

### 3

## Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas

A partir do cálculo da atenuação específica, através da equação (2.7), a atenuação devido à chuva ( $A$ ), para um enlace de comprimento  $L$  sujeito a uma precipitação de taxa uniforme é dada por:

$$A(\text{dB}) = \gamma L \quad (3.1)$$

Entretanto, uma vez que a chuva varia espacial e temporalmente, a equação (3.1) não pode ser aplicada em casos reais, sendo necessário integrar a atenuação específica ao longo do percurso. Assim, a atenuação por chuvas é dada por:

$$A(\text{dB}) = \int_0^L kR^\alpha(l)dl \quad (3.2)$$

onde:

$l$  = Comprimento medido a partir da antena ao longo do enlace.

$L$  = Comprimento do enlace que passa pelo meio com chuva.

$R$  = Taxa de precipitação ao longo do percurso.

O maior problema na modelagem da atenuação por chuvas é a determinação da taxa de precipitação ao longo do enlace. Isto pode ser realizado através de medições com radares meteorológicos mas elas, embora úteis para o estudo de eventos de chuva, são de difícil aplicação para previsões estatísticas de longo prazo. Portanto, devido à dificuldade em quantificar a taxa de precipitação ao longo da trajetória do enlace, a maioria dos modelos de previsão utiliza medidas pontuais de taxa de precipitação como dado de entrada.

A maioria dos modelos empíricos utiliza apenas um ponto da distribuição da taxa de precipitação pontual, a taxa excedida em 0,01% do tempo, para prever a atenuação excedida na mesma percentagem de tempo. Os valores de atenuação excedida em outras percentagens de tempo são obtidos por extrapolação. Embora

este procedimento possa gerar bons resultados em regiões de clima temperado, onde as variações na distribuição de taxa de precipitação são mais suaves, não é adequado para climas tropicais, sujeitos a regimes de chuva mais intensos e variados, nem tem qualquer justificativa física.

A maioria dos modelos empíricos utiliza fatores de correção para refletir o efeito das variações da taxa de precipitação ao longo do enlace. Estes fatores são modelados em função da taxa de precipitação pontual e do comprimento do enlace. No caso de enlaces satélite são considerados ainda o ângulo de elevação e a altura da chuva, em geral relacionada com a altura da isoterma de  $0^{\circ}$ .

A seguir é apresentada uma revisão de métodos empíricos para a previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite, que serão depois utilizados para efeito de comparação com os modelos desenvolvidos no presente trabalho.

### 3.1

#### **Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres**

Serão apresentados nesta seção os principais modelos para previsão da atenuação por chuvas enlaces ponto-a-ponto terrestres.

A tabela 5 apresenta os principais parâmetros utilizados nos modelos considerados, onde:  $k$  e  $\alpha$  são coeficientes de polarização;  $R_p$  a taxa de precipitação de chuva para uma percentagem  $p$  do tempo;  $R_{0,01}$  é a taxa de precipitação de chuva para a percentagem de 0,01% do tempo;  $r_p$  é o fator de correção para uma percentagem de 0,01 % do tempo;  $r_{0,01}$  é o fator de correção para uma percentagem de 0,01 do tempo;  $p$  é a percentagem do tempo;  $d$  é a distância do enlace; e  $f$  a frequência de operação do enlace.

Tabela 5 – Parâmetros dos modelos de previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres

<b>Parâmetros</b>	<b>k,α</b>	<b>R<sub>p</sub></b>	<b>R<sub>0,01</sub></b>	<b>r<sub>p</sub></b>	<b>r<sub>0,01</sub></b>	<b>p</b>	<b>d</b>	<b>f</b>
<b>Modelos</b>								
UIT-R - 530	•		•		•	•	•	
Crane	•	•		•			•	
Australiano (3M/38 – E)	•		•		•	•	•	
Reino Unido (UK)	•	•		•			•	
CETUC 2004	•	•		•			•	
Chinês 2005 (3M/107 – E)	•		•		•	•	•	•

### 3.1.1

#### Recomendação P.530-10 (Modelo do UIT-R)

O modelo de previsão da atenuação por chuvas da recomendação P.530-10 do UIT-R [28] baseia-se no conceito de comprimento efetivo de chuva ( $d_{ef,0,01}$ ) para taxa de precipitação excedida em 0,01% do tempo. O comprimento efetivo é aquele que, considerada uma taxa de precipitação uniforme igual à taxa de precipitação pontual (medida em um ponto do enlace), provoca a mesma atenuação que a precipitação real não uniforme ao longo do comprimento  $d$  do enlace. A definição é válida para a taxa de precipitação pontual excedida durante 0,01% do tempo ( $R_{0,01}$ ), que será utilizada para o cálculo da atenuação excedida durante a mesma percentagem de tempo ( $A_{0,01}$ ). A relação entre o comprimento real e o comprimento efetivo do enlace é o fator de redução de percurso,  $r_{0,01}$ , dado por [29]:

$$d_{ef,0,01} (km) = r_{0,01} d \quad (3.3)$$

onde  $r$  é dado por:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (3.4)$$

com:

$$d_0 = 35.e^{-0,015 R_{0,01}} \text{ Km para } R_{0,01} \text{ mm/h} \leq 100 \text{ mm/h} \quad \text{para } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (3.4.a)$$

$$d_0 = 35.e^{-1,5} = 7,8 \text{ Km para } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad \text{para } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad (3.4.b)$$

A atenuação por chuva excedida durante 0.01% do tempo é dada por:

$$A_{0,01}(dB) = \gamma_{R_{0,01}} d_{ef,0,01} = k R_{0,01}^\alpha d_{ef,0,01} = k R_{0,01}^\alpha d r_{0,01} \quad (3.5)$$

Para outras percentagens de tempo  $p$ , no intervalo de 0,001% a 1%, a atenuação por chuva pode ser determinada através de:

$$\begin{aligned} A_p(dB) &= A_{0,01} 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \\ A_p(dB) &= k R_{0,01}^\alpha 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} r_{0,01} d \\ &= k R_{0,01}^\alpha 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \frac{d_0}{d_0 + d} d \end{aligned} \quad (3.6)$$

A expressão acima é válida para locais com latitudes iguais ou maiores do que 30°. Caso a latitude seja menor do que 30°, a conversão para outras percentagens de tempo é dada pela seguinte expressão:

$$A_p(dB) = k R_{0,01}^\alpha 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log p)} r_{0,01} d \quad (3.7)$$

A expressão (3.3) para o fator de redução é baseada na consideração geométrica de uma célula de chuva equivalente, cujo corte no plano do enlace tem forma retangular. Assim, considera-se o enlace da figura 5 com comprimento

igual a  $D$ , situado em direção do eixo  $x$ . Na figura 5, considera-se também o comprimento da célula de chuva equivalente como igual a  $d_0 < d$ , e que todas as possíveis posições para a célula assumir em relação ao enlace são equiprováveis. Por fim, ao se considerar uma posição qualquer da célula, seja  $D$  o comprimento de percurso do enlace afetado pela precipitação uniforme. Para um período de tempo suficientemente longo, todas as posições possíveis serão ocupadas pelas células de chuva, de tal forma que o valor médio do comprimento de enlace sujeito à chuva é dado por:

$$\bar{d} = \frac{1}{d + d_0} \int_0^{d+d_0} D dx \quad (3.8)$$

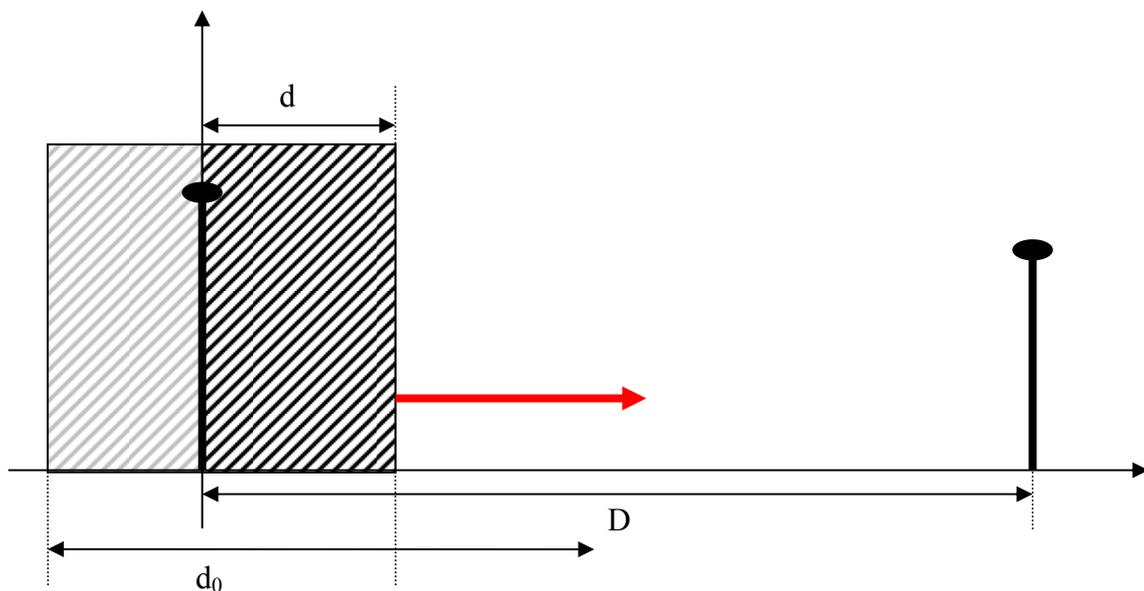


Figura 5 – Geometria para a determinação do fator de redução do modelo da UIT-R

A integral da expressão (3.8) deve ser dividida em três, dependendo da posição da célula de chuva dentro do percurso do enlace. As três integrais em questão são:

$$I_1 = \int_0^{d_0} x dx; \quad \text{para o caso do extremo direito da célula de chuva entrando do}$$

percurso do enlace.

$$I_2 = \int_{d_0}^d L_0 dx; \quad \text{para a célula de chuva totalmente dentro do percurso do}$$

enlace.

$$I_3 = \int_d^{d+d_0} [d_0 - (x-d)] dx; \text{ para extremo direito da célula de chuva saindo do}$$

percurso do enlace.

Portanto, o percurso médio  $\bar{L}$  será determinado por:

$$\bar{d} = \frac{1}{d+d_0} \left\{ \int_0^{d_0} x dx + \int_{L_0}^d L_0 dx + \int_d^{d+d_0} [d_0 - (x-d)] dx \right\}$$

$$= \frac{d_0 d}{d+d_0} = \frac{d}{1 + \frac{d}{d_0}} = r L \Rightarrow r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (3.9)$$

É possível mostrar que, para  $d_0 > d$ , se obtém a mesma expressão para o fator de redução  $r$  [29].

### 3.1.2

#### Modelo de Crane

Utilizando-se de informações da estrutura espacial e meteorológicas sobre a intensidade da chuva, Crane [30;31] propôs um modelo de previsão da atenuação por chuvas baseado em ajustes de medidas de atenuações por chuvas, podendo ser aplicado em regiões climáticas diferentes, com diferentes geometrias e sobre uma ampla variedade de frequências.

A estrutura da chuva é modelada por funções exponenciais que são limitadas pelo comprimento  $D$  do enlace. A distância que limita as funções é 22,5 km. A atenuação por chuvas no modelo de Crane é dada por :

$$A(dB) = kR_p^\alpha \left[ \frac{e^{\mu\alpha D} - 1}{\mu\alpha} \right]; \quad \text{para } 0 < D \leq d \quad (3.10)$$

$$A(dB) = kR_p^\alpha \left[ \frac{e^{\mu\alpha d} - 1}{\mu\alpha} - \frac{b^\alpha e^{cad}}{c\alpha} + \frac{b^\alpha e^{caD}}{c\alpha} \right]; \quad \text{para } d \leq D \leq 22,5 \text{ km} \quad (3.11)$$

onde  $R_p$  é a taxa de precipitação para uma percentagem de tempo “p” e os demais dos coeficientes são dados por:

$$\mu = \frac{\ln(be^{cd})}{2}; \quad d \text{ em km} \quad (3.12)$$

$$b = 2,3R_p^{-0,17} \quad (3.13)$$

$$c = 0,026 - 0,03 \ln R_p \quad (3.14)$$

$$d = 3,8 - 0,6 \ln R_p \quad (3.15)$$

Quando o enlace  $D$  for maior que 22,5 km, deve-se utilizar uma nova taxa de precipitação  $R_p'$  dada por:

$$R_p' = R_p \left( \frac{22,5}{D} \right) \quad (3.16)$$

### 3.1.3

#### Modelo Australiano (DOCUMENTO 3M/38-E, DE UIT-R)

Neste modelo ajustou-se um novo valor do comprimento efetivo do modelo do UIT-R utilizando-se das medidas do banco de dados UIT-R acrescidas de novas medições realizadas durante 11 meses na Austrália, em 34 enlaces que operavam em 11 GHz com comprimentos variando desde 5,1 a 58 km. O reajuste do fator do comprimento efetivo foi apresentado pelo modelo Australiano [32] na seguinte forma :

$$d_0 = 67.e^{-0,0111R_{0,01}} \quad \text{para } R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h} \quad (3.17)$$

$$d_0 = 67.e^{-1,11} \quad \text{para } R_{0,01} > 100 \text{ mm/h} \quad (3.18)$$

$$A_p(dB) = k R_{0,01}^\alpha 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \frac{d_0}{d_0 + d} d \quad (3.19)$$

### 3.1.4

#### Modelo Reino Unido (UK)

Neste modelo a atenuação segue a idéia geral apresentada pela Recomendação 530. Entretanto, esta formulação vale para qualquer taxa de precipitação, sendo o comprimento efetivo fornecido da seguinte forma:

$$d_{ef} = \frac{d}{0,874 + 0,255 \cdot (R_p^{0,54} - 1,7) \cdot d^{0,7}} \quad (3.20)$$

Assim, tem-se:

$$A_p(dB) = k \cdot R_p^\alpha \cdot \frac{d}{0,874 + 0,255 \cdot (R_p^{0,54} - 1,7) \cdot d^{0,7}} \quad (3.21)$$

### 3.1.5

#### Modelo Pérez-Mello (CETUC 2004)

O modelo Pérez-Mello [20; 27] mantém o conceito de célula equivalente de chuva, mas utiliza a distribuição mais completa da taxa de precipitação. Além de empregar a base de dados do UIT-R, em seu desenvolvimento também se consideram dados experimentais medidos no Brasil, apresentando bons resultados na previsão da atenuação por chuvas em regiões situadas nas baixas latitudes.

O método mantém o cálculo da atenuação por chuvas sendo fornecido pelo produto da atenuação específica pelo comprimento efetivo do enlace, com a diferença de que, neste caso, ambos os parâmetros são determinados para qualquer percentagem de tempo  $p$ . Enquanto o modelo de UIT-R parte da taxa de precipitação para uma percentagem de tempo de 0,01%, utilizando um fator de extrapolação para as outras percentagens de tempo, neste modelo é considerada a taxa de precipitação pontual para a percentagem de tempo requerida. A atenuação excedida durante  $p\%$  do tempo é dada por:

$$A_p = \gamma_{R_p} d_{ef} \quad (3.22)$$

onde:

$$\gamma_{R_p} = k R_p^\alpha$$

$$d_{ef} = r_p d^{0,836}$$

$$r_p = 3,455 R_p^b$$

$$b = -0,369 + \frac{0,115}{d}$$

Portanto:

$$A_p = k R_p^\alpha 3,455 R_p^{(-0,369 + \frac{0,115}{d})} d^{0,836} = 3,455k R_p^{(\alpha - 0,369 + \frac{0,115}{d})} d^{0,836} \quad (3.23)$$

Uma comparação entre os modelos do UIT-R e do CETUC, para região tropical, é apresentada no gráfico da figura 6 para um enlace entre Barueri-RIS em São Paulo. Nota-se, para os dados experimentais do enlace, uma melhor aproximação da distribuição cumulativa da atenuação por chuvas obtida pelo modelo do CETUC em relação ao modelo do UIT-R.

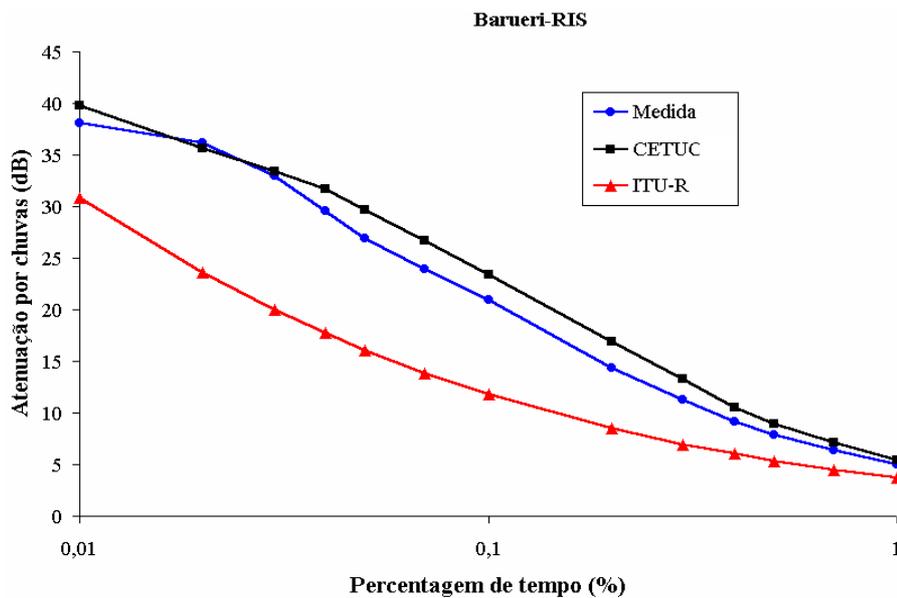


Figura 6 – Distribuição cumulativa da atenuação por chuva no enlace Barueri-RIS

### 3.1.6

#### Modelo Chinês 2005

O modelo Chinês 2005 propõe uma modificação do fator de correção,  $r_{0,01}$ , do modelo de UIT-R, considerando os novos valores dos fatores de polarização  $k$  e  $\alpha$  calculados na recomendação P.838-3 de UIT-R [71].

O ajuste proposto do fator de correção exige uma quantidade maior de variáveis e constantes sem significado físico, e é dado por:

$$r_{0,01} = \frac{1}{0.477d^{0.633} R_{0,01}^{0.073-\alpha} f^{0.123} - 10.579(1 - \exp(-0.024d))} \quad (3.24)$$

Assim, a previsão da atenuação, em dB, para 0,01% do tempo será dada por:

$$A_{0,01} = \gamma_R dr_{0,01} \quad (3.25)$$

onde  $\gamma_R = kR_{0,01}^\alpha$ .

Para outras percentagens do tempo, de 0,001% até 1%, a atenuação estimada pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-[0.854 - 0.026 \ln(\frac{1+p}{p}) - 0.022 \ln(1 + A_{0,01}) - 0.03 \ln f - 0.226(1+p)]} \quad (3.26)$$

## 3.2

### Modelos para Previsão da Atenuação por Chuvas em Enlaces Satélite

Nesta seção serão apresentados os principais modelos empíricos para previsão da atenuação por chuvas enlaces terra-satélite. A tabela 6 mostra os principais parâmetros utilizados por cada um desses modelos, onde  $L_S$  é a distância do enlace que compreende a estação terrena até a altura de chuva;  $\theta$  é o ângulo de elevação;  $f$  é a frequência;  $k$  e  $\alpha$  são os coeficientes de polarização;  $R_p$  é a taxa de precipitação de chuva para uma percentagem  $p$  do tempo;  $R_{0,01}$  é a taxa

de precipitação de chuva para uma percentagem de 0,01 do tempo;  $h_R$  a altura da célula de chuva; e  $p$  a percentagem do tempo.

Tabela 6 – Parâmetros dos modelos para previsão da atenuação em enlaces via satélite

Parâmetros Modelos	$L_S$	$\theta$	$f$	$k(f),$ $\alpha(f)$	$R_p$	$R_{0,01}$	$h_R$	$P$
UIT-R – 618-8	•	•	•	•		•	•	•
Brasil	•	•		•	•			
Australiano	•	•		•	•			
Reino Unido (UK)	•	•		•	•			
Chinês 2005 (3M/108)	•	•	•	•		•	•	•

A figura 9 apresenta um esquemático com os principais parâmetros de comprimento de um enlace de uma estação terrena, a uma altitude  $h_s$ , com um satélite. O parâmetro  $h_r$  é o comprimento efetivo da altura de chuva e pode ser obtido através da Recomendação UIT-R P.839.

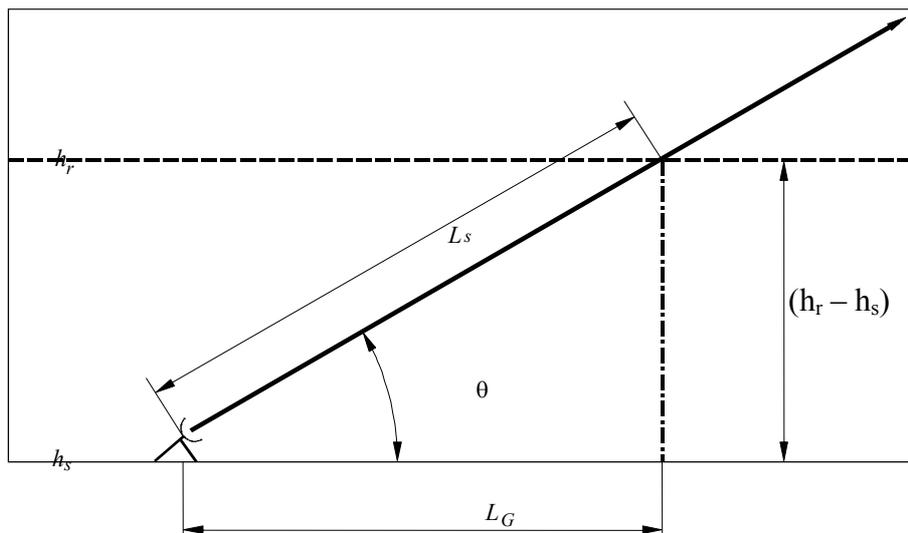


Figura 7 – Principais parâmetros de um enlace terra – satélite [72]

O cálculo de  $L_s$ , distância da estação terrena até a altura de chuva  $h_R$ , é dado por:

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad \text{para } \theta \geq 5^\circ \quad (3.27a)$$

$$L_s = \frac{2(h_R - h_s)}{\left[ \sin^2 \theta + \frac{2(h_R - h_s)}{R_e} \right]^{1/2} + \sin \theta} \quad \text{para } \theta < 5^\circ \quad (3.27b)$$

onde  $R_e = 8500$  km (para o raio equivalente da terra  $k = 4/3$ ).

### 3.2.1

#### Modelo da Recomendação 618-8

O modelo da recomendação do UIT-R considera dois fatores de correção do comprimento efetivo do enlace  $e$ , analogamente ao modelo terrestre, calcula a atenuação para taxa de precipitação de chuva de 0,01% do tempo. Para as demais percentagens do tempo, apresenta uma extrapolação. [72]

Desta forma, faz-se necessário calcular a projeção horizontal de  $L_s$ :

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (3.28)$$

Após obter a taxa de precipitação de 0,01% do tempo, pode-se calcular a atenuação específica,  $\gamma_R$ :

$$\gamma_R = kR_{0,01}^\alpha \quad (3.29)$$

O fator de redução horizontal,  $r_{0,01}$ , é dado por:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38 (1 - e^{-2L_G})} \quad (3.30)$$

Para o cálculo do fator de redução vertical,  $v_{0,01}$ , têm-se os seguintes passos:

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{h_R - h_s}{L_G r_{0,01}} \right) \text{ em graus} \quad (3.31)$$

Para  $\zeta > \theta$

$$L_R = \frac{L_G r_{0,01}}{\cos \theta} \quad (3.32)$$

Senão,

$$L_R = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad (3.33)$$

Finalmente tem-se, para o fator de correção vertical :

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left( 31 \left( 1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (3.34)$$

Se a latitude da Estação Terena,  $\varphi$ ,  $|\varphi| < 36^\circ$ :

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad (3.35)$$

Do contrário,  $\chi = 0$ .

E assim, o comprimento efetivo,  $L_E$ , será dado por:

$$L_E = L_R v_{0,01} \quad (3.36)$$

O valor da atenuação excedida em 0,01% do tempo será:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E \quad (3.37)$$

Para outras percentagens de tempo:

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0,01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad (3.38)$$

Se  $p \geq 1\%$  ou  $|\varphi| \geq 36^\circ$ :  $\beta = 0$

$$\text{Se } p < 1\% \text{ e } |\varphi| < 36^\circ \text{ e } \theta \geq 25^\circ: \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36)$$

$$\text{Se } p < 1\% \text{ e } |\varphi| < 36^\circ \text{ e } \theta < 25^\circ: \quad \beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25\text{sen}\theta$$

### 3.2.2

#### Modelo Brasil [73]

O modelo Brasil é um método que utiliza toda a distribuição de taxa de precipitação no cálculo da atenuação.

Inicialmente, deve-se calcular o comprimento  $L_{R0}$  e a altura  $H_r$  da célula de chuva equivalente como função da percentagem do tempo e da taxa de precipitação da seguinte forma:

$$L_{R0}(R_p, p) = 200 \left[ 1 + R_p^{(0.425 - 0.089 \log p)} \right]^{-1} \quad (3.39)$$

$$H_r(R_p, p) = (3.849 + 0.334 \log p) \left[ 1 + \exp(-0.2R_p) \right] \quad (3.40)$$

Assim, pode-se calcular o fator de correção do comprimento,  $r_p$ , que será dado por:

$$r_p = \frac{1}{1 + \frac{L_s \cos \theta}{L_{R0}}} \quad (3.41)$$

Finalmente a atenuação é dada por:

$$A_s = \gamma_p \cdot L_{eff} \quad (3.42)$$

com

$$\gamma_p = k \cdot R_p^\alpha \quad (3.43)$$

$$L_{eff} = L_s \cdot r_p \quad (3.44)$$

### 3.2.3

#### Modelo Australiano

Este modelo é válido para frequências de 5 a 60 GHz e ângulos de elevação entre 5 e 90 graus. Os dois principais aspectos do modelo são o uso de todas as taxas de precipitação, e um fator de correção médio do comprimento do enlace até a altura de chuva,  $L_s$ . [72;73]

Primeiramente deve-se calcular a projeção horizontal do comprimento do enlace até a altura da célula de chuva:

$$L = L_s \cos \theta \quad (3.45)$$

Depois deve-se calcular a atenuação devido aos gases,  $A_g$  :

$$A_g = \frac{6\gamma_o \exp(-H_s/6) + \gamma_w h_w}{\sin \theta} \quad \text{for } \theta > 10^\circ \quad (3.46)$$

$$A_g = 0 \quad \text{for } \theta \leq 10^\circ$$

onde:

$$\gamma_o = \left( 0.00719 + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.5} \right) f^2 0.001$$

$$\gamma_w = \left( 0.0815 + \frac{3.6}{(f - 22.2)^2 + 8.5} + \frac{10.6}{(f - 183.3)^2 + 9} + \frac{8.9}{(f - 325.4)^2 + 26.3} \right) f^2 0.0015$$

$$h_w = 2.1 \left( 1 + \frac{3}{(f - 22.2)^2 + 5} + \frac{5}{(f - 183.3)^2 + 6} + \frac{2.5}{(f - 325.4)^2 + 4} \right)$$

Os cálculos dos fatores de correção horizontal e vertical, respectivamente  $r_h$  e  $r_v$ , são dados por:

$$r_h = \frac{1}{1 + 0.0045 L r_p^{0.7}}$$

$$r_v = \frac{1}{1 + 0.02 r_p^{0.7}} \quad (3.47)$$

Assim, o cálculo do comprimento efetivo sob a chuva,  $L_r$ , será obtido por:

$$\begin{aligned} L_r &= (Lr_h)/\cos\theta && \text{for } \zeta > \theta \\ L_r &= (h_R - H_s)r_v/\sin\theta && \text{for } \zeta \leq \theta \end{aligned} \quad (3.48)$$

onde  $\zeta = \tan^{-1}[(h_R - h_s)r_v/Lr_h]$ .

Desta forma, a atenuação devido a chuvas será dada por:

$$A_p = kR_p^\alpha L_r \quad (3.49)$$

e a atenuação total do enlace é dada por:

$$A_s = 1.5A_g + A_p \quad (3.50)$$

### 3.2.4

#### Modelo Reino Unido (UK)

Este modelo também utiliza toda a distribuição de taxa de precipitação e os conceitos de fator de correção horizontal e vertical [74].

$$r(p) = \frac{1}{0.875 + (0.0255R^{0.54}(p) - 1.7)L_G^{0.7}} \quad (3.51)$$

$$v(p) = \min \left\{ 2, 1.67 + \left[ 4.47(h_R - h_s)^{-4.6} - 0.46 \right] \log R(p) \right\} \quad (3.52)$$

Nos casos em que a taxa de precipitação for menor do que 1 mm/h, deve-se usar, para o ajuste vertical, o valor de taxa de precipitação de 1 mm/h.

### 3.2.5

#### Modelo Chinês 2005

Este modelo apresenta um novo ajuste para o fator de correção para 0,01% do tempo, e uma nova expressão para a fórmula de extrapolação para outras percentagens.

$$v_{0,01} = \frac{1}{1 + 0.149L_G^{0.288} R_{0,01}^{\alpha-0.306} f^{0.341} - 1.64(1 - \exp(-2.06L_G))} \quad (3.53)$$

Assim, a atenuação para 0,01% do tempo será dada por:

$$A_{0,01} = kR_{0,01}^{\alpha} L_R v_{0,01} \quad (3.54)$$

Para percentagens do tempo diferentes de 0,01%, faz-se uma extrapolação:

$$A_p = A_{0,01} \left( \frac{p}{0.01} \right)^{-[0.474 - 0.0129 \ln(\frac{1+p}{p}) + 0.0167 \ln(1+A_{0,01}) - 0.0572 \ln f + 0.104(1+p) \sin \theta]} \quad (3.55)$$