

A base de dados para determinar a taxa de precipitação da estação Meteorológica local da cidade de Belo Horizonte foi extraída da estação do INMET, onde o método para calcular a intensidade de chuva empregado, foi a distribuição de Gumbel. Outra forma para determinar a taxa de precipitação, foi por meio dos mapas digitais da Rec. ITU-R P.837-7, em que foram feitas conversões para os intervalos das grades de valores da ITU, como pode ser verificado na seção 2.2.1.1.1, em que as coordenadas das latitudes e longitude possuem passos de 0,125°. Por

isso, se faz a conversão das coordenadas geográficas da cidade de estudo para a grade fornecida pela recomendação.

A função *rainpl* do *software* faz parte das bibliotecas do MATLAB e simula a atenuação do sinal causada por chuvas. Nesta função, a Rec. ITU-R P.530 e Rec. ITU-R P.838 são implementadas utilizando suas respectivas equações. Esta função pode ser melhor entendida na Figura 3.7.

Figura 3.3 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por chuvas em enlaces do tipo Terra-Satélite.



Fonte: da autora.

O fluxograma para a atenuação do sinal causada por chuvas para enlace Terra-Satélite, é mostrado na Figura 3.3. A Rec. ITU-R P.618-13 é utilizada para esse tipo de atenuação, cujas seis variáveis de entrada são utilizadas: taxa de precipitação excedida de 0,01%, intervalos

de frequências, polarização do sinal, altura acima do nível médio do mar da estação terrestre, latitude da estação terrestre e elevação do sinal.

A taxa de precipitação é encontrada de forma semelhante ao enlace Terra-Terra (atenuação-chuvas), do fluxograma da Figura 3.2, utilizando-se da Rec. ITU-R P.837-7. Os intervalos das frequências são de 1 GHz a 55 GHz, especificados na Rec. ITU-R P.618. A polarização do sinal é uma caracterização da antena. A altura acima do nível médio do mar da estação terrestre é determinada pela Rec. ITU-R 1511, porém, ela será utilizada na atenuação dos gases atmosféricos por meio da Rec. ITU-R P.835, em que a mesma foi aproveitada. No entanto, o comprimento do caminho se modifica, sendo agora um caminho inclinado. Logo, precisou determinar a altura da estação terrestre e a altura da chuva. A altura da chuva pode ser encontrada na Rec. ITU-R P.839, que também possui grades de valores para latitude e longitude, conforme informado na seção 2.2.1.2.1, com passos de 1,5°. A latitude da estação terrestre utilizou-se dos valores reais da latitude, da cidade estudada. Por fim, o ângulo de elevação da antena, conforme pode ser verificado na Figura 2.7, refere-se à inclinação da antena em relação ao ângulo de visão. Este foi implementado todo o código das equações no MATLAB, já que o mesmo não possuía nenhuma função na biblioteca do mesmo.

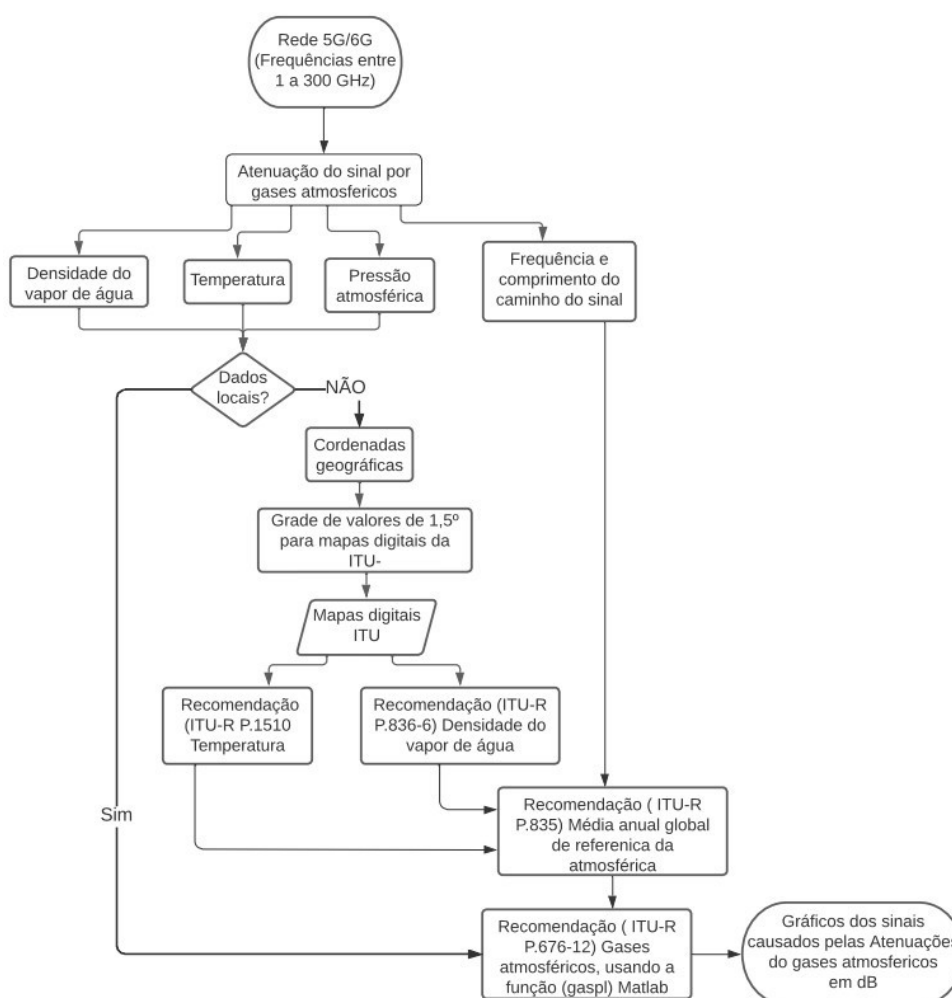
Para os gases atmosféricos, o fluxograma proposto é apresentado na Figura 3.4, que utiliza a Rec. ITU-R P.676-12. As seguintes variáveis de entrada foram usadas: comprimento do caminho, intervalo de frequências, temperatura, pressão atmosférica e densidade do vapor de água.

O comprimento do caminho é semelhante ao usado na Rec. ITU-R P.530. No caso dos intervalos das frequências, aplica-se a Atenuação Específica gasosa dada pela Equação 2.29, que possui coeficientes disponibilizados na própria Rec. ITU-R P.676-12. Para determinar a densidade do vapor de água, temperatura e pressão atmosférica no site da ITU-R, encontra-se um código implementado em MATLAB. Para ter acesso aos dados das tabelas deste código, foi necessário criar um novo código também em MATLAB para grade de valores da latitude e longitude com passo de 1,5°, conforme descrito na seção 2.2.2.1.1. Faz-se o *download* de pasta compactada, que obtém-se algumas informações provenientes da recomendação e o código implementado, porém para identificar como utilizar o padrão de precisão simples da IEEE, somente foi possível depois de acessar o código e usar a função *edit* do MATLAB e verificar o que era as entradas e saídas da função criada do código existente. Desta forma, para ter acesso às tabelas de valores implementado no código para pressão atmosférica, para temperatura, para

densidade de vapor de água e para a altitude terrestre acima do nível do mar, visto na Figura 3.9, foi feito a conversão nas coordenadas já convertidas da grade de 1,5°, agora para valores de padrão de precisão simples (4 bytes, 32 bits). Porém, caso deseje criar o próprio código, a ITU disponibiliza arquivos em formato '.txt' para ITU-R P.1510, ITU-R P.836 e ITU-R P.1511, que utiliza as equações da Rec. ITU-R P.835, e calcula os valores da 'Atmosferas Padrão de Referência', e obtém, então, a pressão atmosférica.

Optou-se pela utilização do código para as simulações. Em seguida, adicionou-se os dados encontrados na função *gaspl* que faz parte das bibliotecas do *software* MATLAB e então foi possível determinar a atenuação do sinal da cidade de estudo. A função possui todas as equações mencionadas na Rec. ITU-R P.618, como pode ser verificado na Figura 3.8.

Figura 3.4 – Fluxograma das etapas dos estudos das atenuações do sinal de radiofrequência causadas por gases atmosféricos.



Fonte: da autora

3.1 Metodologia proposta para determinar a atenuação de sinal causada por chuvas em diferentes cidades ao redor do mundo

Na simulação para enlace Terra-Terra, utilizou-se da Rec. ITU-R P.530, que estuda a atenuação do sinal causada por chuvas. Foram analisadas diversas cidades para averiguar esse impacto. Municípios do estado de Minas Gerais como: Divinópolis, Lavras, Araxá, Belo Horizonte e Passos. Cidades Brasileiras, em quatro regiões ao longo do país, tais como: Manaus no Norte, São Paulo no Sudeste, Natal no Nordeste, Brasília e Campo Grande no Centro-Oeste. Cada região possui características ambientais diferentes como clima, vegetação e relevo, possibilitando variações de intensidade de chuvas distintas. Por fim, além de São Paulo, no Brasil, foram simuladas cidades de países diferentes, como São Francisco, nos Estados Unidos; São Petersburgo, na Rússia; Cidade do Cabo, na África do Sul; Tóquio, no Japão; e Lloró, na Colômbia, a qual é considerada umas das cidades com maior índice de precipitação anual do mundo. Todas as cidades foram escolhidas por serem cidades importantes economicamente e populacionalmente naqueles países. Algumas dessas cidades com latitudes e longitudes bem distintas possibilitando assim obter climas diferentes, desta forma, uma melhor verificação da variação da atenuação do sinal em pontos diferentes.

Já a simulação enlace Terra-Satélite, utilizou-se da Rec. ITU-R 618 e verificou algumas cidades: três entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio e duas fora dessa linha de localização. As cidades simuladas entre as linhas dos Trópicos foram: São Paulo, Tóquio e Cidade do Cabo. Fora desse intervalo estão as cidades São Francisco e São Petersburgo. No Caso das duas cidades, Tóquio e Cidade do Cabo encontram-se em localizações próximas ao limiar de 36° , sendo Tóquio no hemisfério Norte e Cidade do Cabo no hemisfério Sul.

3.1.1 Recomendações ITU-R P.530-18, P.837-7, P.838-3 e Intensidade de chuvas de Belo Horizonte-MG

Considerando os mapas digitais da ITU-R P.837-7, com grades de valores a serem aproximados para intervalos com passos de $0,125^\circ$, da ITU-R, criou-se o Algoritmo 1 para carregar os dados dos arquivos em formato '.txt' dos mapas digitais da recomendação na linha 1, e para determinar a precipitação para a latitude e longitude de estudo, implementou as linhas 3 e 4. Uma aproximação das coordenadas reais, para as grades da ITU, é realizada por meio do Algoritmo 2. A forma de aproximar os valores foi pelo método do menor erro relativo, que considera o valor real e o valor esperado dos intervalos. Neste caso, verificou-se para quais dos dois pontos

da grade da ITU-R P.837 as coordenadas teriam que ser arredondadas. Então, no Algoritmo 1, na linha 8, localizou a intensidade de chuvas do município determinado na coordenada inserido.

Algorithm 1 Intensidade de chuvas das cidades nos mapas digitais da ITU

```

1: arquivotxt=.txt (latitude, longitude e da intensidade de chuvas)
2: variavel de latitude=valor
3: variavel de longitude=valor
4: Algoritmo 2
5: for  $i=1$  até vetor coluna
6:   for  $i=1$  até vetor linha
7:     if valor.txt=variavel latitude e valor.txt=variavel longitude then
8:       variavel precipitacao=posicao vetor
9:     end if
10:  end for
11: end for

```

Segundo a Resolução nº 886 DE 26 de outubro de 1966 do IBGE, para ocorrer o arredondamento deve-se utilizar o valor com menor erro relativo, onde é determinado pelas Equações 3.1 e 3.2. Isso é o que se faz no Algoritmo 2, na linha 18, as reticências (...) representam repetição do *if* para os demais intervalos.

O erro absoluto é dado por:

$$erro_{absoluto} = |x - \bar{x}| \quad (3.1)$$

E o erro relativo é dado por:

$$erro_{relativo} = \frac{|x - \bar{x}|}{|x|} * 100\% \quad (3.2)$$

Onde x é o valor real e \bar{x} valor aproximado.

O Algoritmo 1 foi criado para ser utilizado nas recomendações que necessitam da taxa de precipitação em qualquer linguagem de programação. Comparou-se o método proposto com o código existente do grupo de estudo da ITU (SG 3). Também verificou-se o erro relativo entre os dados encontrados e os dados do grupo de estudo. Os valores obtidos foram adicionados ao Quadro 3.2.

O comprimento do caminho se altera quando se tem alteração na coordenada geográfica, conforme o cálculo do comprimento de uma circunferência, o qual é dado por:

$$Perímetro_{circulo} = 2 * \pi * R \quad (3.3)$$

Algorithm 2 Erro relativo

```

1: a=round(coordenada);
2: if a for maior e igual a coordenada then
3:   b=a-coordenada;
4:   inteiro=a;
5: else
6:   b=a-(coordenada-1);
7:   inteiro=a+1;
8: end if
9: if intervalo entre grade 1 then
10:  variavel um =0.000
11:  variavel dois=0.125
12: end if
13: if intervalo entre grade 2 then
14:  variavel um =0.125
15:  variavel dois=0.250
16: end if
17: variavel dois=0.125
18: ...
19: erro relativo 1=|((aproximado-exato)/exato)|*100
20: erro relativo 2=|((aproximado-exato)/exato)|*100
21: if erro variavel um > que erro variável dois valor then
22:  valor=variavel dois
23: end if
24: else
25:  valor=variavel um
26: end else

```

Quadro 3.2 – Intensidade de chuva utilizando o método e grupo de estudos da ITU

Cidade	BH	Lavras	Manaus	Campo Grande	São Peter.	Tóquio	LLoró
precip. ITU (mm/h)	65,448	61,505	98,303	74,018	24,511	55,890	123,351
precip. método (mm/h)	65,406	61,482	98,268	74,035	24,462	55,43	122,043
erro relativo	0,06%	0,04%	0,04%	0,02%	0,20%	0,82%	1,06%

Fonte: da autora

Sendo π uma constante de 3,14 e R o valor do raio da terra (RIBEIRO, 2022). Segundo Azevedo et al. (2022), o perímetro da Terra é de 40030 km, utilizando-se da Equação 3.4 encontra-se um raio de 6370 km. O valor em graus de uma volta completa na terra é 360°, para transformar o valor do perímetro angular da terra em perímetro linear, usa-se a seguinte relação:

$$2 * \pi * R = 360(\text{graus}) \quad (3.4)$$

Dessa forma, usando a regra de três simples, cada grau corresponde a 111,19 km. O valor decimal da coordenada (GD) é convertido em graus, minutos e segundo (GMS). Sendo assim, 1° é igual a 60 minutos e 1° igual 3600 segundos. Dessa forma, realizou a conversão de um minuto correspondendo a 1,85 km e um segundo a 0,031 km.

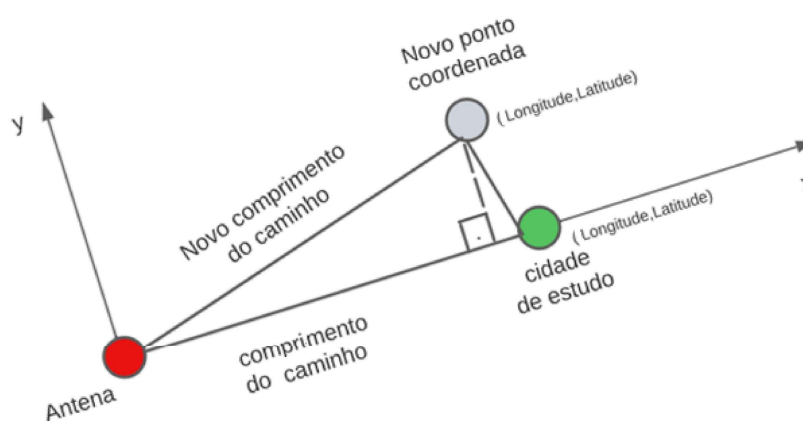
A cidade de Tóquio foi analisado para converter as coordenadas reais em aproximadas e a distância geográfica inicial e a nova distância ao novo ponto encontrado. Os dados encontrados foram inseridos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Dados da latitude e longitude da cidade de Tóquio.

Latitude (GMS) real	Latitude (GMS) aprox.	Diferença distância angular	Diferença distância linear
35°41'21,84"	35°45'0"	3'38,16"	6,73 km
Longitude (GMS) real	Longitude (GMS) aprox.	Diferença distância angular	Diferença distância linear
139°41'31,2"	139°45'0"	3'28,8"	6,44 km

Fonte: da autora.

Figura 3.5 – Cálculo do novo comprimento do caminho do sinal em relação à coordenada determinada pelo método



Fonte: da autora

Considerando os eixos do gráfico da Figura 3.5, latitude o eixo y e longitude o eixo x, determinou-se a coordenada da antena no eixo inicial e o valor do comprimento real do caminho de 1000 metros. Assim, é possível determinar o novo comprimento do caminho, que foi encontrado com diferença de 6,42 Km. Logo, esse novo comprimento do caminho seria caso a antena estivesse situada no ponto mostrado da Figura 3.5, o novo comprimento do caminho seria 993,58 km, porém, se a antena estiver na outra extremidade da cidade de estudo, o comprimento do caminho se altera para 1006,42 metros. Então, simulou-se a taxa de precipitação

Tabela 3.1 – Dados da Estação Metrológica do INMETRO, da cidade de Belo Horizonte

Nome	BELO HORIZONTE
Código Estação	83587
Latitude	-19,93444444
Longitude	-43,95222222
Altitude	915,47
Situação	Operante

Fonte: adaptado do (INMET, 2021)

Os valores convertidos das latitudes e longitude reais para aproximados, das cidades do estado de Minas Gerais, Brasileiras e do Mundo foram adicionados aos seguintes Quadros 3.5, 3.6 e 3.7.

Quadro 3.5 – Dados das latitudes e longitudes do estado de Minas Gerais

	Lat. (°) real	Lat.(°) aprox.	Long. (°) real	Long. (°) aprox.
Lavras	-21,2457	-21,250	-44,9998	-45,000
BH	-19,9344	-19,875	-43,9522	-44,000
Divinópolis	-20,1394	-20,125	-44,8872	-44,875
Passos	-20,7204	-20,750	-46,6101	-46,625
Araxá	-19,5934	-19,625	-46,9408	-47,000

Fonte: da autora.

Quadro 3.6 – Dados das latitudes e longitudes das cidades brasileiras

	Lat.(°) real	Lat.(°) aprox.	Long.(°) real	Long.(°) aprox.
Manaus	-3.10719	-3,125	-60,0261	-60,000
São Paulo	-23,5489	-23,500	-46,6388	-46,625
Natal	-5,79448	-5,750	-35,2111	-32,250
Brasília	-15,7801	-15,750	-47,9292	-47,875
Campo Grande	-20,4435	-20,500	-54,6478	-54,625

Fonte: da autora.

Quadro 3.7 – Dados das latitudes e longitudes das cidades do mundo

	Lat.(°) real	Lat.(°) aprox.	Long.(°) real	Long.(°) aprox.
São Paulo	-23,5489	-23,500	-46,6388	-46,625
São Francisco	37,7272	37,750	-123,032	-123
São Petersburgo	59,9339	59,875	30,3061	30,250
Cidade do Cabo	-33,925	-33,875	18,425	18,375
Tóquio	35,6894	35,750	139,692	139,750
Lloró	5,5	5,5	-76,533	-76,500

Fonte: da autora.

Os valores da intensidade de chuvas encontrados dos mapas digitais da ITU, utilizando o fluxograma da Figura 3.2 do Algoritmo 1, das 15 cidades estudadas foram adicionados ao Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Intensidade de chuvas das cidades do estado de Minas Gerais, brasileiras e mundiais estudadas dos mapas digitais da ITU-R P.837-7

MINAS	Intens. chuvas (mm/h)	BRASIL	Intens. chuvas (mm/h)	MUNDO	Intens. chuvas (mm/h)
Belo Horizonte	65,4070	Manaus	98,2680	São Paulo	62,6850
Divinópolis	63,9930	São Paulo	62,6850	São Francisco	30,9540
Passos	63,3420	Natal	79,4520	São Petersburgo	24,4620
Lavras	61,4820	Brasília	67,0870	Cidade do Cabo	36,6560
Araxá	67,8120	Campo Grande	70,0350	Tóquio	55,4300
				Lloró	123,00

Fonte: da autora

Com os valores do Quadro 3.8, foi feito o estudo do trabalho do autor (AVETISYAN; HOLUB, 2018), que faz simulações para atenuação específica em função da frequência conforme a Figura 2.6, tendo como referência o mesmo contexto e perfil dos gráficos, e simulando a atenuação total causada pelas chuvas em função da frequência, aplicando a Equação 2.2. Neste caso, utiliza-se a multiplicação da Atenuação Específica com o fator da correção do comprimento do caminho e determina a atenuação total causado pelas chuvas.

Em seguida, aplicou a função *rainpl* da Figura 3.7, do *software* MATLAB em cada cidade, conforme mostrado no Algoritmo 3, onde são adicionadas às quinze intensidade de chuvas, sendo cinco para cada uma das cidades de Minas Gerais, mais cinco para as cidades brasileiras e as outras cinco para as cidades ao redor do mundo. As reticências (...) das linhas 4, 7, 13, 16, 21 e 24 representam continuação para as demais cidades que seriam repetidas para atender as 15 cidades simuladas. A linha 5 é a função que realiza o cálculo da atenuação em dB, sendo necessário no mínimo três variáveis de entra na função: comprimento do caminho (km), frequência (GHz) e taxa de precipitação (mm/h).

A Rec. ITU-R P.530 é verificada na função *rainpl* da Figura 3.7, onde a linha 104 calcula a Atenuação Específica. Neste caso, é chamada uma função denominada *rainatt*, que possui os coeficientes k e α para polarização do sinal vertical ou horizontal. A Equação 2.1 é realizada na linha 112, onde o fator r é limitado em 2,5 na linha 119, conforme informa a Rec. ITU-R P.530. Por fim, a atenuação é calculada em função do fator r , do comprimento efetivo do caminho e da Atenuação Específica na linha 124.

Figura 3.7 – Cálculo realizado na função rainpl.

```

102
103 % Calculate specific attenuation gamma
104 - [gamma,alpha] = phased.internal.rainatt(f(:).',rr,el(:),tau(:));
105
106 % Calculate distance factor r
107 - d = R(:)/1e3; % Actual path length (km)
108 - fGHz = (f(:)./1e9).';
109
110 % Calculate denominator of effective range equation
111 % Use bsxfun to handle implicit expansion
112 % denom = 0.477.*d.^0.633.*rr.^(0.073.*alpha).*fGHz.^0.123 - 10.579*(1 - e
113 - denom = bsxfun(@times,0.477.*d.^0.633,rr.^(0.073.*alpha));
114 - denom = bsxfun(@times,denom,fGHz.^0.123);
115 - denom = bsxfun(@minus,denom,10.579*(1 - exp(-0.024.*d)));
116
117 % Calculate effective range
118 - r = 1./denom;
119 - r(r > 2.5) = 2.5;
120
121 % Calculate effective path length (km)
122 - deff = bsxfun(@times,r,d); % bsxfun to handle implicit expansion
123
124 - L = bsxfun(@times,deff,gamma);

```

Fonte: da autora.

Algorithm 3 Código para gerar gráficos dos resultados da atenuação do sinal causada por chuvas nas cidades ao redor do mundo.

- 1: *Gráfico para as cidades Minas usando 837-7*
 - 2: rrBH=intensidade chuva cidade BH
 - 3: rrDiv=intensidade chuva cidade Divinópolis
 - 4: ...
 - 5: LBH=**rainpl**(1e3,((1:300)*10⁹),rrBH)
 - 6: *plota frequência por LBH*
 - 7: ...
 - 8: legenda('BH','Divinópolis','Passos','Lavras','Araxa')
 - 9:
 - 10: *Gráfico para as cidades Brasileiras usando 837-7*
 - 11: rrManaus=intensidade chuva cidade Manaus
 - 12: rrSP=intensidade chuva cidade SP
 - 13: ...
 - 14: LManaus =**rainpl**(1e3,((1:300)*10⁹),rrManaus)
 - 15: *plota frequência por LManaus*
 - 16: ...
 - 17:
 - 18: *Gráfico para as cidades do Mundo usando 837-7*
 - 19: rrSP=intensidade chuva cidade SP
 - 20: rrSaoFrancisco=intensidade chuva cidade São Francisco
 - 21: ...
 - 22: LrrSP = **rainpl**(1e3,((1:300)*10⁹),rrSP)
 - 23: *plota frequência por LrrSP*
 - 24: ...
-

3.1.2 Intensidade de chuvas de Belo Horizonte-MG pela distribuição de Gumbel.

A precipitação de chuvas para o município de Belo horizonte, capital do estado de Minas Gerais, localizado na latitude $-19,934^\circ$ e longitude $-43,952^\circ$, foi obtida por meio da Estação Pluviométrica Convencional do INMET (Instituto Nacional de Metrologia), 83587 (INMET, 2021). Foram coletados 54 anos de precipitação diárias, entre o período de 1961 a 2014. A escolha da estação foi devido ser a única estação na localidade, com quantidades de dados suficientes para aproximação dos intervalos de dados da ITU-R P.837-7.

Primeiramente, verificou se não existiam falhas de dados ou ausência dos mesmos. Em seguida, foi criado o Algoritmo 4, que realiza o carregamento dos dados em formato '.xlsx' dos valores do volume de chuvas diárias em BH, pode ser verificado na linha 1. Na sequência, foram aplicados os passo a passo do método da distribuição de Gumbel.

Para determinar o máximo de precipitação anual, foram considerado todos os anos disponíveis pelo INMET. Criou-se um 'for' na linha 8 do Algoritmo 4, considerando como anos comuns com 365 dias, linha 16, e os anos bissextos com 366 dias, linha 14. O primeiro ano que o algoritmo considera nos dados do INMET é 1961, ano comum. Em seguida, a pesquisa focou em criar 'if' para anos bissextos, na linha 13, especificamente inicia no ano de 1964. Anos bissextos ocorrem de quatro em quatro anos, dentro dos anos do intervalo, como realizado nas linhas 13 a 15. Se o ano for comum, o algoritmo na linha 15 a 17 mantém a quantidade de dias de 365. Essa etapa é feita dentro de um 'for', entre as linhas 8 a 22, onde a linha 19 retira a máxima precipitação do ano verificado. Todas as máximas intensidades anuais dos 54 anos foram adicionadas à Figura 4.4, sendo um gráfico em barras dos anos do intervalo.

Em seguida, foi feita a média dos máximos valores encontrados por meio da Equação 2.3, na linha 23; e o desvio padrão, provinda da Equação 2.4, nas linhas 27 a 33. Por fim, o valor de μ , foi determinado na linha 35 e α na linha 34, e determina o valor da precipitação de chuvas da cidade de Belo Horizonte de um dia, X_{TR} , na linha 36.

Após determinar X_{TR} estimou as lâminas de chuvas juntamente à sua intensidade para tempos de duração inferiores a 24 horas. Segundo o autor (PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017), a chuva de 24 horas difere da chuva de um dia. Sendo a chuva de 24 horas o total máximo de precipitação para um período contínuo de 24 horas, e a chuva de um dia, o valor contido entre os horários de observação pluviométrica. Desta forma, o cálculo encontrado em X_{TR} , foi convertido, primeiramente, em 24 horas, multiplicando o valor encontrado pela constante de degradação de 1,14 da Tabela 3.2, na linha 37 do Algoritmo 4. Em seguida, converteu o valor

de $X_{TR}/24h$ para 1 hora, na linha 38. Neste caso, o valor da constante de degradação foi de 0,42. Essas constantes também foram utilizadas pelos trabalhos Ogassawara e Oliveira (2017), Arruda (2008), Pereira, Duarte e Sarmiento (2017). Os dados encontrados nos cálculos foram adicionados ao Quadro 3.9.

Algorithm 4 Cálculo da distribuição de Gumbel

```

1: carrega=arquivo.xls (intensidade de chuvas diárias de Belo Horizonte)
2:
3: Cálculo da média
4: anos=quantidade de anos desejados;
5: dias=365 dias no ano;
6: ...
7: a=1;
8: for i=1 até anos
9:   for i=1 até dias
10:     vetor(dias)=cidade(a);
11:     a=a+1;
12:   end for
13:   if limitar anos bissextos then
14:     dias=366
15:   else
16:     dias=365
17:   end if
18:   ano=ano+1;
19:   valor(ano)=pega o máximo valor referente ao ano;
20:   c=valor(ano)+velho;
21:   velho=c;
22: end for
23: media=velho/ano;
24: antig=0;
25:
26: Cálculo do desvio padrão
27: for i=1 até anos
28:   b=(valor(i)-media)2;
29:   c=b+antig;
30:   antig=c;
31:   anosss(i)=1960+i;
32: end for
33: desvio=sqrt(antig/(tr-1));
34:  $\alpha=1.2826/\text{desvio}$ ;
35:  $\mu=\text{media}-(0.45*\text{desvio})$ ;
36:  $X_{tr}=(\text{-log(-log(1-1/TR)))/\alpha)+\mu$ ;
37: chuvadia= $X_{tr}$ *1.14;
38: chuvahora=chuvadiah*0.42;

```

Assim, foi possível obter o valor da taxa de precipitação de $R_{0,01}$ da cidade de Belo Horizonte/MG pelos dados locais e também a precipitação proveniente dos mapas digitais da

ITU, conforme feito no fluxograma da Figura 3.2, adicionados ao Quadro 3.10. Comparou a precipitação local com a dos mapas digitais, por meio do Algoritmo 5, .

Tabela 3.2 – Constantes do modelo de desagregação de chuvas diárias

Relação	Constante	Multiplicado	Desagregar
24 h/1 dia	1,14	x (dia, Tr)	x (24 h, Tr)
12 h/24 h	0,85	x (24 h, Tr)	x (12 h, Tr)
10 h/24 h	0,82	x (24 h, Tr)	x (10 h, Tr)
8 h/24 h	0,78	x (24 h, Tr)	x (8 h, Tr)
6 h/24 h	0,72	x (24 h, Tr)	x (6 h, Tr)
1 h/24 h	0,42	x (24 h, Tr)	x (1 h, Tr)
30 min/1 h	0,74	x (1 h, Tr)	x (30 min, Tr)
25 min/30 min	0,91	x (30 min, Tr)	x (25 min, Tr)
20 min/30 min	0,81	x (30 min, Tr)	x (20 min, Tr)
15 min/30 min	0,70	x (30 min, Tr)	x (15 min, Tr)
10 min/30 min	0,54	x (30 min, Tr)	x (10 min, Tr)
5 min/30 min	0,34	x (30 min, Tr)	x (5 min, Tr)

Fonte:(OGASSAWARA; OLIVEIRA, 2017)

Quadro 3.9 – Variáveis das equações da distribuição de Gumbel

Média diária anual	93,8778 (mm)
Desvio Padrão	26,4493 (mm)
Alfa	0,0485 (/mm)
Mu	81,9756 (mm)
XTR	164.0426 (mm/dia)

Fonte: da autora.

Algorithm 5 Gerar gráficos da intensidade de chuvas na cidade de Belo Horizonte/MG, utilizando a precipitação da distribuição de Gumbel e dos mapas digitais da ITU p.837-7.

- 1: $LBHDNOS = \text{rainpl}(1e3, ((1:300) * 10^9), rrBHDNOS)$;
- 2: plota frequência por LBHDNOS (Freq. (GHz) x Specific Attenuation (dB/Km));
- 3: $LBH = \text{rainpl}(1e3, \text{freq}, rrBH)$;
- 4: plota frequência por LBH (Freq. (GHz) x Specific Attenuation (dB/Km));
- 5: legenda('INMETRO', 'ITU')

Quadro 3.10 – Intensidade de chuvas da cidade de Belo Horizonte, por meio dos mapas digitais da ITU e da distribuição de Gumbel

ITU (mm/h)	Gumbel (mm/h)
65,4070	78,5436

Fonte: da autora.

3.1.3 Recomendação ITU-R P.618-13, ITU-R P.839-4

A ITU-R P.618-13 foi utilizada para calcular a atenuação do sinal de radiofrequência causada pelas chuvas em enlace Terra-Satélite. Para tanto, determinou-se a altura da chuva, utilizando a Rec. ITU-R P.839-4 dos mapas digitais da altura da chuva, com passos para as grades de valores de 1,5°, para latitude e longitude. Diante disso, foi criado o Algoritmo 6, onde a linha 1 carrega os arquivos em formato '.txt', fornecidos pela ITU. Como essa grade de valores também será utilizada na ITU-R P.676, dos gases atmosféricos, foi criado o Algoritmo 7, este determina a latitude e longitude para a grade da ITU, com passo de 1,5°, no qual é verificado seu uso na linha 10 do Algoritmo 6.

Algorithm 6 Mapas digitais da altura da chuva

```

1: arquivotxt=.txt (latitude, longitude e altura da chuva)
2: data.X =Lat(:,:);arquivo ITU latitude
3: dataa.X = Lon(:,:); arquivo ITU longitude
4: dataaa.X = h0(:,:); arquivos ITU altura chuva
5: hr=0; altura chuva
6: lin=size(Lat(:,1));
7: linha=lin(1);
8: col=size(Lat(1,:));
9: coluna=col(2)
10: Algoritmo 7
11: for i=1 até vetor coluna
12:   for i=1 até vetor linha
13:     if valor.txt=variavel latitude e valortxt=variavel longitude then
14:       variavel altura=posicao vetor
15:     end if
16:   end for
17: end for

```

No Algoritmo 7, na linha 1, o valor inicial da latitude é de +90° e longitude é de 0°, na linha 2. As linhas 3 e 4 são valores das coordenadas da cidade a serem convertidos para os mapas digitais. Como a longitude pode ser considerada de +180° a -180° ou de 0° até 360°, foi verificado nas linhas 5 a 7 se elas estavam negativas, em caso afirmativo, se convertem em positivas, caso contrário, mantêm o valor. O 'for' da linha 8 a 12 é para preenchimento do vetor com valores da grade da ITU latitude, considerando o passo de 1,5°, o mesmo foi realizado de 13 a 15 para longitude. Já o 'for' da linha 16 a 20, grade dos mapas digitais para latitude recorrem à equação do erro relativo da Equação 3.2, seguindo o mesmo procedimento adotado no Algoritmo 2, porém alterando a grade para 1,5°. O mesmo procedimento é realizado para longitude nas linhas 21 a 23. As linhas 24 a 28 encontram a altura da estação terrestre (km),

que faz uso da ITU-R P.1511. Retornando então ao Algoritmo 6 é possível determinar a altura da chuva para a coordenada de estudo nas linhas de 11 a 17.

A altura acima do nível médio do mar da estação terrestre (km) é encontrada na Rec. ITU-R P.1511, cuja a grade determinada foi para uso do código disponibilizado pela ITU. O código com o arquivo é disponibilizado no site da instituição com uma pasta em formato zipado, dado pela Rec. ITU-R P.835. Esses possuem intrinsecamente valores de padrão de precisão única (4 bytes, 32 bits). Para o caso da latitude, o range é (1..121), sendo 1=90° 2=88,5° 121=-90° e no caso da longitude, o range=(1..240), sendo 1=0° 2=1,5° 240=358,5°, conforme mostrado no Algoritmo 8, onde se utiliza o valor da latitudeITU, linha 26 e longitudeITU linha 30 do Algoritmo 7.

Algorithm 7 Determinando os valores de latitude e longitude para o range de intervalos a serem usados nos mapas da ITU dos gases atmosféricos (P.676) e altura da chuva (P.839)

```

1: latinicio=valor inicial
2: loninicio=valor inicial
3: latitude=valor desejado
4: longitude=valor desejado
5: if longitude<0 then
6:   longitude=longitude+360
7: end if
8: for i=1 até final do range latitude
9:   vetorlatangulo(i)=latinicio
10:  latinicio=latinicio-1.5
11:  vetorlatITU(i)=i
12: end for
13: for i=1 até final do range longitude
14:  semelhante a latitude
15: end for
16: for i=1 até final do range latitude
17: if latitude for maior ou igual vetorlatangulo(i) e latitude for maior vetorlatangulo(i+1) then
18:   Usa Equação 3.2 do erro relativo, baseando-se no Algoritmo 2, alterando para grade de 1,5°
19: end if
20: end for
21: for i=1 até final do range longitude
22:  Realiza o mesmo procedimento da latitude
23: end for
24: for i=1 até final do range latitude
25: if latitude==vetorlatangulo(i) then
26:  latitudeITU=vetorlatITU(i)
27: end if
28: end for
29: for i=1 até final do range longitude
30:  Realiza o mesmo procedimento da latitude para valores da ITU
31: end for

```

Algorithm 8 Função para o uso da Rec. ITU-R P.1511, altura média da estação terrestre em km

```

1: ilat=latitudeITU
2: ilong=longitudeITU;
3: [tk,pr,vd,hm]=read-mprof(ilat,ilong); função código ITU
4: hs=hm(1:1);
5: hs=hs/1000;

```

Conforme pode ser verificado na Figura 2.7, o cálculo do comprimento do caminho inclinado realiza a diferença entre a altura da chuva e a altura média da estação terrestre, que é realizado então na linha 1 do Algoritmo 9. Casos em que o ângulo de elevação é menor que 5°, considera-se o raio da Terra, especificado pela ITU-R P.618 de 8500 Km, utilizando então a Equação 2.14, realizado na linha 5, do Algoritmo 9. Caso contrário, o comprimento inclinado é determinado na linha 4. E a projeção horizontal do caminho é calculada na linha 9.

Algorithm 9 Cálculo da projeção horizontal do comprimento do caminho inclinado

```

1: dif=(hr-hs);
2: if dif>0 then
3:   if ângulo elevação maior que 5° then
4:     Ls=((dif)/seno(anguloelevacao));
5:   else Ls=(2*(dif)/((((seno(anguloelevacao))^2) + ((2 * (dif))/RaioTerra))^0,5)) +
      (seno(anguloelevacao)));
6:   end if
7: else Ls=0;
8: end if
9: LG=Ls*cosseno(anguloelevacao);

```

A taxa de precipitação excedida utilizada para qualquer caso é 0,01%, que foi determinada no fluxograma 3.2, por meio do Algoritmo 1. Porém, para casos de porcentagens diferentes, um ajuste é realizado no β , da Equação 8.

A Atenuação Específica utilizada na Equação 5 é a mesma da seção 2.2.1.1.3, que representa a ITU-R P.838 do enlace Terra-Terra da atenuação causada por chuvas, porém, sem a variação da porcentagem excedida de 0,01% da taxa de precipitação.

Então, foram calculados o fator de redução horizontal, Algoritmo 10 da Equação 5, e ajuste vertical Algoritmo 11 da Equação 11.

Algorithm 10 Cálculo da redução horizontal

```

1: fGHZ=(f(:)/1e9).';
2: a=LG.>';
3: denom=(1+(0.78*((bsxfun(@rdivide,a*atenuação especifica de taxa 0,01%,fGHZ))^0,5)))+(0.38*(1-(e^-2*a)));
4: r001=1./denom

```

Algorithm 11 Cálculo do ajuste vertical

```

1: sig=arco tangente(dif/(a.*r001));
2: ell=el.';
3: if sigma maior que ângulo de elevação then
4:   LR=((mult)/(cosseno(ell)));
5: else LR=((hr-hs)/(seno(ell)));
6: end if
7: if modulo da latitude da estação terrestre for menor 36 then
8:   X=36-latitude estação terrestre;
9: else X=0;
10: end if
11: v001=1/(1+(((seno(elev)0.5)) * (31 * (1 - e-1.*(elev/(1+X))))) * (((LR * gamma)0.5)/(f2)) - 0.45))
12: r001=1/denomm

```

Logo, o comprimento efetivo do caminho é determinado no Algoritmo 12 na linha 1, e a atenuação prevista excedida em 0,01% de um ano médio é determinada na linha 2 deste Algoritmo.

Algorithm 12 Calculo redução horizontal

```

1: LE=bsxfun(@times,LR,v001);
2: La=bsxfun(@times,atenuação específica de taxa 0,01%,LE);

```

A ITU-R P.618 utiliza da Equação 2.26 para estimar a atenuação de um ano médio em porcentagens de tempo entre 0,001% e 5,0%, com exceção a porcentagem de 0,01%, em que utiliza uma extrapolação. Quando a região possui o módulo da latitude inferior a 36° nas linhas 9 a 13, um ajuste é realizado por meio da Equação 8 no Algoritmo 13, para o β , onde pode ser verificado na linha 15 o uso do deste na equação da atenuação, considerado uma região de clima Tropical entre os Trópicos, como pode ser verificado na Figura 2.5.

Deste modo, foram analisados três cenários de cidades para os módulos das latitudes da estação terrestre na Zona dos Trópicos e fora dela. As seguintes cidades foram analisadas: São Paulo, no Brasil, módulo da latitude de 23,5489°; Tóquio, no Japão, módulo latitude 35,6894° e, São Francisco, nos Estados Unidos, módulo latitude em 37,7272°. Todas as simulações contêm ângulos de elevação em 90° e frequência do sinal de 1 a 55GHz. O ângulo de elevação em 90°, conforme verificado nas Figuras 2.8a e 2.8b, proporciona o menor valor de atenuação do sinal. As cidades de São Paulo e Tóquio têm latitude localizada entre os trópicos e, a cidade de São Francisco, a latitude está acima da linha do Trópico de Câncer. Um comparativo é realizado para verificar o ajuste realizado em β no Algoritmo 13, sem o β , na linha 14 e com ele na linha 15, baseando na Equação 8, da atenuação por porcentagens de um ano médio diferente de 0,01%.

Algorithm 13 Análise da extrapolação para porcentagens de atenuação excedida de um ano médio para faixas de 0,001% a 5% a partir da atenuação a ser excedida de 0,01%, causada por chuvas em enlaces Terra-Satélite

```

1: %Comprimento efetivo do caminho
2: LE=LR*v001;
3: L=gamma*LE
4: L1=0;
5: if porcentagem excedida de tempo for diferente de 0.01 then
6:   if porcentagem tempo>=1 ou latitude estação>=36 graus then
7:     beta=0;
8:   end if
9:   if porcentagem<1 e latitude estação<36 graus e ângulo elevação>=25 graus then
10:    beta=-0.005*(latitudeestacao-36);
11:   else
12:    beta=(-0.005*(latitudeestacao-36))+1.8-(4.25*sind(el));
13:   end if
14: L1=L.*((pct./0.01).(-(0.655+0.033*log(pct)-(0.045*log(L))));
15: L=L.*((pct./0.01).(-(0.655+0.033*log(pct)-(0.045*log(L))-beta.*(1-pct).*sind(el))));

```

O ângulo de elevação influencia diretamente a atenuação do sinal. Diante disso, simulou-se a variação do ângulo de elevação entre 10° e 90°, com passo de 1°, em duas frequências diferentes, 10 GHz e 20 GHz, para as cidades: Cidade do Cabo, na África do Sul, e, São Petersburgo, na Rússia. A primeira sofre influência do β , a qual se localiza na zona dos trópicos, a segunda, não. A simulação se baseia nos estudos da Figura 2.8b, em que se verifica apenas a influência do ângulo de elevação, sem considerar interferência do β para porcentagens de taxas diferentes de 0,01%.

A polarização do sinal, conforme citado por Shayea et al. (2018), atenua o sinal para mais ou menos mesmo com comprimento do caminho, faixa de frequência, taxa de precipitação e sistema semelhantes, porém, com polarizações diferentes, onde os níveis de atenuação causada pela polarização horizontal é maior que em polarização vertical.

3.2 Metodologia proposta para determinar a atenuação do sinal causado por gases atmosféricos

Para o cálculo da atenuação do sinal causada para os gases atmosféricos, utilizou-se a Rec. ITU-R P.676-12. Simulou-se cinco diferentes altitudes para demonstrar a modificação da atenuação do sinal a medida que a altitude aumenta, da cidade de Belo Horizonte/MG, dos 32 níveis disponíveis.

3.2.1 Recomendação ITU-R 676-12, ITU-R P.836-6, ITU-R P.1510 e ITU-R P.835-6

A função *gaspl*, da Figura 3.8, realiza os cálculos da atenuação do sinal gasosa que tem como variáveis de entrada o comprimento do caminho, o intervalo de frequências, a temperatura, pressão atmosférica e densidade de vapor de água. As três últimas podem ser determinadas nos mapas digitais da ITU-R P.835, ITU-R P.836 e ITU-R P.1510. A instituição disponibiliza no site ¹, um arquivo compactado com código para a grade de valores para acesso aos mapas das médias mensais, de perfis verticais de temperatura, pressão atmosférica e densidade de vapor de água. Os dados da latitude e longitude tem resolução de 1,5°, para ambas as coordenadas e são armazenados em arquivos, usando o ponto flutuante IEEE 754, padrão de precisão simples (4 bytes, 32 bits) em um formato *Big-Endian*. Essa conversão é também utilizada na seção 3.1.2, do enlace Terra-Satélite.

Figura 3.8 – Função *gaspl* do software MATLAB.

```

65 - PhPa = p/100;
66 - T = Tc + 273.15; % Convert C to K
67 - theta = 300/T;
68 - e = den*T/216.7; % eq(4)
69
70 - [Svec_oxy,Fmat_oxy] = dryaircoeff(fGHz,theta,PhPa,e);
71 - [Svec_watvap,Fmat_watvap] = watvapcoeff(fGHz,theta,PhPa,e);
72
73 - d = 5.6e-4*(PhPa+e)*theta^0.8;
74 - NDdp = fGHz*PhPa*theta.^2.*(6.14e-5./(d.*(1+(fGHz./d).^2))+...
75 - 1.4e-12*PhPa*theta^1.5./(1+1.9e-5.*fGHz.^1.5));
76
77 - gammao = zeros(size(NDdp));
78 - fidx = (fGHz<=118.750343);
79 - gammao(fidx) = sum(bsxfun(@times,Svec_oxy,Fmat_oxy(:,fidx)));
80 - fiidx = 30; % pg 2
81 - gammao(~fidx) = sum(bsxfun(@times,Svec_oxy(fiidx:end),Fmat_oxy(fiidx:end,~fidx)));
82 - gammao = 0.1820*fGHz.*(gammao+NDdp);
83
84 - gammaw = sum(bsxfun(@times,Svec_watvap,Fmat_watvap));
85 - gammaw = 0.1820*fGHz.*gammaw;
86
87 - gamma = gammao + gammaw;
88
89 - end
90

```

Fonte: da autora

Para o acesso aos dados do código dos mapas digitais, foi utilizado o Algoritmo 7 e também o Algoritmo 8. Na linha 3 do Algoritmo 8, é possível obter a tabela dos 32 níveis dos valores de altitude da cidade estudada, como pode ser visto na Figura 3.9. Também é possível acessar os valores para temperatura, pressão atmosférica e densidade do vapor de água para os 32 níveis.

Os valores reais e aproximados das latitudes e longitudes da cidade de Belo Horizonte foram adicionados ao Quadro 3.11. Como já mencionado na seção 3.1, alterações dos graus,

¹ <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.835-6-201712-I/en>

minutos e segundos ocorrem variações de distância do ponto de estudo aos novos pontos estipulados para a grade. No caso dos estudos para atenuação causada pelos gases atmosféricos, foi aplicada a ferramenta de distância do Google Maps, mostado na Figura 3.10, para verificar o distanciamento do ponto desejado para o ponto estimado, que foi de aproximadamente 68 Km.

Figura 3.9 – Altitudes geradas da ITU por meio do *software MATLAB* para a cidade de Belo Horizonte

	1	2	3		1	2	3
1	766.8640	766.8640	766.8640	17	7.6815e+03	7.6835e+03	7.6894e+03
2	800.3581	800.3849	800.3430	18	8.3721e+03	8.3733e+03	8.3805e+03
3	918.4860	918.6082	918.4233	19	9.0887e+03	9.0888e+03	9.0974e+03
4	1.1284e+03	1.1286e+03	1.1282e+03	20	9.8318e+03	9.8306e+03	9.8406e+03
5	1.4113e+03	1.4116e+03	1.4110e+03	21	1.0601e+04	1.0599e+04	1.0611e+04
6	1.7532e+03	1.7536e+03	1.7528e+03	22	1.1398e+04	1.1395e+04	1.1408e+04
7	2.1436e+03	2.1439e+03	2.1430e+03	23	1.2224e+04	1.2220e+04	1.2234e+04
8	2.5742e+03	2.5744e+03	2.5737e+03	24	1.3081e+04	1.3076e+04	1.3091e+04
9	3.0389e+03	3.0390e+03	3.0387e+03	25	1.3976e+04	1.3971e+04	1.3987e+04
10	3.5332e+03	3.5336e+03	3.5338e+03	26	1.4924e+04	1.4919e+04	1.4934e+04
11	4.0537e+03	4.0546e+03	4.0556e+03	27	1.5954e+04	1.5950e+04	1.5963e+04
12	4.5988e+03	4.6003e+03	4.6020e+03	28	1.7131e+04	1.7129e+04	1.7137e+04
13	5.1679e+03	5.1698e+03	5.1721e+03	29	1.8579e+04	1.8580e+04	1.8590e+04
14	5.7603e+03	5.7626e+03	5.7656e+03	30	2.0578e+04	2.0578e+04	2.0591e+04
15	6.3762e+03	6.3787e+03	6.3826e+03	31	2.3743e+04	2.3736e+04	2.3758e+04
16	7.0163e+03	7.0188e+03	7.0235e+03	32	3.0756e+04	3.0746e+04	3.0785e+04

Fonte: da autora.

Quadro 3.11 – Valores da latitude e longitude da cidade de Belo Horizonte/MG, utilizando os mapas digitais dos gases atmosféricos, ITU-R P.835

	Latitude (°) real	Latitude (°) aprox.	Longitude (°) real	Longitude (°) aprox.
BH	-19,9344	-19,500	-43,952	-43,500

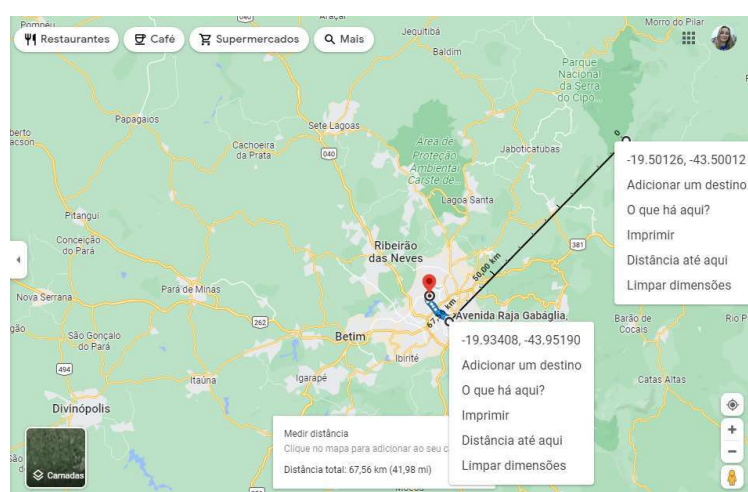
Fonte: da autora

Nota-se, na Figura 3.11, um estudo feito pela Prefeitura Belo Horizonte (2022), das variações de altitudes na cidade de Belo Horizonte. O levantamento de informações foi realizado pelo setor de Geoprocessamento da Empresa de Informática e Informação, do Município de Belo Horizonte (Prodabel) mostrou que as altitudes entre pontos no município podem ter até 800 metros de diferença de altitudes de um ponto ao outro (Prefeitura Belo Horizonte, 2022).

Por isso, ao acessar os mapas digitais da ITU-R P.836, há 32 níveis de altitudes, vistos na Figura 3.9 da tabela encontrada no *software* do MATLAB, da cidade de Belo Horizonte. Dessa forma, foi criado o Algoritmo 14 para simular as cinco altitudes, em que os dados das pressões, temperaturas e densidades de vapor de água foram adicionados ao Quadro 3.12. Também foi

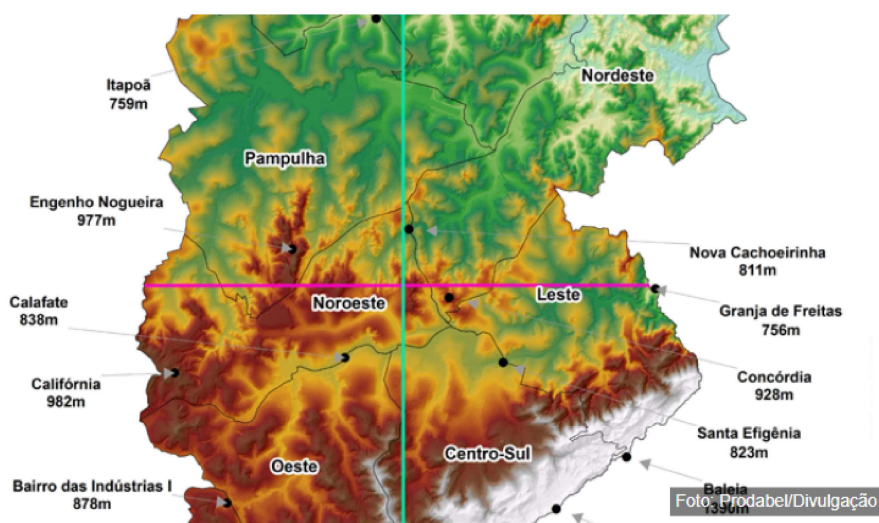
utilizada a função *gaspl* do *software* MATLAB, que tem as equações da Rec. ITU-R 676 implementadas, conforme pode ser verificado na Figura 3.8, onde na linha 77 realiza o cálculo para Atenuação Específica devido ao ar seco (oxigênio/nitrogênio) e, na linha 84, para o vapor de água. Por fim, na linha 87, faz a soma das duas atenuações e determina a atenuação dos gases atmosféricos, conforme a Equação 2.29. A reticência da linha 9 do Algoritmo 14 representa repetição para as outras 3 altitudes, já a linha 18, realiza o cálculo para as outras três grandezas que depende da altitude, sendo também uma repetição de linhas de cálculo.

Figura 3.10 – Distância entre os valores das coordenadas reais e das coordenadas aproximadas devido à conversão para a ITU.



Fonte: da autora

Figura 3.11 – Estudos sobre as altitudes da cidade de Belo Horizonte.



Fonte: adaptado de (Prefeitura Belo Horizonte, 2022)

Quadro 3.12 – Grandezas da Cidade de Belo Horizonte-MG, para diferentes valores de altitudes

Altitudes (m)	Pressões atm (hPa)	Temperaturas (k)	Densidade do vapor de água (g/m ³)
918	913,0890	293,6258	13,5408
2143,6	790,6999	285,7576	8,5162
4053,7	627,1130	276,0364	2,6068
6376,2	467,2446	262,4664	0,7781
9088,7	467,2446	243,5419	0,1553

Fonte: da autora

Algorithm 14 Gerando os gráficos para atenuação da cidade de Belo Horizonte de para diferentes altitudes

```

1: altitude1
2:  $pr_{media1} = 913.0890$ 
3:  $tk_{media1} = 293.6258$ 
4:  $vd_{media1} = 13.5408$ 
5: altitude2
6:  $pr_{media2} = 790.69990$ 
7:  $tk_{media2} = 285.7576$ 
8:  $vd_{media2} = 8.5162$ 
9: ...
10:  $T_{celsius1} = tk_{media1} - 273.15$ 
11:  $P_{Pascal1} = pr_{media1} * 100$ 
12:  $densida1 = vd_{media1}$ 
13:  $L_{gasesBH1} = \text{gaspl}(1e3, ((1:300) * 10^9), T_{celsius1}, P_{Pascal1}, densida1)$ 
14:  $T_{celsius2} = tk_{media2} - 273.15$ 
15:  $P_{Pascal2} = pr_{media2} * 100$ 
16:  $densida2 = vd_{media2}$ 
17:  $L_{gasesBH2} = \text{gaspl}(1e3, ((1:300) * 10^9), T_{celsius2}, P_{Pascal2}, densida2)$ 
18: ...
19: plota frequência por LgasesBH1 (Eixo x Freq. (GHz) e y Specific Attenuation (dB/Km))
20: legenda('918 (m)', '2143,6 (m)', '4053,7 (m)', '6376,2 (m)', '9088,7 (m)')
    =0

```

As altitudes escolhidas foram do intervalo encontrado na tabela gerada do código acessado da ITU-R P.836, de valores menores a maiores, para demonstrar que os valores de altitudes alteradas, altera-se também a pressão atmosférica, temperatura e densidade do vapor de água, acarretando mudanças na atenuação do sinal.

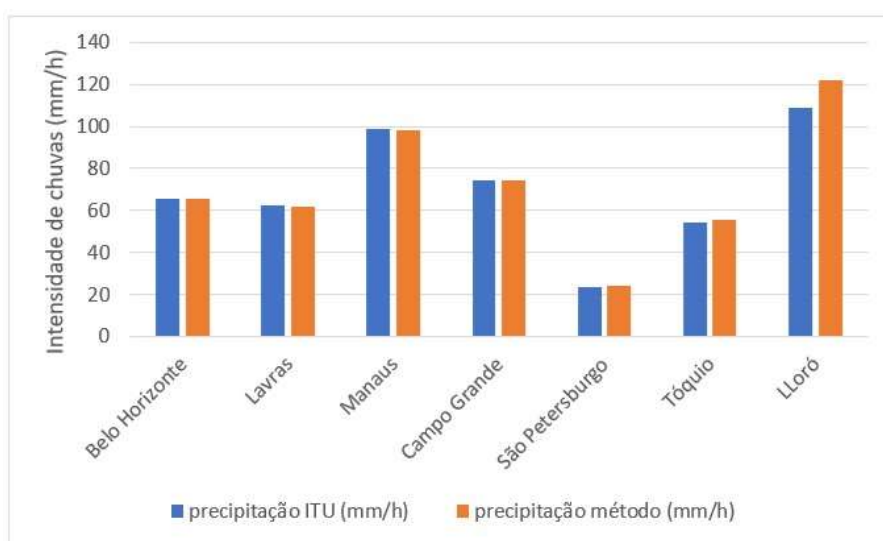
4 RESULTADOS

Os resultados alcançados são provenientes dos algoritmos criados para simulações das atenuações causadas por fenômenos atmosféricos dos enlaces Terra-Terra devido às chuvas e aos gases atmosféricos; e enlace Terra-Satélite provenientes das chuvas.

4.1 Simulações da atenuação do sinal provocada por chuvas

Para validar o método proposto de conversão das coordenadas para a grade da ITU, mencionado na seção 3.1, comparou-se os valores encontrados com os valores do grupo de estudo (SG 3) das taxas de precipitações excedidas de 0,01%, das sete cidades analisadas. Os dados foram adicionados ao Quadro 3.2, e geraram o seguinte gráfico em barras da Figura 4.1: das taxas de precipitação excedida de 0,01%.

Figura 4.1 – Taxa de precipitação excedida de 0,01% do grupo de estudo da ITU (SG 3) comparada com o método proposto, utilizando o erro relativo e os mapas digitais.



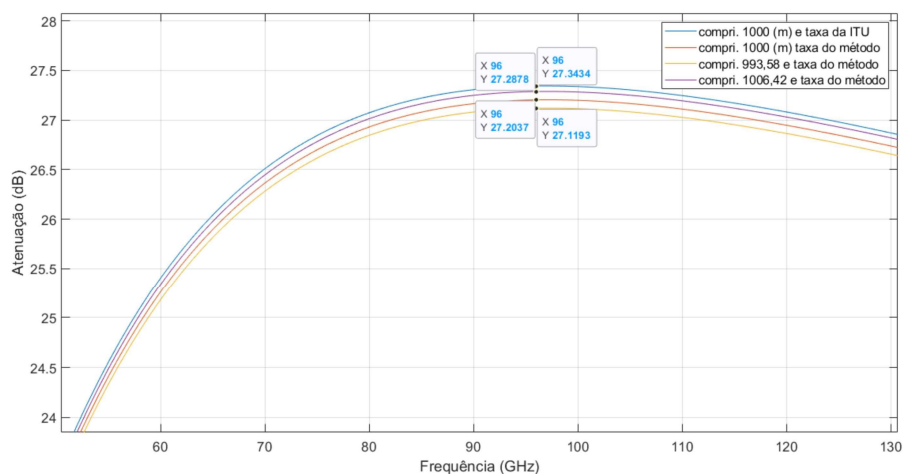
Fonte: da autora.

Note-se que os valores das taxas de precipitações são bem próximos. Isso porque como existe uma grade de valores a ser atendida, as coordenadas geográficas se alteram em poucos minutos e segundos, ocorrendo um distanciamento entre o ponto real e o aproximado proposto no método. Já o grupo de estudo, utiliza de interpolação de valores das latitudes, longitudes e taxa de precipitação excedida de 0,01%, da grade dos mapas e dos dados reais das coordenadas. Porém, se a coordenada estipulada pelo método for implementada no código do grupo de estudos, a taxa de precipitação do método tem o mesmo valor encontrado do (SG 3) da ITU.

A interpolação criada pelo grupo de estudo é proveniente de uma função, logo em casos de *software* com versões mais antigas que o ano de 2006 não seria possível rodar o código.

Perante o exposto, quando se altera a coordenada em graus, minutos e segundos, faz uma correção do comprimento do caminho, como mostrado na Figura 3.5. Assim, foi simulada a atenuação do sinal da cidade de Tóquio, proposto no Quadro 3.4, contendo os dados do grupo de estudo da ITU. Os valores encontrados pelo método proposto e as correções dos possíveis comprimentos do caminho são apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Cidade de Tóquio com a taxa de precipitação de 0,01% utilizando dados do grupo de estudo da ITU S3 e utilizando o método do erro relativo proposto com as correções de distâncias pertinentes.



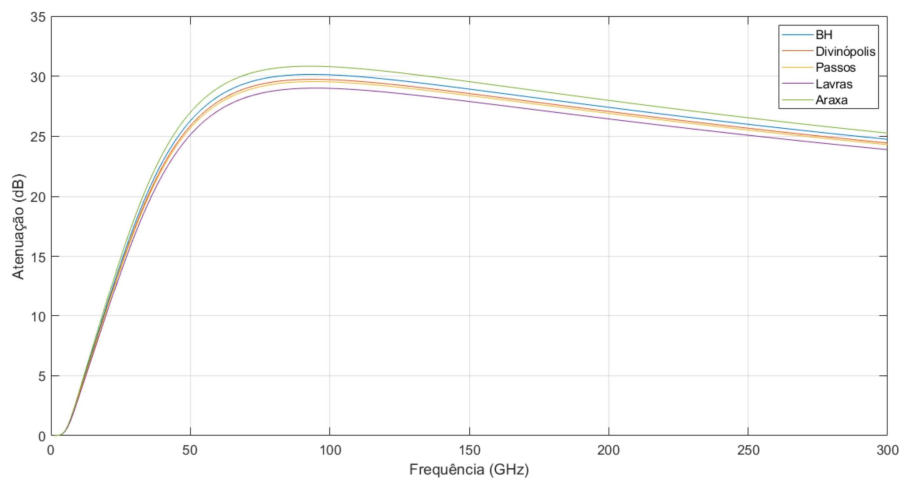
Fonte: da autora.

Verificou-se uma pequena alteração na atenuação do sinal para uso do método proposto, linha em vermelho, e o grupo de estudo da ITU, linha em azul, visto na Figura 4.2, de 0,1397 dB, utilizando o comprimento do caminho em 1Km para ambas simulações. É importante saber as coordenadas geográficas da antena proveniente do sinal para determinar o real comprimento do caminho, já que no caso onde o comprimento do caminho aumenta para 1006,42 Km, representada pela linha roxa, existe uma atenuação do sinal maior do que no caso em que houve a diminuição do comprimento do caminho para 993,58 Km, na linha amarela. Logo quando analisa-se a posição da antena em relação a coordenada inicial da cidade, é importante determinar exatamente o ponto da antena para realizar a correção do novo caminho, como mencionada na Seção 3.1, em que o valor encontrado de diferença para a distância entre os dois pontos foi de 6,42 km.

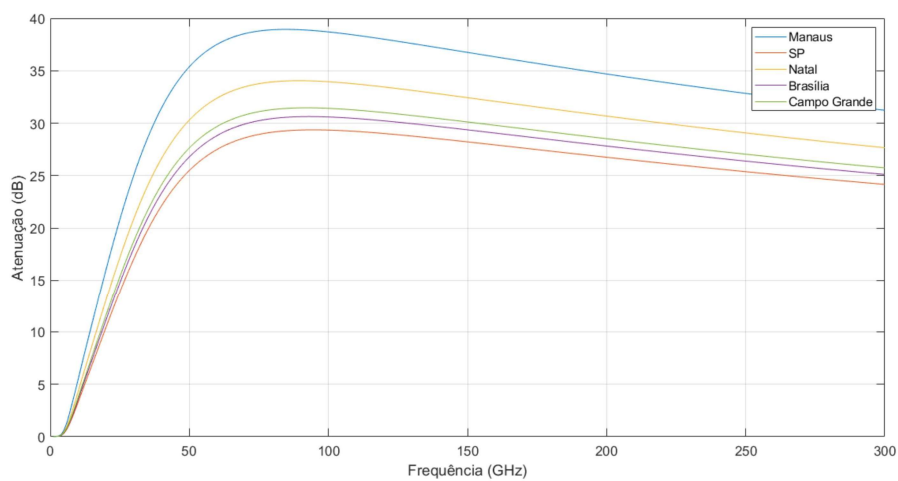
Todas as simulações apresentadas a seguir foram realizadas utilizando as taxas de precipitação obtidas pelo método proposto.

Figura 4.3 – Atenuação do sinal causada por chuvas para as 15 cidades

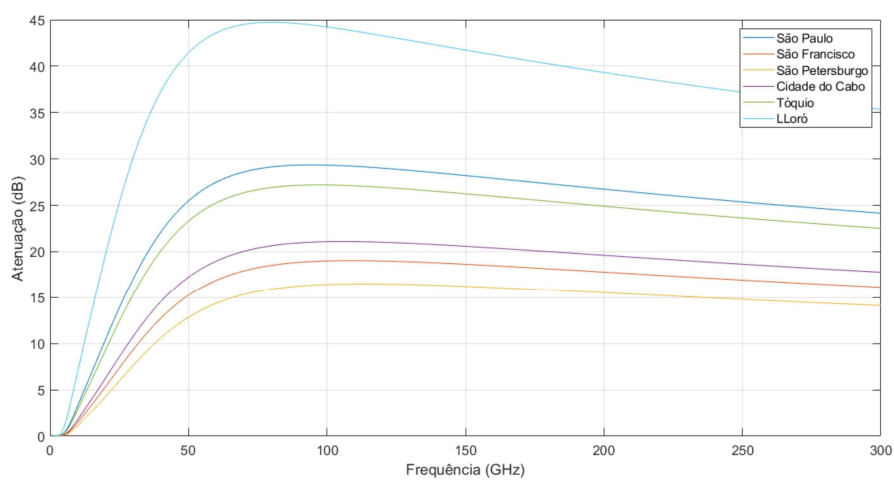
(a) ITU MINAS GERAIS



(b) ITU BRASILEIRAS



(c) ITU MUNDO



Fonte: da autora.

As cidades do estado de Minas Gerais têm baixas variações em graus nas latitudes e longitudes, logo atenuações do sinal de uma cidade em relação à outra cidade são de baixas proporções, como pode ser visto na Figura 4.3a. As divisões climatológicas acontecem por características semelhantes de relevos e vegetação que afetam diretamente na variação da chuva regional (MIRANDA, 2013). Como as taxas de precipitações nas cidades do estado de Minas Gerais, variam entre 61,4820 (mm/h) e 67,8120 (mm/h), as atenuações do sinal são crescentes proporcionalmente a essas variações.

Já a atenuação do sinal para as cidades no Brasil apresenta variações maiores do que as cidades no estado de Minas Gerais, como apresentado na Figura 4.3b, pois, as precipitações se encontram em intervalos de 62,6850 (mm/h) a 98,2680 (mm/h). Veja que a cidade com maior intensidade de chuva está mais próxima da linha do Equador, sendo a cidade de Manaus. Como mostrado por Miranda (2013), os raios solares são atingidos de forma perpendicular a regiões próximas a essa linha, existindo maior evaporação das águas e proporcionando mais precipitações. Outros fatores como biomas, vegetações e distanciamento do mar também proporcionam diferenciações nas precipitações das chuvas. Já São Paulo, é uma cidade com latitude um pouco mais afastada da linha do Equador, levando a ter menores taxas de precipitações como mencionado nos demais estudos.

Na sequência, verificou-se as atenuações dos sinais nas cidades ao redor do mundo, como demonstrado na Figura 4.3c. Elas possuem coordenadas geográficas bem distantes, com grandes variações nas zonas climatológicas. Os intervalos das precipitações são de 24,4620 (mm/h) a 123 (mm/h), sendo a menor precipitação a cidade de São Petersburgo, na Rússia, com latitude em $59,9939^\circ$, um valor significativo de distância em relação à linha do Equador, localizada na Zona Temperada, como foi estudado por Miranda (2013).

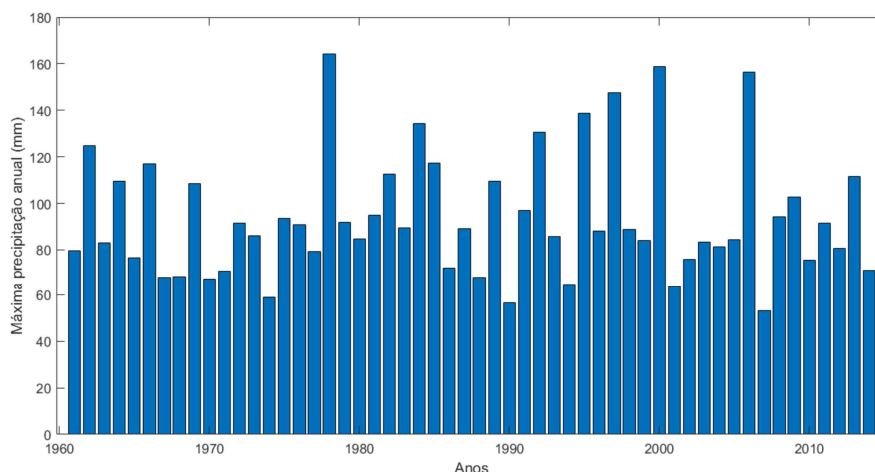
O método da distribuição de Gumbel utilizou as máximas precipitações anuais da cidade de Belo Horizonte. Esses dados podem ser vistos na Figura 4.4 representado por um gráfico em barras das máximas precipitações dos 54 anos dos valores da Estação Meteorológica do INMET.

A Figura 4.5 representa a atenuação do sinal da cidade de Belo Horizonte devido às chuvas, tanto pelo método de Gumbel, quanto pelos mapas digitais da ITU.

Como já mencionado em parágrafos anteriores, precipitações com coordenadas diferentes, alteram a precipitação do local. Assim sendo, os mapas digitais da ITU são derivados de dados da GPCC Climatology (V 2015) e European Centre of Medium-range Weather Forecast (ECMWF), e o utilizado na distribuição de Gumbel foi retirado da estação do INMET. Outro

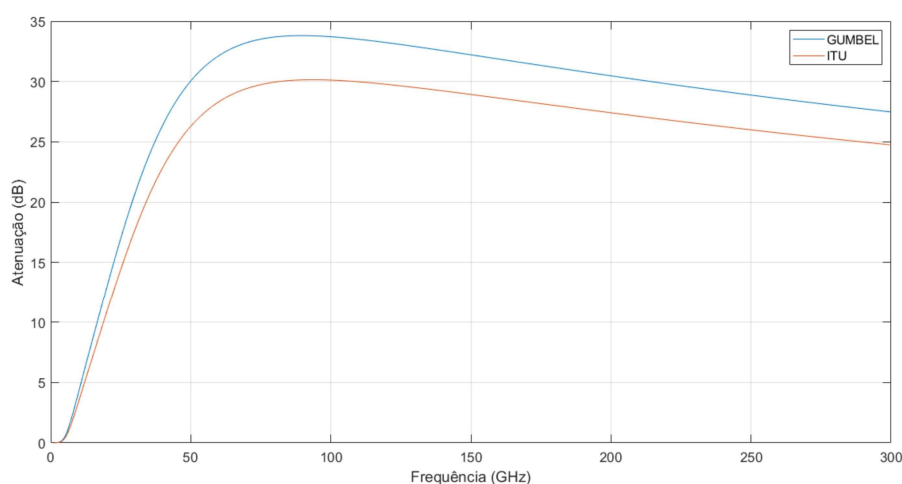
fator que altera a aproximação dos dados é a range da faixa. Os bancos da ITU (1951-2014) disponibilizaram 10 anos a mais que o do INEMET (1961-2014). Como não se tem um detalhamento na Rec. ITU-R P.837 sobre a forma como os dados são emitidos pelos seus bancos de dados, isso pode acarretar algum tipo de alteração como falha, que necessita de algum método para as devidas correções de dados faltosos.

Figura 4.4 – Máxima precipitação anual da cidade de Belo Horizonte de dados do INMETRO



Fonte: da autora.

Figura 4.5 – Atenuação do sinal causada por chuvas comparando dados de Estações locais (INMET) e ITU da cidade de Belo Horizonte.



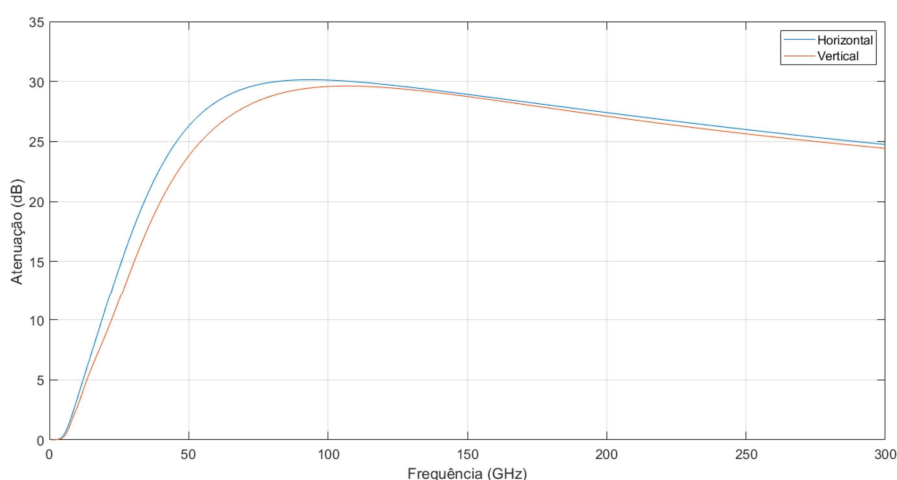
Fonte: da autora.

Quando acontece falta de dados, segundo Ogassawara e Oliveira (2017), uma forma de recompor os dados das lacunas inexistentes seria pela aplicação do método de regressão linear, obtendo o coeficiente de correlação (R) entre os dados. Ou seja, utiliza-se dados de estações vizinhas para se determinar a possível chuva daquele dia faltoso. Este poderia ser um dos

métodos, porém, como foi a recuperação de possíveis dados faltosos provenientes dos mapas da ITU, não foi especificado, assim, possíveis alterações na composição dos valores finais.

Outro estudo realizado na cidade de Belo Horizonte foi da polarização do sinal proveniente da antena. A simulação da atenuação do sinal para enlace Terra-Terra causada pelas chuvas é mostrada na Figura 4.6. Logo se nota que para polarizações horizontais, linha em azul, a atenuação é maior que para a polarização vertical, linha em vermelho.

Figura 4.6 – Polarização do sinal de radiofrequência causada por chuvas na cidade de Belo Horizonte, horizontalmente e verticalmente, utilizando dados da ITU.



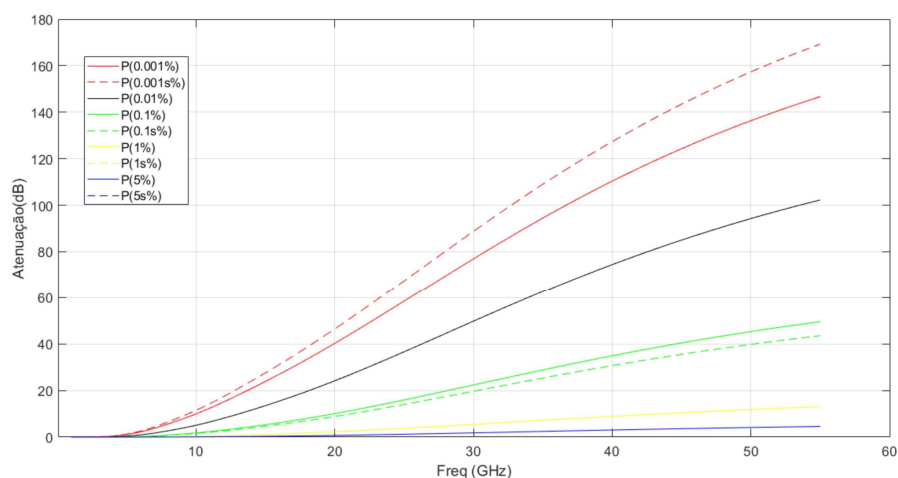
Fonte: da autora.

4.2 Atenuação do sinal causada por chuvas para enlace Terra-Satélite

Ao realizar simulações para o enlace Terra-Satélite, foi verificada a influência da atenuação do sinal nos ajustes da atenuação para diferentes porcentagens de taxa das precipitações. A Atenuação Específica neste caso utiliza a taxa de precipitação excedida de 0,01%, e recomenda-se fazer ajustes na atenuação para porcentagens diferentes, onde constata alterações no valor do β , para regiões tropicais, como pode ser visto nas Figuras 4.7 e Figura 4.8; e β igual a zero para latitudes acima do módulo de 36° como mostrado na Equação 8, em que a simulação do Algoritmo 13 a linha 14 e 15 tem mesmo valor para atenuação e pode ser verificado na Figura 4.9.

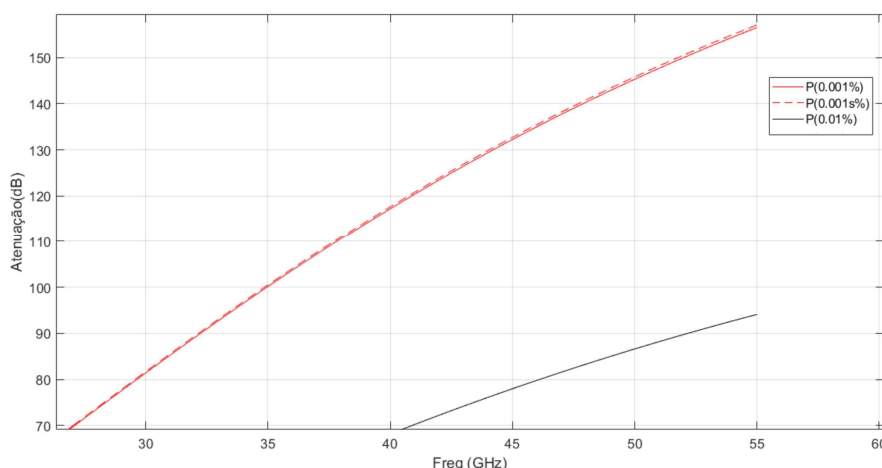
Nas simulações, as legendas representam: P(0,001%) taxa de precipitação excedida de 0,001%, com ajuste do β , e, P(0,001%*s*) sem ajuste no β . O P(0,01%), é taxa de precipitação em 0,01%, neste caso é sem o β , já que essa correção é somente para percentuais excedidos diferentes de 0,01%.

Figura 4.7 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Paulo para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β .



Fonte: da autora.

Figura 4.8 – Variação da atenuação do sinal da cidade de Tóquio para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β .

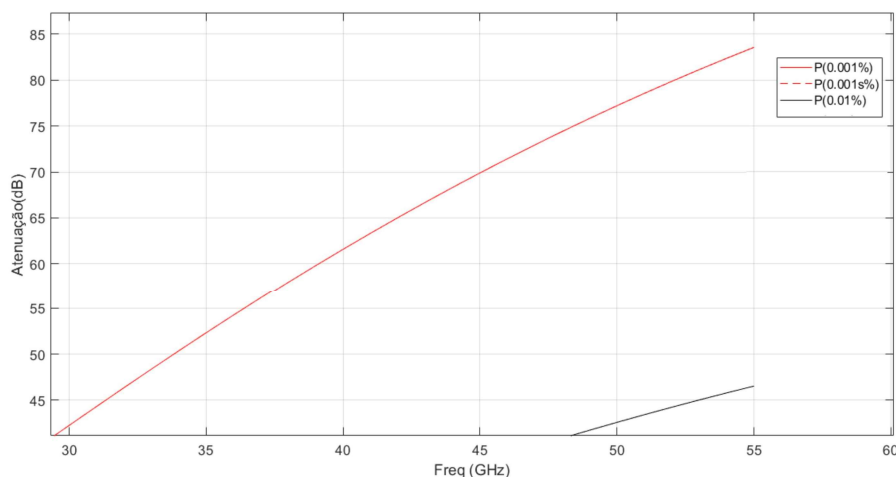


Fonte: da autora.

O estudo da variação da taxa de precipitação em um ano médio é descrito por Arruda (2008) como tempo de disponibilidade do sinal menos o tempo que a atenuação excede um valor, quando começa a prejudicar o sinal, por isso, a importância dos seus estudos para os diferentes percentuais de taxas de precipitações. Em taxa de precipitação de 0,01%, o β não tem influência sobre o valor de ajuste da Equação 2.26, pois ele é zero, o mesmo acontece para cidades com latitude acima dos 36° , como pode ser visto na Equação 8, onde ele também é zero. Porém, em casos que a latitude está abaixo do módulo desse limiar, o β tem influência significativa na atenuação do sinal. Neste caso, foi simulado no Algoritmo 13, o que aconteceria se não existissem as correções provindas do β para essas regiões nas zonas climatológicas

tropicais, vistas nas Figuras 4.7 e Figura 4.8. Sendo a primeira Figura São Paulo com latitude $-23,5489^\circ$; e a segunda a cidade de Tóquio com latitude $35,6894^\circ$. Ambas, possuem os módulos da latitude abaixo dos 36° , por isso, nota-se que não existe interseção entre as linhas contínuas e tracejadas.

Figura 4.9 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Francisco para diferentes taxas de precipitação, com e sem o β .



Fonte: da autora.

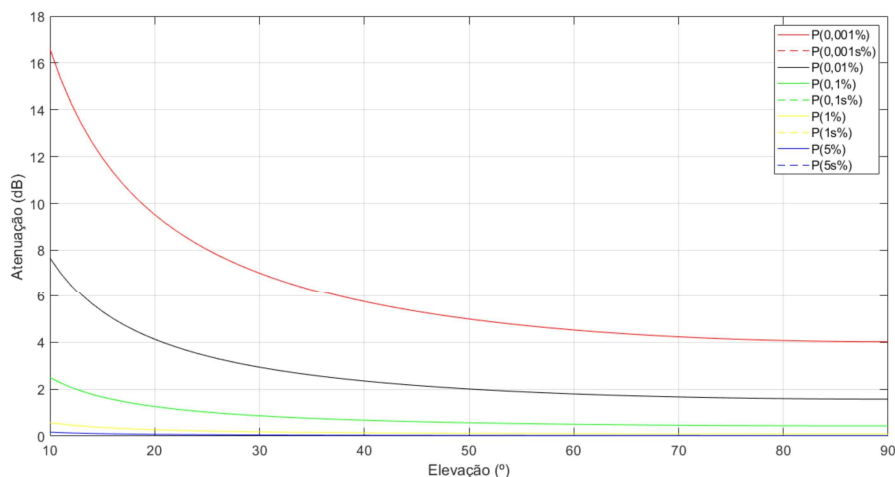
Note-se que, na Figura 4.9, a linha contínua em vermelho para $P(0,001\%)$, com o β , sobrepõem a linha tracejada $P(0,001\%s)$, sem ele. Neste caso, como a cidade simulada é São Francisco, com latitude em $37,7272^\circ$, e está localizada acima do limite máximo para variação do β , da Equação 8, logo este é zero. Assim os valores encontrados para atenuação do sinal no Quadro 4.3, com o β e sem ele, para cada taxa de precipitação é igual para essa cidade.

Baseando-se nos gráficos simulados nas Figuras 2.8a e a Figura 2.8b, usando Atenuação (dB) por ângulo de elevação. No caso do trabalho o autor Scheiblauer (2017) simulou a cidade de Munique, latitude em $48,1369^\circ$, variou-se o ângulo de elevação de 10° a 90° , para diferentes taxas de precipitação, porém, o autor não se atentou para a influência do β , na Equação 2.26, pois o mesmo era zero. A Figura 4.10 mostra as devidas correções para as atenuações em taxas de precipitações diferentes de $0,01\%$ da cidade de São Petersburgo em função do ângulo de elevação, provindas da Equação 2.26 deste trabalho.

Já a Cidade do Cabo, simulada com variação do ângulo de elevação entre 10° e 90° , mostrada na Figura 4.11, o β causa mudanças na atenuação do sinal. O módulo da latitude da cidade é de $33,925^\circ$, estando localizado abaixo dos 36° . Neste caso, sofre variação da atenuação do sinal em função do β na Equação 2.26, a linha tracejada representa a equação sem o β e a

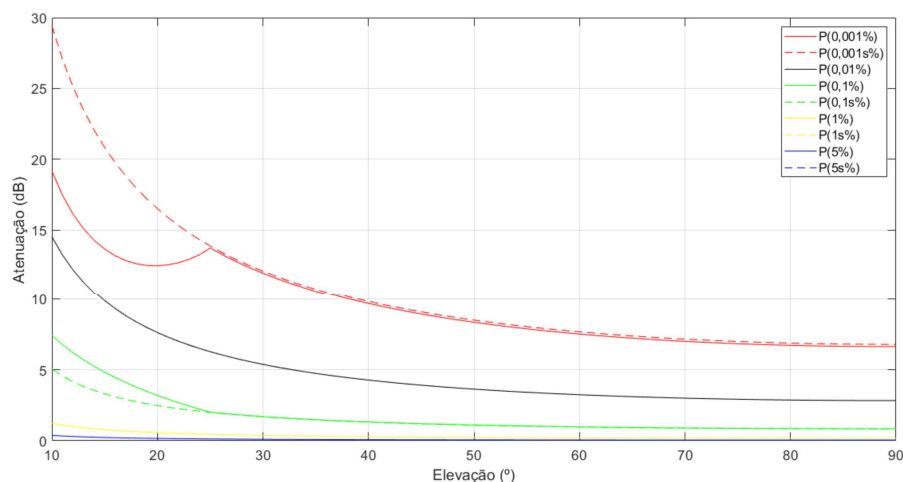
linha contínua com a influência do β . Entre os ângulos 10° e 25° o β varia conforme o terceiro item da Equação 8, depois dos 25° o β já varia conforme o item dois da mesma equação.

Figura 4.10 – Variação da atenuação do sinal da cidade de São Petersburgo para diferentes taxas de precipitação, para variação do ângulo de elevação em 10 GHz.



Fonte: da autora.

Figura 4.11 – Variação da atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes taxas de precipitação para variação do ângulo de elevação em 10 GHz.



Fonte: da autora.

A atenuação em dB da influência do β , em função das variações das frequências foi adicionada aos Quadros 4.1 e 4.2. Veja que mesmo as cidades estando em hemisférios diferentes sofrem influência do β . A cidade de São Paulo ainda mais, com latitude um pouco mais afastada desse limiar de 36° . Isso se dá, pois, ao comparar os mapas da taxa de precipitação da ITU, mostrado na Figura 2.4, com os mapas das zonas climatológicas, visto na Figura 2.5, advêm que, as regiões mais avermelhadas da ITU, assemelham-se aos mapas das Zonas Climatológicas.

Logo, ao analisar os Quadros 4.1, 4.2 e 4.3, as atenuações providas da cidade de São Paulo têm variação de atenuação maior na taxa de precipitação em 0,001% sem o β , e menor com ele. Porém, para taxas de 0,1% o valor com β é um pouco maior do que sem ele. As atenuações nas taxas de 1% e 5% são os mesmos para o β e sem, já que de acordo com a Equação 8, em taxas de precipitações maiores e igual a 1%, o β é zero. A mesma característica é verificada em Tóquio, porém como é uma cidade com módulo da latitude de 35,6894°, próxima ao limiar do módulo de 36°, a variação da atenuação para taxas diferentes da padrão (0,01%) e menor que 1%, tem variações menores do que 1 dB entre os valores com o β e sem ele, visto no Quadro 4.2. Já a cidade de São Francisco com módulo da latitude em 37,6894°, está acima do módulo do limiar de 36°, logo os valores da atenuação do sinal para as taxas menores que 1%, tem interseção para simulação com o β e sem ele para a mesma taxa.

Quadro 4.1 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em São Paulo na frequência de 55GHz

taxa de precip.	0,001%	0,01%	0,1%	1%	5%
com beta	146,77 dB	-	49,55 dB	13,07 dB	4,58 dB
sem beta	169,27 dB	102,28 dB	43,55 dB	13,07 dB	4,58 dB

Fonte: da autora

Quadro 4.2 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em Tóquio na frequência de 55GHz

taxa de precip.	0,001%	0,01%	0,1%	1%	5%
com beta	156,53 dB	-	39,85 dB	11,82 dB	4,11 dB
sem beta	157,09 dB	94,10 dB	39,73 dB	11,82 dB	4,11 dB

Fonte: da autora

Quadro 4.3 – Atenuação do sinal causada por chuvas para taxas de precipitação diferentes em São Francisco.

taxa de precip.	0,001%	0,01%	0,1%	1%	5%
com beta	83,57 dB	-	18,26 dB	5,05 dB	1,67 dB
sem beta	83,57 dB	46,54 dB	18,26 dB	5,05 dB	1,67 dB

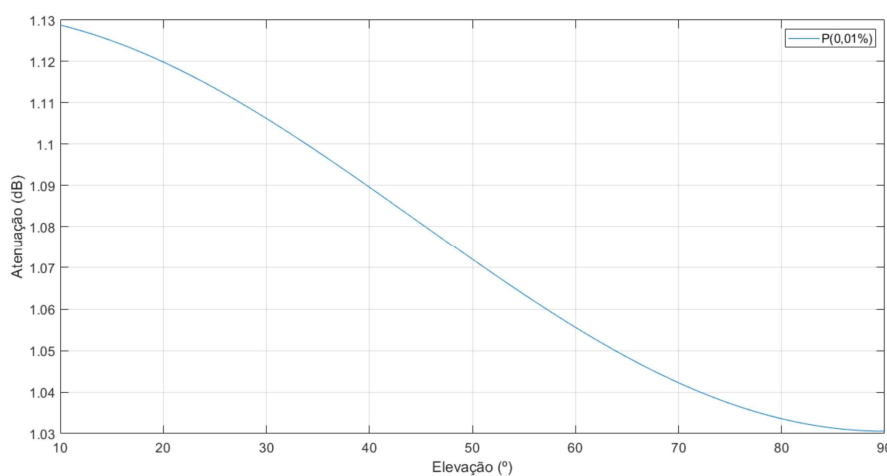
Fonte: da autora.

Como informado anteriormente, regiões com maior índice de precipitações são de clima tropical, os autores Mello e Pontes (2012) indicam que, na Rec. ITU-R 618, o mesmo resultado é obtido da atenuação do sinal para dois locais que tenham a mesma taxa de precipitação excedida de 0,01%, independente se as distribuições de chuvas dos mesmo coincidirem apenas neste ponto e não para outras taxas de precipitações. Porém, como demonstrado nos resultados, se os

locais estiverem dentro do intervalo do módulo de latitude, hemisféricos Norte e Sul menor que 36° , é falso, pois existem variações no valor do β conforme a latitude da estação terrestre varia. Para regiões acima desse valor de latitude a afirmação é correta, porém as precipitações são de características diferentes, já que se encontram em climas diferentes.

Se compararmos o comportamento causado pela variação do ângulo de elevação para os dois enlaces: Terra-Terra, mostrado na Figura 4.12, e, Terra-Satélite, visto na Figura 4.10 provindo das chuvas, nota-se que o comportamento é o mesmo, já que a Atenuação Específica utilizada nos dois casos é a mesma, e seus coeficientes k e α também não se alteram. A única correção que acontece é o comprimento efetivo do caminho, em cada caso, proporcionando então uma atenuação maior do sinal no enlace Terra-Satélite. Em casos de a taxa de precipitação ter percentuais diferentes de 0,01%, o valor da Atenuação Específica do enlace Terra-Terra se altera, mas no enlace Terra-Satélite não.

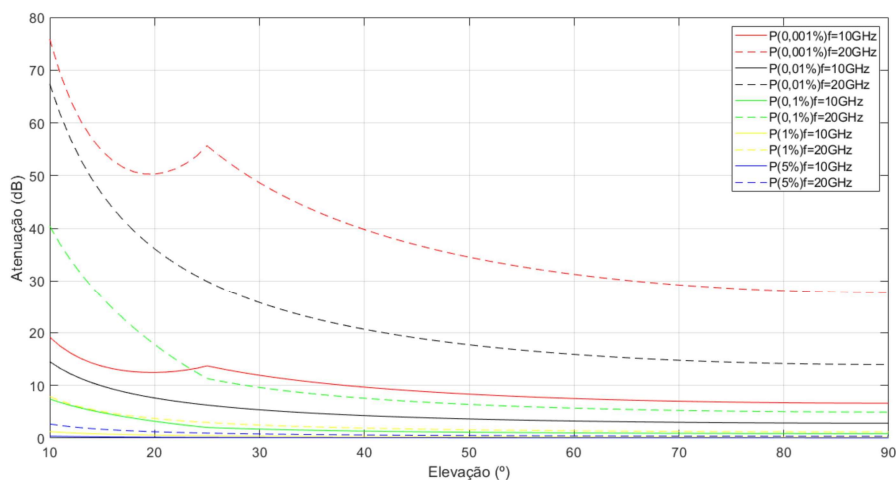
Figura 4.12 – Atenuação do sinal causada pelo enlace Terra-Terra para a cidade de São Petersburgo para variação do ângulo de elevação em 10GHz.



Fonte: da autora.

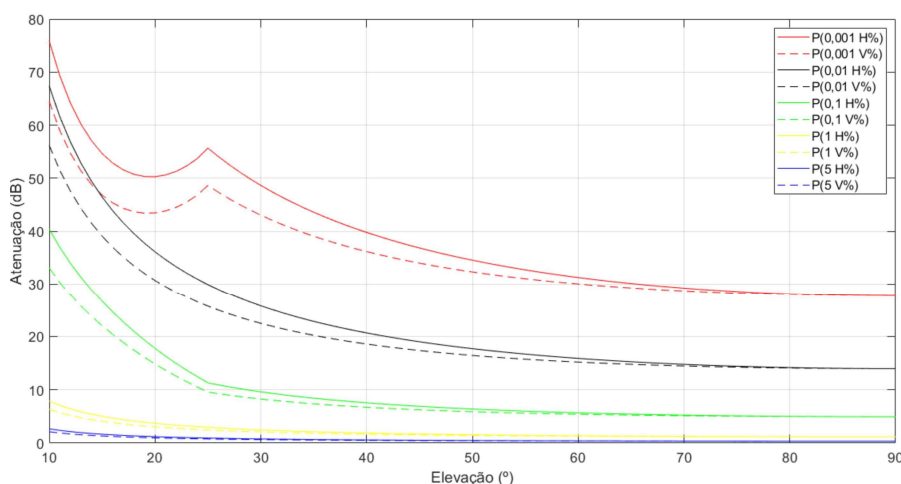
Mais dois estudos para a variação do ângulo de elevação entre 10° e 90° são realizados neste tipo de enlace. O primeiro caso é a variação das frequências de 10 GHz e 20 GHz, na Cidade do Cabo, África do Sul. À medida que se aumenta as frequências, proporcionalmente aumenta a atenuação do sinal, como mostrado na Figura 4.13. Segundo caso é a variação da polarização do sinal, onde polarizações horizontais causam maiores atenuações do que verticais, como pode ser verificado na Figura 4.14. Isso também foi estudado por Shaye et al. (2018). O mesmo comportamento acontece no enlace Terra-Terra.

Figura 4.13 – Variação da atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes taxas precipitação, variando o ângulo de elevação de 10° a 90°, em frequências de 10 GHz e 20 GHz.



Fonte: da autora.

Figura 4.14 – Atenuação do sinal da Cidade do Cabo para diferentes em 20 GHz para polarização horizontal e vertical.



Fonte: da autora.

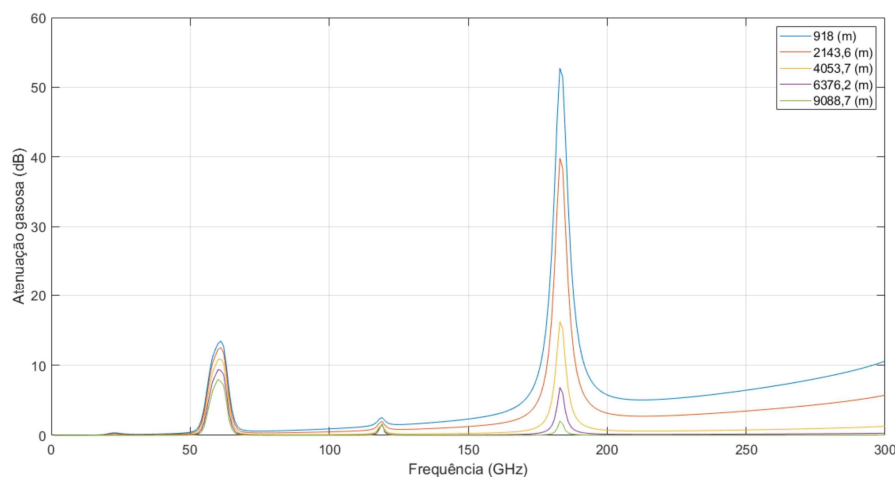
4.3 Atenuação do sinal devido aos gases atmosféricos

A atenuação causada pelos gases atmosféricos pode ser visualizada na Figura 4.15. Como mostrado na Figura 3.11, a cidade de Belo horizonte pode ter várias altitudes diferentes em uma mesma latitude e longitude. A pressão atmosférica tem valor padrão de 1013,25 hPa, porém, à medida que sobe em altitude, a atenuação do sinal diminui.

Ao analisar o Quadro 3.12, nota-se uma diminuição da pressão atmosférica à medida que a altitude aumenta. Também pode-se observar que a diminuição da densidade do vapor de água é diretamente proporcional à pressão atmosférica. Isso porque como a densidade de água

em razão do ar seco diminuir, as partículas de ar se desprendem e ocorre uma menor compressão das ligações atômicas, reduzindo a atenuação do sinal.

Figura 4.15 – Atenuação causada por gases atmosféricos na cidade de Belo Horizonte variando a altitude, dados dos mapas digitais da ITU.



Fonte: da autora

Como mencionado na seção 2.2.2.1, o oxigênio que tem maiores linhas de absorção em aproximadamente na frequência de 60 GHz. Isso acontece devido às linhas de absorção do oxigênio se fundirem nas pressões ao nível do mar. Logo se nota um pico bem elevado de atenuação do sinal próximo a essa frequência. Um pico menor em 118 GHz, onde se tem atenuação provinda pelo nitrogênio, conforme pode ser verificada na (ITU-R, 2019) e, por fim, uma atenuação ainda maior em 183 GHz devido ao vapor de água.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram estudadas diferentes recomendações da União Internacional de Telecomunicações (ITU), com o objetivo de facilitar sua utilização, para tanto, foi proposta a elaboração de fluxogramas. Para o estudo das grandezas físicas como: intensidade de chuvas, temperaturas, pressão e densidade de vapor de água, as recomendações indicam utilização de dados locais de estações meteorológicas ou mapas digitais. Para o acesso aos dados dos mapas, criou-se códigos de aproximações de valores para as coordenadas geográficas, latitude e longitude, já que elas possuem passo de grades nos seus intervalos.

O trabalho apresenta um comparativo da atenuação do sinal causada pelas chuvas em enlace Terra-Terra, de dados provindos dos dois meios, dados locais e mapas digitais para as taxas de precipitações. Na primeira análise, foi utilizado o método de distribuição Gumbel para determinar a intensidade de chuvas da cidade de Belo Horizonte/MG, considerando as máximas precipitações anuais. Já na outra análise, utilizou-se a Rec. ITU-R P.837 para uso dos mapas digitais. Tais estudos, são benéficos pois proporcionam uma melhor previsão de atenuação do sinal em caso das estações locais, porém, como em muitos casos, não têm a disponibilidade de estações próximas aos pontos de estudos, por isso, os mapas das taxas de precipitações excedidas de 0,01% da ITU, podem ser eficazes para obtenção dos dados.

Os resultados provenientes dos valores aproximados das taxas de precipitações do método proposto neste trabalho foram comparados com valores do trabalho do grupo de estudo (SG 3) da ITU, e mostraram-se eficientes, já que os erros relativos das taxas que excedem 0,01% foram baixos, sendo o maior deles, na cidade de Lloró, de 1,06%. Porém, ainda se faz necessária a correção do comprimento do caminho para o novo ponto das coordenadas geográficas antes de estipular a atenuação do sinal em relação a antena. A importância do método proposto é que os mapas digitais poderão ser acessados por qualquer estudo utilizando outra linguagem de programação, que não seja apenas MATLAB, pois o código disponibilizado pelo SG 3 serve apenas a esse tipo de linguagem de programação. E em casos de versões mais antigas do que 2006 do MATLAB, o código do grupo de estudo causaria erro, devido a função de interpolação ser configurada apenas para versões acima desta data.

As respostas dos gráficos simulados da atenuação do sinal provindas das chuvas para enlace Terra-Terra mostram a importância de determinar a coordenada geográfica, considerando que as diversidades nas coordenadas geográficas geram precipitações diferentes e, conseqüentemente, atenuações maiores ou menores. Além disso, altitudes crescentes acima do nível do mar

são propulsoras de atenuações de sinais de radiofrequência providas do oxigênio, nitrogênio e vapor de água.

Quando se trata de climas tropicais, algumas características devem ser levadas em consideração. Os estudos mostram a interferência que o β efetua para porcentagem de taxas de precipitações diferentes de 0,01%. Em cidades entre os Trópicos, a atenuação do sinal deve ser corrigida para as taxas entre 0,001% e 5%, onde a Atenuação Específica é calculada em função da precipitação de 0,01%, porém, um ajuste é realizado para valores diferentes dessa porcentagem de taxa, em latitudes com módulos menores que 36° .

Diante do exposto, os estudos para a atenuação de sinais causados por fenômenos atmosféricos possibilitam oportunidades de prevenção da atenuação naquele ponto. Além disso, poderão sugerir um local diferente para as antenas emissoras ou receptores dos sinais.

Logo, algumas sugestões de trabalhos futuros são propostas como: correção da curva de atenuação do sinal devido à função $rainpl$, que em frequências maiores tendem a diminuir a atenuação do sinal em vez de estabilizá-las. Outra sugestão seria para enlace o Terra-Satélite para caminhos inclinados causados pelos gases atmosféricos, bem como estudo sobre os fenômenos atmosféricos em simuladores de redes. Também há que se considerar o estudo da atenuação do sinal devido ao ângulo de elevação menor que 5° , que necessitaria do Raio da Terra para as degradações dos sinais providas das chuvas no enlace Terra-Satélite.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, A. et al. Evolution of mobile communication technology towards 5g networks and challenges. **American Journal of Electrical and Electronic Engineering**, v. 7, n. 2, p. 34–37, 2019.
- ALHASANI, M. M. et al. A novel four single-sideband m-qam modulation scheme using a shadow equalizer for mimo system toward 5g communications. **Sensors**, v. 19, n. 8, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1944>>.
- ARRUDA, B. A. de. **Estudo comparativo das técnicas para cálculo de atenuação devido à chuva**. 136 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- AVETISYAN, H.; HOLUB, J. Subjective speech quality measurement with and without parallel task: Laboratory test results comparison. **PLoS One**, v. 13, n. 7, 2018. Disponível em: <<https://www-proquest.ez26.periodicos.capes.gov.br/scholarly-journals/subjective-speech-quality-measurement-with/docview/2063253727/se-2?accountid=26628>>.
- AZEVEDO, L. O. A. et al. Revisitando o experimento de eratóstenes: medida do raio de terra. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, p. e20210354, 2022.
- CASTRO CAMILA NASCIMENTO PADILHA SILVA, A. S. Ana Letícia Pilz de. Curvas intensidade-duração-frequência das precipitações extremas para o município de cuiabá (mt). **Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 7, n. 2, p. 305–315, 2011.
- CHEN, X.; MACHO, A.; HORCHE, P. Performance evaluation of 100 and 200 gb/s wdm pm-qpsk transmission systems: tolerance analysis to the optical link impairments according to the optical carrier shape. **Optical Review** 2018, v. 25, p. 663–677, October 2018. Disponível em: <<https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10043-018-0463-y>>.
- COSTA, J. R. V. **Solstício de inverno**. 2015. Url<https://www.zenite.nu/solsticio-de-inverno>.
- DIAS, W. D. et al. Evaluation of rain attenuation models in satellite links under tropical and equatorial climates. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 2, p. 358–367, 2018.
- DIMCE, S. **Channel Characterization in 60 GHz**. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Paderborn University, Germany, 2019.
- FETTWEIS, G.; ALAMOUTI, S. 5g: Personal mobile internet beyond what cellular did to telephony. in **IEEE Communications Magazine**, v. 52, p. 140–145, February 2014.
- FOUKAS, X. et al. Network slicing in 5g: Survey and challenges. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, p. 94–100, 2017.
- GARCIA, N. A. P. **Modelamento de efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-Ponto e Ponto-Multiponto**. Tese (Tese de doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, 2003.
- GHANIM, M. et al. Rain attenuation statistics over 5g millimetre wave links in malaysia. In: **2018 5th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 266–269.

GIORDANI, M. et al. Toward 6g networks: Use cases and technologies. **IEEE Communications Magazine**, v. 58, n. 3, p. 55–61, 2020.

INMET. **Banco de Dados Meteorológico do INMETRO**. 2021. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>.

KANSAL, A.; SINGH, K.; SAXENA, R. Performance analysis of frft based ofdm system with 1024-psk and 1024-qam modulation under various wireless fading channels. **Int J Syst Assur Eng Manag**, v. 8, p. 137–145, 2017. Disponível em: <<https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13198-014-0297-3>>.

KORAI, U. A.; LUINI, L.; NEBULONI, R. Model for the prediction of rain attenuation affecting free space optical links. **Electronics**, v. 7, n. 12, 2018. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/7/12/407>>.

LETAIEF, K. B. et al. The roadmap to 6g: Ai empowered wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 57, n. 8, p. 84–90, 2019.

LI, H.-Y. et al. Analyses on the altitude variation of radiation contributions for submillimeter channel sets. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 178, p. 58–65, 2018.

MELLO, L. da S.; PONTES, M. S. Unified method for the prediction of rain attenuation in satellite and terrestrial links. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications [online]**, v. 11, p. 01–14, 2012.

MIRANDA, R. A. C. de. **Climatologia geográfica**. Rio de Janeiro:: Fundação Cecierj, 2013. v. 2. 240 p.

NUNES, R. D. **Algoritmo para melhorar o desempenho de uma métrica não intrusiva de qualidade de voz**. 70 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

OGASSAWARA, J. F.; OLIVEIRA, L. J. C. Determinação das curvas de intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para itaquí-rs. In: . Florianópolis: [s.n.], 2017. p. 1–8.

PENA, R. A. **Paralelos e meridianos**. 2022. [Urlhttps://brasilescola.uol.com.br/geografia/paralelos-meridianos.htm](https://brasilescola.uol.com.br/geografia/paralelos-meridianos.htm).

PEREIRA, D. C.; DUARTE, L. R.; SARMENTO, A. P. Determinação da curva de intensidade, duração e frequência do município de ipameri - goiás. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civi**, v. 13, n. 2, p. 233–246, 2017.

PEREIRA, F. V. C. G. S. Avaliação da distribuição de gumbel na determinação de vazões mínimas da sub-bacia do rio negro. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 11–16, 2018.

PIAU, D. de B. **Projeto de dimensionamento de enlace de rádio associado a atenuação devido à chuva utilizando CELPLAN e PATHLOSS**. 146 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, 2013.

POPOVSKI, P. et al. 5g wireless network slicing for embb, urlhc, and mmhc: A communication-theoretic view. **IEEE Access**, v. 6, p. 55765–55779, 2018.

Prefeitura Belo Horizonte. **Estudo realiza medição de altitudes em Belo Horizonte**. 2022. Access date: 20 nov. 2017. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/estudo-realiza-medicao-de-altitudes-em-belo-horizonte>>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.838 : Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. Genebra, 2005. 8 p. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838/en>>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.618 : Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems**. Geneva, 2007. 28 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-13-201712-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.839: Rain height model for prediction methods**. Geneva, 2013. 3 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.839-4-201309-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.1510: Mean surface temperature**. Geneva, 2017. 5 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1510-1-201706-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.836-6: Water vapour: surface density and total columnar content**. Geneva, 2017. 7 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.836-6-201712-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.837-7: Characteristics of precipitation for propagation modelling**. Genebra, 2017. 8 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.837-7-201706-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.676 : Attenuation by atmospheric gases and related effects**. Genebra, 2019. 33 p. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-12-201908-I!!PDF-E.pdf>.

RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **P.530 : Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems**. Geneva, 2021. 59 p. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-18-202109-I/en>>.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações Sem Fio: Princípios E Práticas**. 2 ed.. ed. São Paulo: Pearson, 2009. (serie).

RIBEIRO, A. G. **Comprimento da Circunferência e Área de um Círculo**. 2022. Url<https://brasilecola.uol.com.br/matematica/comprimento-area-circunferencia.htm>.

RIVA, C. et al. The challenge of using the w band in satellite communication. **International Journal of Satellite Communications and Networking**, v. 32, n. 3, p. 187–200, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sat.1050>>.

SABINO, M. **Intensidade-duração-frequência de precipitação máxima em Mato Grosso**. 67 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá - MT, 2018.

- SABU, S. et al. Effect of rainfall on cellular signal strength: A study on the variation of rssi at user end of smartphone during rainfall. **2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)**, p. 1–4, 2017.
- SAMAD, M. A.; DIBA, F. D.; CHOI, D.-Y. A survey of rain attenuation prediction models for terrestrial links—current research challenges and state-of-the-art. **Sensors**, v. 21, n. 4, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1207>>.
- SCHEIBLAUER, S. **W-band for CubeSat Applications**. Dissertação (Masterarbeit) — Technische Universität München, Völs, 2017.
- SHARMA, P. Evolution of mobile wireless communication networks-1g to 5g as well as future prospective of next generation communication network. **International Journal of Computer Science and Mobile Computing**, v. 2, n. 8,, p. 47–53, 2013. ISSN 2320–088X.
- SHAYEA, I. et al. Real measurement study for rain rate and rain attenuation conducted over 26 ghz microwave 5g link system in malaysia. **IEEE Access**, v. 6, p. 19044–19064, 2018.
- SHEIKH, J. et al. Blind digital speech watermarking using filter bank multicarrier modulation for 5g and iot driven networks. **International Journal Speech Technology 21**, p. 715–722, 2018. Disponível em: <<https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s10772-018-9541-6>>.
- SILVA, M. J. da; BEGAZO, D. C.; RODRÍGUEZ, D. Z. Evaluation of speech quality degradation due to atmospheric phenomena. In: **2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- SILVA, M. J. da et al. Speech quality classifier model based on dbn that considers atmospheric phenomena. **JOURNAL OF COMMUNICATIONS SOFTWARE AND SYSTEMS**, v. 11, n. 16, p. 75–84, MARCH 2020. Disponível em: <<https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss.v16i1.1033/>>.
- SILVA, M. M. da; DINIS, R. A simplified massive mimo implemented with pre or post-processing. **Physical Communication**, v. 25, p. 355–362, 2017. ISSN 1874-4907. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187449071630218X>>.
- SILVA, M. M. da; DINIS, R.; GUERREIRO, J. A low complexity channel estimation and detection for massive mimo using sc-fde. **Telecom**, v. 1, n. 1, p. 3–17, 2020. ISSN 2673-4001. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4001/1/1/2>>.
- SILVEIRA, F. L. da. A física no salto recorde de felix baumgartner. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, p. 2306–2306/6, 2015.
- SILVEIRA, S. C. R. e M. A evolução do sistema da tecnologia de telefonia móvel como geradora de comunicação ubíqua e pervasiva. In: **Anais do V SINGEP (Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade)**. São Paulo-SP: [s.n.], 2016. v. 9, p. 16–29.
- SOUSA, J. M. de. **Avaliação do Índice de Qualidade de Voz em Redes Móveis Celulares Baseada na Percepção dos Usuários**. 83 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011.

TENG, C.-C. et al. End-to-end service assurance in 5g crosshaul networks. In: **2020 21st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)**. [S.l.: s.n.], 2020. p. 306–309.

VIEIRA, S. T. **Ferramenta para análise da cobertura de redes móveis de propagação**. 90 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

VISWANATHAN, H.; MOGENSEN, P. E. Communications in the 6g era. **IEEE Access**, v. 8, p. 57063–57074, 2020.

VORA, L. J. Evolution of mobile generation technology: 1g to 5g and review of upcoming wireless technology 5g. **Int. J. of Modern Trends in Engineer. and Research**, v. 2, n. 10, p. 281–290, 2015.

WINKEL, B.; JESSNER, A. Spectrum management and compatibility studies with python. **Advances in Radio Science**, v. 16, p. 177–195, 2018.

Anexo 1

Tabela 1 – Coeficientes para kH

j	aj	bj	cj	mk	k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

Fonte: (ITU-R, 2005)

Tabela 2 – Coeficientes para kV

j	aj	bj	cj	mk	k
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

Fonte: (ITU-R, 2005)

Tabela 3 – Coeficientes para αH

j	aj	bj	cj	m_α	c_α
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

Fonte: (ITU-R, 2005)

Tabela 4 – Coeficientes para αV

j	aj	bj	cj	m_α	c_α
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

Fonte: (ITU-R, 2005)

Tabela 5 – Dados espectroscópicos para atenuação de oxigênio

<i>f0</i>	<i>a1</i>	<i>a2</i>	<i>a3</i>	<i>a4</i>	<i>a5</i>	<i>a6</i>
50.474214	0.975	9.651	6.690	0.0	2.566	6.850
50.987745	2.529	8.653	7.170	0.0	2.246	6.800
51.503360	6.193	7.709	7.640	0.0	1.947	6.729
52.021429	14.320	6.819	8.110	0.0	1.667	6.640
52.542418	31.240	5.983	8.580	0.0	1.388	6.526
53.066934	64.290	5.201	9.060	0.0	1.349	6.206
53.595775	124.600	4.474	9.550	0.0	2.227	5.085
54.130025	227.300	3.800	9.960	0.0	3.170	3.750
54.671180	389.700	3.182	10.370	0.0	3.558	2.654
55.221384	627.100	2.618	10.890	0.0	2.560	2.952
55.783815	945.300	2.109	11.340	0.0	-1.172	6.135
56.264774	543.400	0.014	17.030	0.0	3.525	-0.978
56.363399	1331.800	1.654	11.890	0.0	-2.378	6.547
56.968211	1746.600	1.255	12.230	0.0	-3.545	6.451
57.612486	2120.100	0.910	12.620	0.0	-5.416	6.056
58.323877	2363.700	0.621	12.950	0.0	-1.932	0.436
58.446588	1442.100	0.083	14.910	0.0	6.768	-1.273
59.164204	2379.900	0.387	13.530	0.0	-6.561	2.309
59.590983	2090.700	0.207	14.080	0.0	6.957	-0.776
60.306056	2103.400	0.207	14.150	0.0	-6.395	0.699
60.434778	2438.000	0.386	13.390	0.0	6.342	-2.825
61.150562	2479.500	0.621	12.920	0.0	1.014	-0.584
61.800158	2275.900	0.910	12.630	0.0	5.014	-6.619
62.411220	1915.400	1.255	12.170	0.0	3.029	-6.759
62.486253	1503.000	0.083	15.130	0.0	-4.499	0.844
62.997984	1490.200	1.654	11.740	0.0	1.856	-6.675
63.568526	1078.000	2.108	11.340	0.0	0.658	-6.139
64.127775	728.700	2.617	10.880	0.0	-3.036	-2.895
64.678910	461.300	3.181	10.380	0.0	-3.968	-2.590
65.224078	274.000	3.800	9.960	0.0	-3.528	-3.680
65.764779	153.000	4.473	9.550	0.0	-2.548	-5.002
66.302096	80.400	5.200	9.060	0.0	-1.660	-6.091
66.836834	39.800	5.982	8.580	0.0	-1.680	-6.393
67.369601	18.560	6.818	8.110	0.0	-1.956	-6.475
67.900868	8.172	7.708	7.640	0.0	-2.216	-6.545
68.431006	3.397	8.652	7.170	0.0	-2.492	-6.600
68.960312	1.334	9.650	6.690	0.0	-2.773	-6.650
118.750334	940.300	0.010	16.640	0.0	-0.439	0.079
368.498246	67.400	0.048	16.400	0.0	0.000	0.000
424.763020	637.700	0.044	16.400	0.0	0.000	0.000
487.249273	237.400	0.049	16.000	0.0	0.000	0.000
715.392902	98.100	0.145	16.000	0.0	0.000	0.000
773.839490	572.300	0.141	16.200	0.0	0.000	0.000
834.145546	183.100	0.145	14.700	0.0	0.000	0.000

Fonte: (ITU-R, 2005)

Tabela 6 – Dados espectroscópicos para atenuação do vapor de água

<i>f0</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>b3</i>	<i>b4</i>	<i>b5</i>	<i>b6</i>
22,235080	0,1079	2.144	26,38	0,76	5.087	1,00
67,803960	0,0011	8,732	28,58	0,69	4,930	0,82
119,995940	0,0007	8.353	29,48	0,70	4.780	0,79
183,310087	2.273	0,668	29,06	0,77	5.022	0,85
321,225630	0,0470	6,179	24,04	0,67	4.398	0,54
325.152888	1.514	1.541	28,23	, 64	4,893	0,74
336,227764	0,0010	9,825	26,93	0,69	4.740	0,61
380,197353	11,67	1.048	28,11	0,54	5.063	0,89
390.134508	0,0045	7,347	21,52	, 63	4.810	0,55
437,346667	0,0632	5.048	18,45	0,60	4,230	48
439.150807	0,9098	3,595	20,07	, 63	4.483	0,52
443.018343	0,1920	5.048	15,55	0,60	5.083	0,50
448,001085	10,41	1.405	25,64	0,66	5.028	0,67
470,888999	0,3254	3,597	21,34	0,66	4,506	0,65
474.689092	1.260	2.379	23,20	0,65	4,804	, 64
488.490108	0,2529	2.852	25,86	0,69	5,201	0,72
503.568532	0,0372	6,731	16,12	0,61	3.980	43
504,482692	0,0124	6,731	16,12	0,61	4.010	0,45
547,676440	.9785	0,158	26,00	0,70	4.500	1,00
552.020960	.1840	0,158	26,00	0,70	4.500	1,00
556.935985	497,0	0,159	30,86	0,69	4.552	1,00
620.700807	5.015	2.391	24,38	0,71	4.856	0,68
645,766085	0,0067	8,633	18,00	0,60	4.000	0,50
658,005280	0,2732	7,816	32,10	0,69	4.140	1,00
752.033113	243,4	0,396	30,86	0,68	4.352	0,84
841.051732	0,0134	8.177	15,90	0,33	5.760	0,45
859.965698	0,1325	8.055	30,60	0,68	4.090	0,84
899,303175	0,0547	7,914	29,85	0,68	4.530	0,90
902.611085	0,0386	8.429	28,65	0,70	5.100	0,95
906.205957	.1836	5.110	24,08	0,70	4.700	0,53
916,171582	8.400	1.441	26,73	0,70	5.150	0,78
923,112692	0,0079	10,293	29,00	0,70	5.000	0,80
970,315022	9,009	1.919	25,50	, 64	4.940	0,67
987.926764	134,6	0,257	29,85	0,68	4.550	0,90
1 780,000000	17506.	0,952	196,3	2,00	24,15	5,00

Fonte: (ITU-R, 2005)