

## 9

### Estrutura vertical da célula de chuva

#### 9.1.

##### Introdução

Ao longo dos últimos 30 (trinta) anos, o problema da estrutura vertical da chuva tem sido investigado exaustivamente. No campo das radiocomunicações, a motivação principal, para os estudos realizados, é que o conhecimento desta estrutura constitui um dos itens fundamentais para o desenvolvimento de um modelo de predição da atenuação por chuva em enlaces terra-satélite. No contexto do Setor de Radiocomunicações da U.I.T. (UIT-R), desde a introdução do conceito de comprimento efetivo do enlace [124] até a definição atual da altura efetiva da chuva [76], inúmeras propostas têm sido feitas para representar, através de um parâmetro, o efeito da distribuição vertical da precipitação na metodologia utilizada no cálculo da atenuação do sinal [125-130]. Em que pese o esforço desenvolvido, ainda não foi obtida uma solução satisfatória para o problema.

Os modelos que têm sido adotados pelo UIT-R para enlaces terra-satélite possuem funções distintas para avaliar os efeitos das variações da chuva nos sentidos horizontal e vertical. Entretanto, ao ser feita a otimização do modelo, com base em dados experimentais, são utilizados simultaneamente as duas funções. Este procedimento é uma provável fonte de erro. Segundo Assis [131] para minimizar o erro de predição, é recomendado otimizar a função associada à variação vertical somente após resolver o problema da distribuição horizontal, o que pode ser realizado com base em medições de enlaces terrestres.

Este capítulo tem por objetivo apresentar perfis de variação da altura da chuva obtidos a partir de medições com radar, evidenciando principalmente características associadas às chuvas convectivas, que obviamente são de maior interesse para a região Amazônica. Não será tratada diretamente a questão relativa à atenuação por chuva em um enlace terra-satélite. Espera-se que os dados aqui reportados possam ser úteis no desenvolvimento futuro de um modelo seguindo a linha recomendada no parágrafo anterior.

## 9.2.

### Altura da isoterma de 0° C

Em diversos modelos de cálculo de atenuação por chuva em enlaces terra-satélite, a altura da isoterma de 0° C ( $h_0$ ) tem sido associada à altura da chuva ( $h_R$ ). Por exemplo, o atual modelo do UIT-R [76] define a altura como,

$$h_R(\text{km})=h_0(\text{km})+0,36 \quad (9.1)$$

que corresponde à isoterma de -2° C, partindo-se do decaimento padrão da temperatura na atmosfera de -5,6° C/km [133].

Em vista da necessidade de se conhecer o valor de  $h_0$ , a Recomendação UIT-R P.839-3 [7] fornece este parâmetro através de mapas digitalizados. Cumpre ressaltar que estes mapas são razoavelmente precisos. A comparação com dados médios provenientes de medições por radiossonda indica diferenças inferiores a 10% [132]. Entretanto, em climas tropicais e equatoriais, a variação mensal de  $h_0$  é bem significativa. Um exemplo está mostrado na tabela 52, para a localidade de Belém-PA [132], onde o valor médio de  $h_0$  obtido da citada recomendação é de 4538,6 km.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4844	4950	4935	5017	5027	4917	4816	4710	4752	4758	4844	4843

Tabela 52 Variação mensal da altura da isoterma de 0° C, em metros, para a cidade de Belém

Em clima temperado, onde a variabilidade de  $h_0$  é menor, a associação com  $h_R$  possibilita obter resultados satisfatórios com o atual modelo UIT-R. Entretanto, nas chuvas convectivas, onde o movimento da massa de ar pode levar água em forma líquida para alturas bem acima de  $h_0$  [17,18,133], o problema é mais complexo. Conclui-se então da necessidade de uma análise mais aprofundada da estrutura vertical da chuva em climas tropicais e equatoriais.

### 9.3. Tipo de chuva em função do perfil vertical

Esta seção tem por base um trabalho de Fabry e Zawadsky [133], no qual foram considerados 5(cinco) tipos de chuva. Embora, conforme expresso anteriormente, o interesse desta tese esteja concentrado no estudo de chuvas de grande intensidade, os tipos discutidos a seguir, eventualmente, podem ter utilidade na análise das telas *RHI* dos radares. Os exemplos dos perfis, apresentados nesta seção, foram retirados de medições dos radares do SIPAM analisados na região. Nas telas de *RHI* que servem de ilustração, cada quadrícula possui uma dimensão horizontal de 250m e uma dimensão vertical de 270m. O procedimento de leitura das imagens provenientes destas telas foi realizado através do programa MATLAB.

#### 9.3.1 Perfil tipo 1 - Chuva de baixa intensidade

Neste tipo, que não apresentam interesse para as telecomunicações, estão incluídas as garoas e as chuvas do tipo estratiforme de muito baixa intensidade. São chuvas formadas diretamente em forma líquida e apresentam um topo, geralmente, bem abaixo da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$ . A figura 93 ilustra a tela do *RHI* analisado como exemplo deste tipo de perfil. Verifica-se um topo do perfil limitado a um valor em torno de 1.900 m, bem abaixo do valor da isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  para Manaus, que é de 4466,6m, de acordo com a Recomendação da UIT-R P.839-3 [7], ou de 4807m, por medições de radiossonda [132]. A figura 94 mostra o perfil vertical para uma distância fixa ao radar de 28,0 km. Esta figura, como todas as demais deste tipo no capítulo, leva em conta a correção da altura em função do raio de curvatura da terra. Verifica-se no exemplo apresentado que os valores de taxa de precipitação no solo são menores do que 1,3 mm/h. Para se avaliar este valor, utilizou-se a relação Z-R com dois segmentos, definida no capítulo 7.

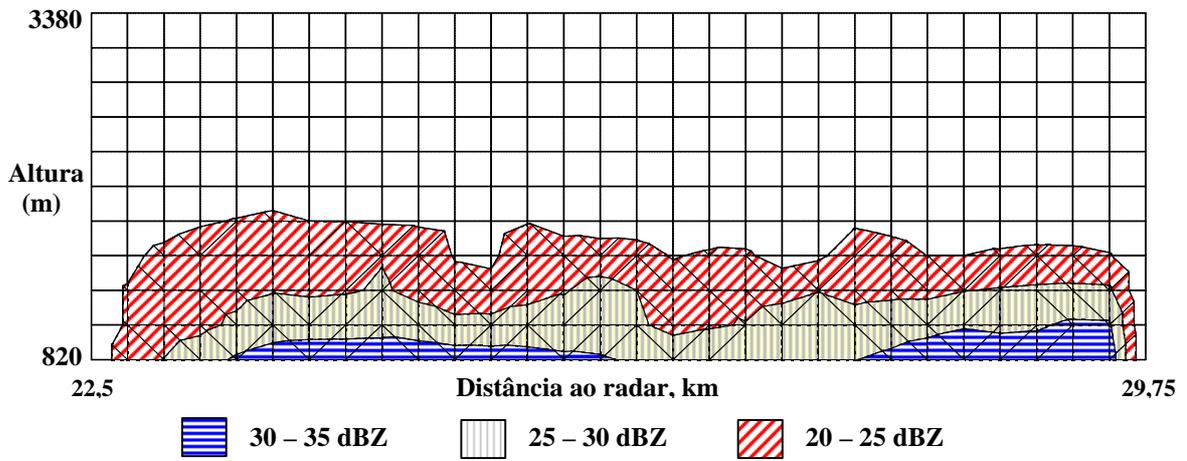


Figura 93 Representação do RHI analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 1, radar de Manaus.

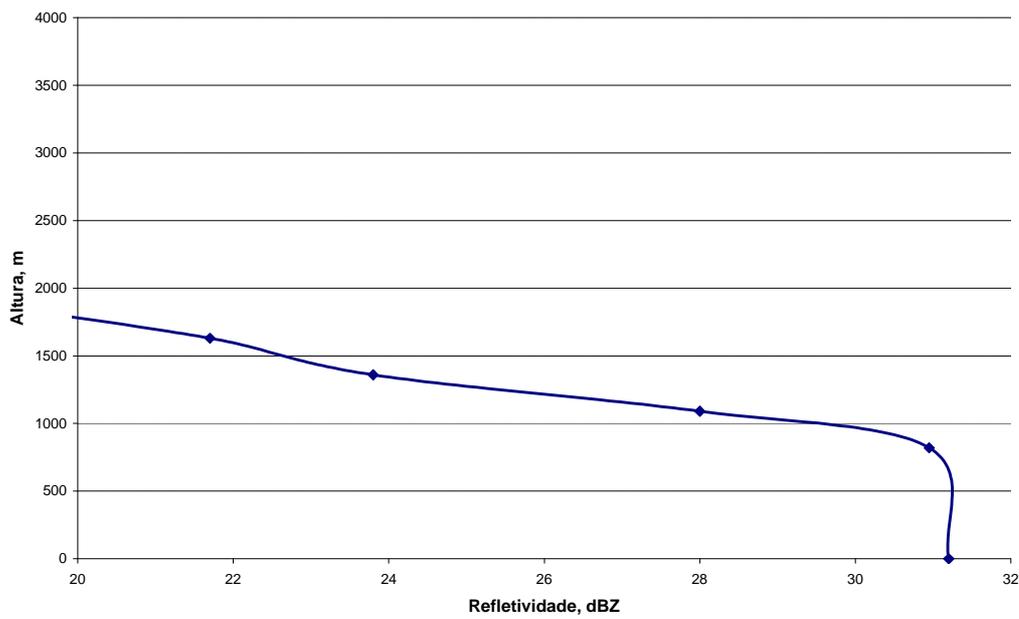


Figura 94 Perfil vertical do tipo 1 para uma distância de 28 km do radar de Manaus.

### 9.3.2

#### Perfil tipo 2 - Chuva com camada de fusão

É o tipo de perfil mais comum para o clima temperado, com chuvas de intensidades baixa ou moderada. Apresentam uma camada de fusão (“*melting layer*” ou “*bright band*”) no seu perfil vertical. A figura 95 ilustra a tela do *RHI* analisado como exemplo deste tipo de perfil. A figura 96 mostra o perfil vertical para uma distância fixa ao radar de 49,0 km. Como pode ser verificada, a refletividade é praticamente constante até o nível da camada de fusão. Nesta camada, como pode ser observado na figura, existe um crescimento da refletividade, que decai rapidamente após atingir o valor máximo. Este decaimento posterior está associado à neve e, nos primeiros quilômetros, apresenta uma taxa média de  $-6,5 \text{ dBZ/km}$  [133].

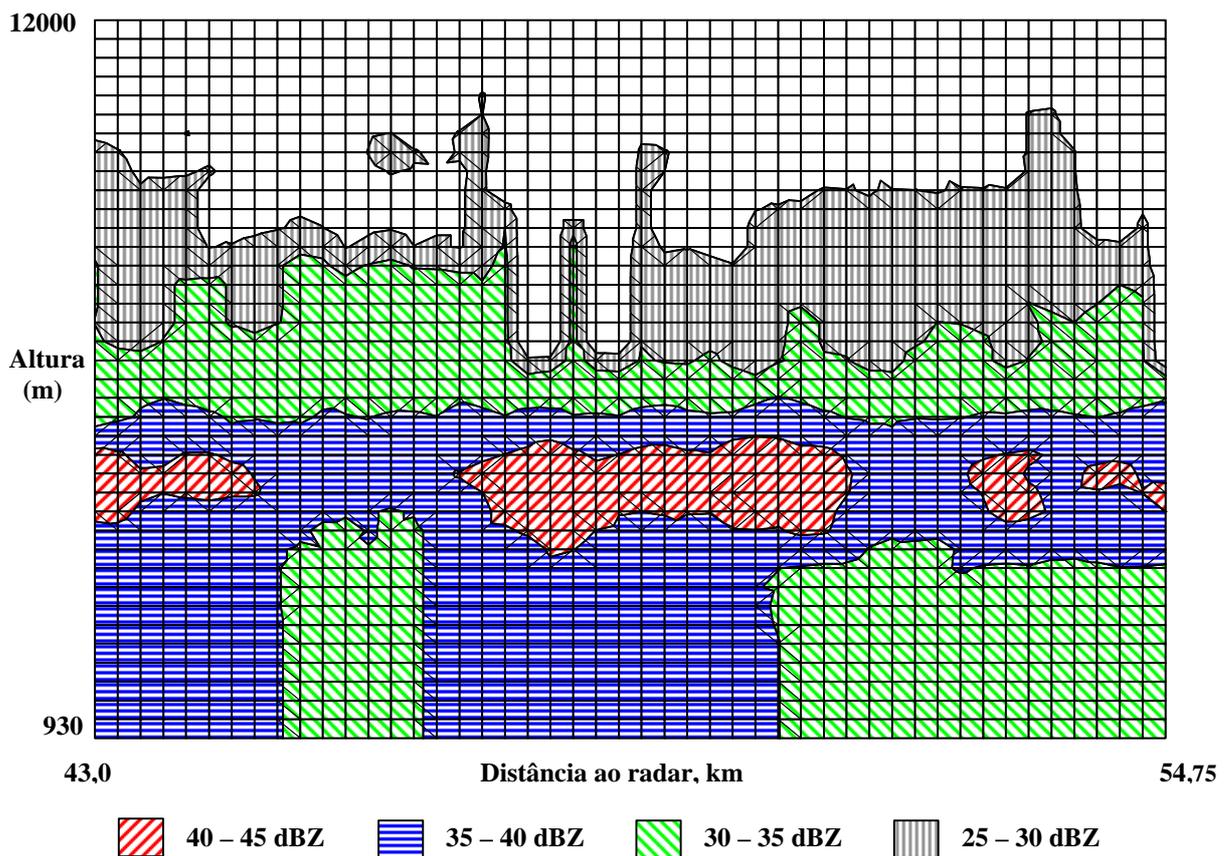


Figura 95 Representação do *RHI* analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 2, radar de Manaus.

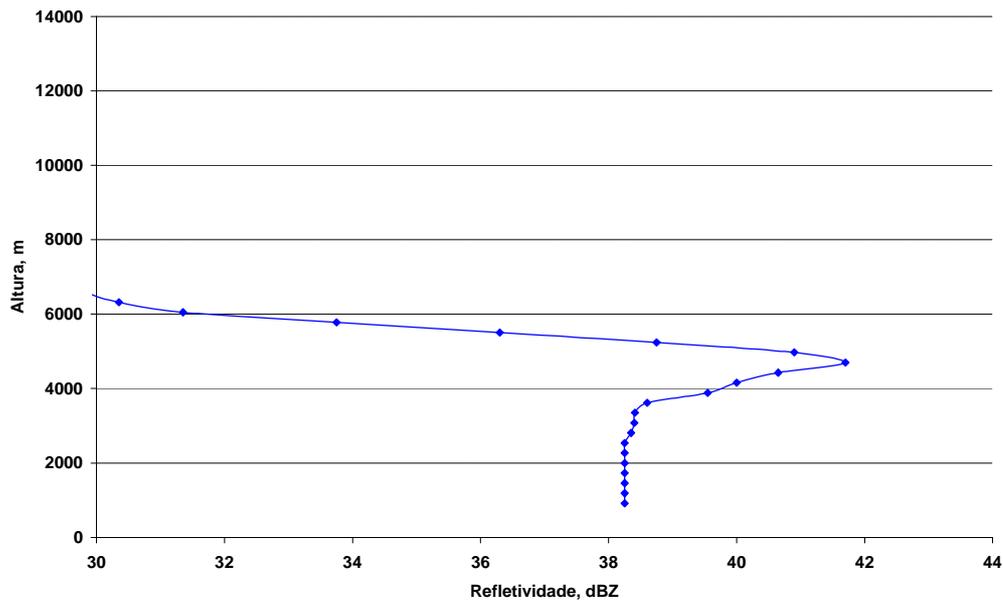


Figura 96 Perfil vertical do tipo 2 para uma distância de 49 km do radar de Manaus.

Verifica-se, nas figuras, que o topo do perfil está em torno da isoterma de  $0^{\circ}$  C para a cidade de Manaus. Apesar de uma pequena variação do valor de refletividade com a horizontal, a característica do perfil não varia, dentro da célula, com a distância ao radar, isso é, apresenta um comportamento do perfil de tipo 2. Apesar da figura 95 apresentar apenas uma extensão horizontal de 10 km, a dimensão medida desta célula de chuva foi cerca de 40 km. O valor da taxa de precipitação no solo encontrado nesta célula variou de 1 a 7 mm/h, utilizando-se neste cálculo a relação Z-R, com dois segmentos, definida no capítulo 7 deste trabalho.

A invariabilidade da refletividade em relação à altura, na região abaixo da camada de fusão, é uma hipótese bastante utilizada na grande maioria das aplicações em telecomunicações. Acontece, porém, que na verdade, este gradiente apesar de pequeno, não é nulo. Para enlace satélite com grandes ângulos de elevação e em frequências bem elevadas, este gradiente pode ser significativo no efeito sobre a atenuação [134].

Os modelos de cálculo de atenuação por chuva, tendo por base medidas experimentais, incluem o efeito da camada de fusão. Entretanto, caso contribuição da atenuação por chuva seja muito inferior àquela correspondente à camada de fusão, isto pode causar incoerência no resultado, particularmente quando é usado o conceito de altura efetiva da precipitação ( $h_R$ ). Trata-se de um problema que

afeta, em especial, os sistemas de baixa confiabilidade em regiões temperadas. O ideal para não definir erroneamente o valor de  $h_R$  é separar os procedimentos de cálculo. Alguns exemplos de cálculo podem ser encontrados em [135-138]. Como limite além do qual a camada de fusão não contribui significativamente para a atenuação do sinal é sugerido o valor de 2 mm/h [139,140].

### 9.3.3

#### Perfil tipo 3 - Chuva sem camada de fusão

Similar ao tipo anterior, porém sem a existência de uma camada de fusão visível durante a varredura vertical. Ocorre para uma taxa de precipitação maior, constituindo-se uma transição da chuva do tipo estratiforme para convectiva. A figura 97 ilustra a tela do *RHI* analisado como exemplo deste tipo de perfil. A figura 98 apresenta o perfil vertical para uma distância fixa ao radar de 67,0 km. Conforme pode ser observado, existe uma transição rápida entre a invariabilidade com a altura e o decaimento rápido (na média da ordem de  $-6,5$  dBZ/km), relacionado à presença da neve. Por este motivo este tipo é também designado por chuva oriunda do gelo compacto (“*rain from compact ice*”). A transição ocorre por volta da altura da isoterma de  $0^0$  C.

Cumprе ressaltar que este tipo de perfil apresenta o aspecto de uma precipitação estratiforme, sem a camada de fusão, porém com a presença e a formação da chuva através de flocos de neve ou granizo, característica que está associada à chuva convectiva. Desta forma, sendo um perfil de transição, ocorre principalmente quando há presença de chuva convectiva no meio de uma chuva estratiforme que abrange uma grande região ou como uma chuva estratiforme na borda de uma chuva fortemente convectiva.

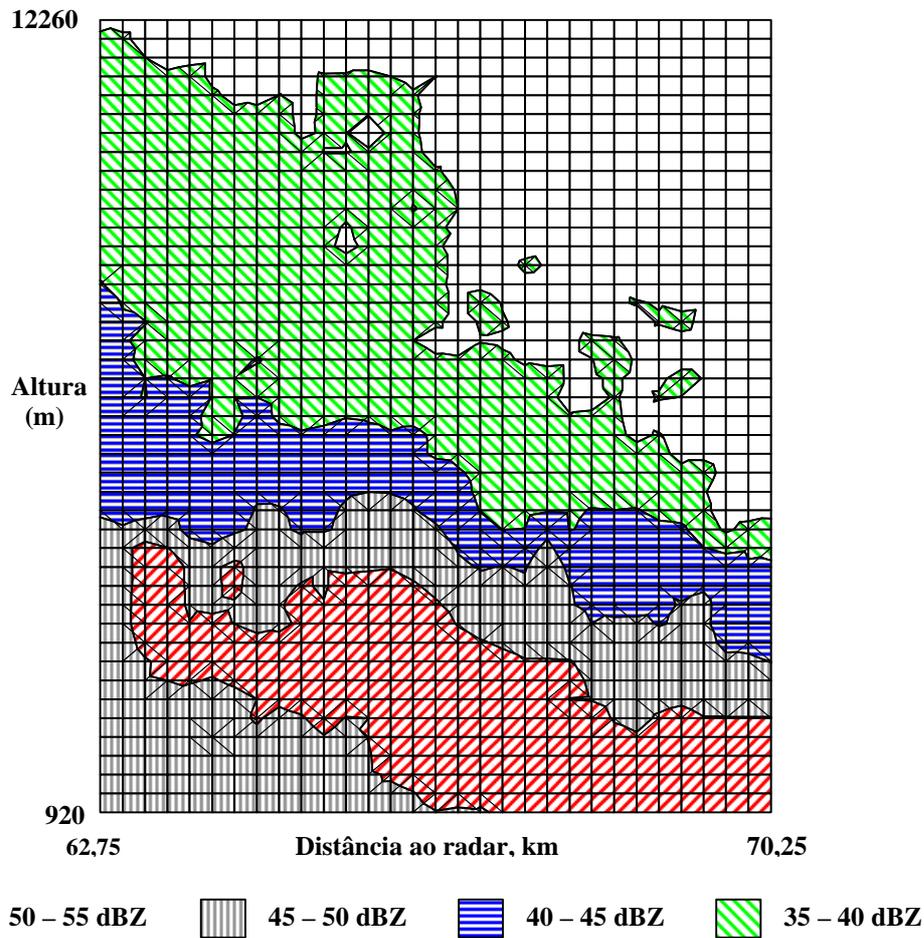


Figura 97 Representação do *RHI* analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 3, radar de Manaus.

A figura 97 apresenta uma parte da célula captada pelo radar. Em sua totalidade esta apresenta uma dimensão horizontal por volta dos 35 km. Apenas a parte da direita da figura 97, a partir de uns 66 km do radar, apresenta o comportamento do perfil do tipo 3. A primeira parte da figura apresenta uma chuva de menor intensidade com um perfil do tipo 2, confirmando o caráter de transição descrito no parágrafo anterior. Na parte da célula com características do perfil do tipo 3, a variação da taxa de precipitação excedida, medida no solo, é de 40 mm/h a 50 mm/h, utilizando-se das relações definidas no capítulo 7 para o radar de Manaus.

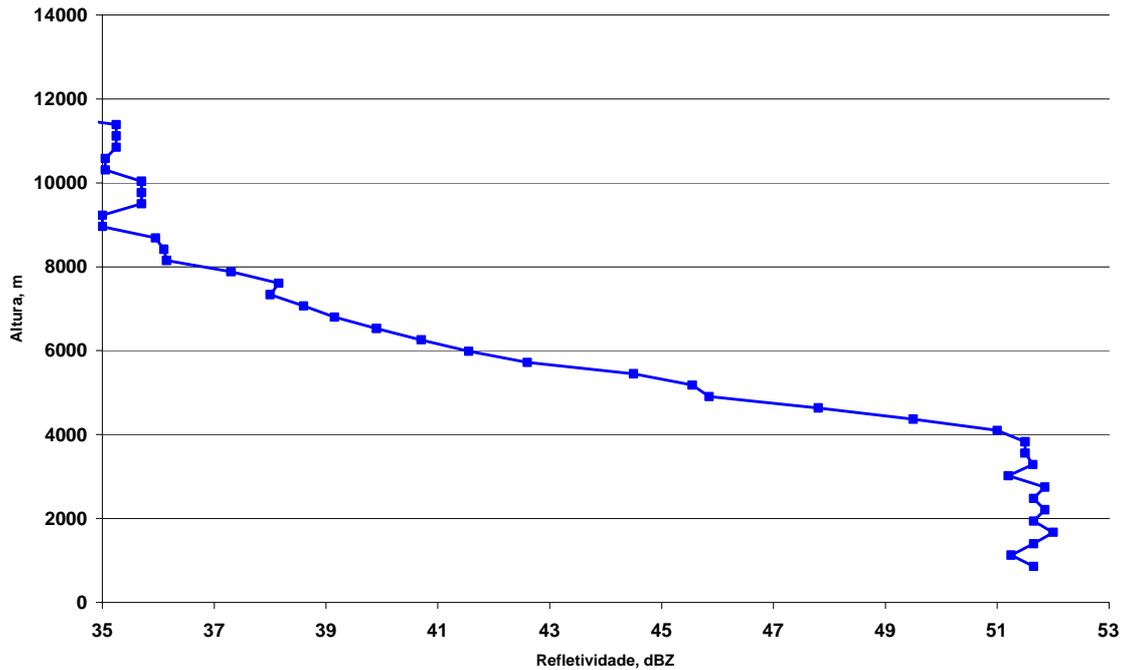


Figura 98 Perfil vertical do tipo 3 para uma distância de 67 km do radar de Manaus.

### 9.3.4 Perfil tipo 4 - Aguaceiro

Da mesma forma que o tipo 1, neste caso a precipitação se produz diretamente na forma líquida, variando seu topo entre as isotermas de  $-5^{\circ}\text{C}$  e  $+5^{\circ}\text{C}$ . Em outras palavras, o decaimento, após a invariabilidade de  $Z$ , é mais rápido do que o caso relacionado ao gelo ou neve. A figura 99 apresenta a tela do *RHI* analisado como exemplo deste tipo de perfil, medido no radar de Cruzeiro do Sul. A figura 100 mostra o perfil vertical para uma distância fixa ao radar de 25,0 km. Observa-se que a refletividade é praticamente constante quase até o topo da célula de chuva. A partir deste ponto a refletividade decai rapidamente. Este perfil ocorre em células convectivas isoladas ou agrupadas. Verifica-se que o topo da célula permaneceu em uma altura que variou de 5.000 m a 5.500 m. Após esta altura o decaimento é muito mais rápido do que o que ocorre na figura 98. O valor da taxa de precipitação excedida nesta célula, medida no solo variou de 70 a 90 mm/h.

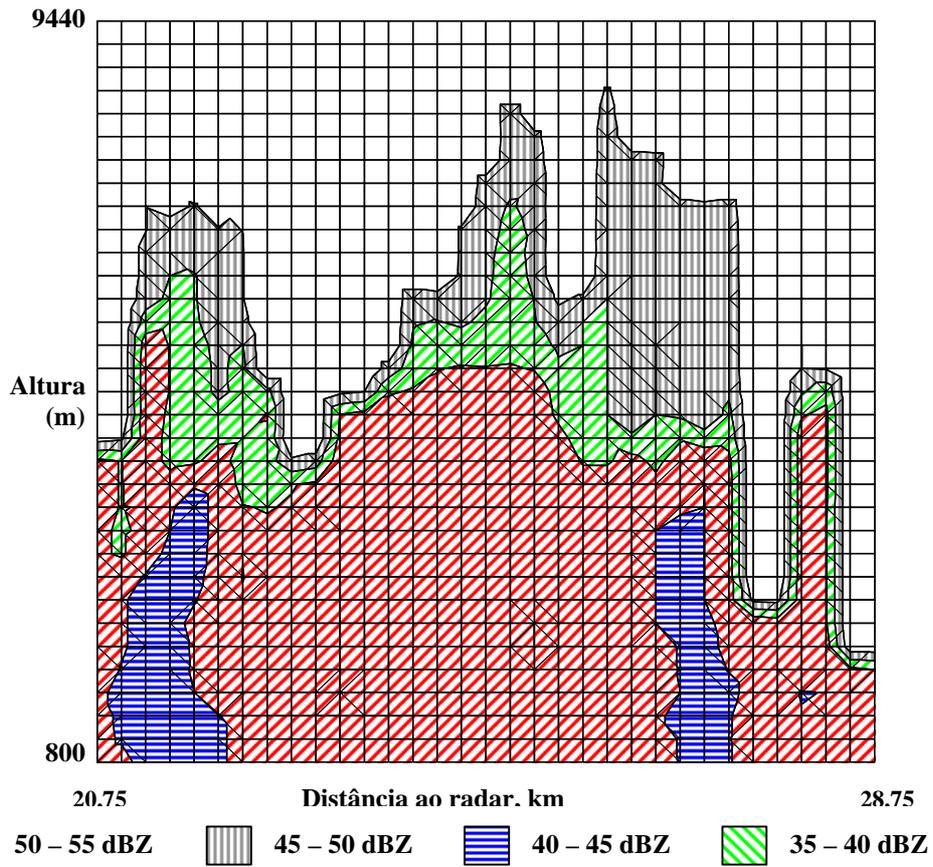


Figura 99 Representação do RHI analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 4, radar de Cruzeiro do Sul.

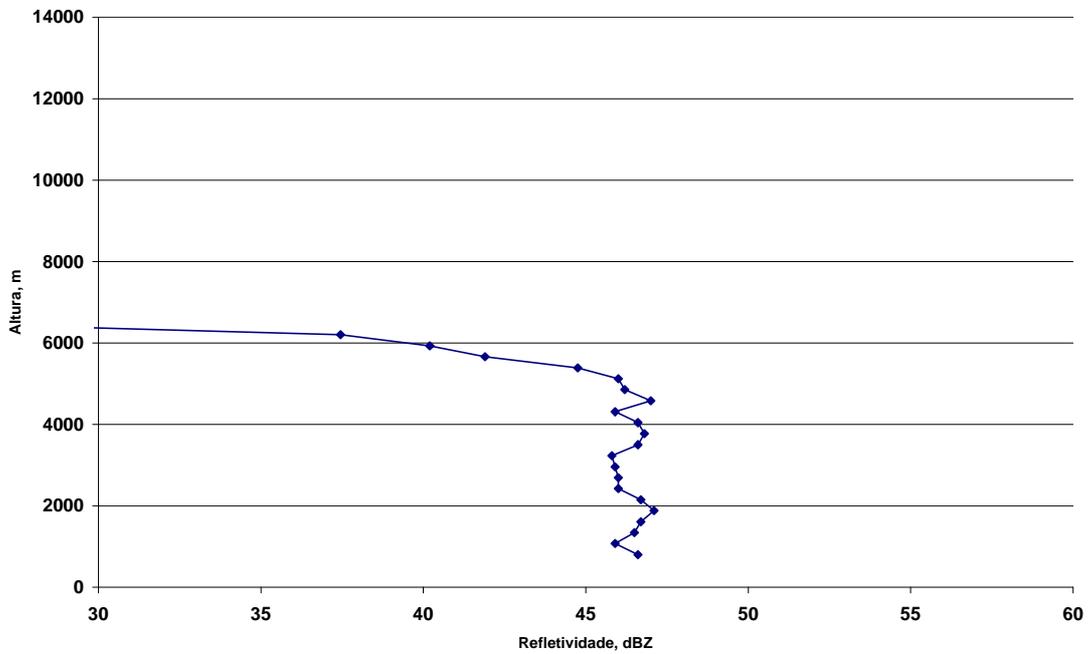


Figura 100 Perfil vertical do tipo 4 para uma distância de 25 km do radar de Cruzeiro do Sul.

### 9.3.5

#### Perfil tipo 5 - Tempestades

Trata-se de um perfil associado à chuva de intensidade muito elevada (“*deep convection*”). A figura 101 mostra a representação do *RHI* analisado como exemplo deste tipo de perfil, medido no radar de Tefé. A figura 102 ilustra o perfil vertical para uma distância fixa ao radar de 79,0 km. O topo da célula, em seu centro de maior intensidade, varia entre 6000 e 9000 m.

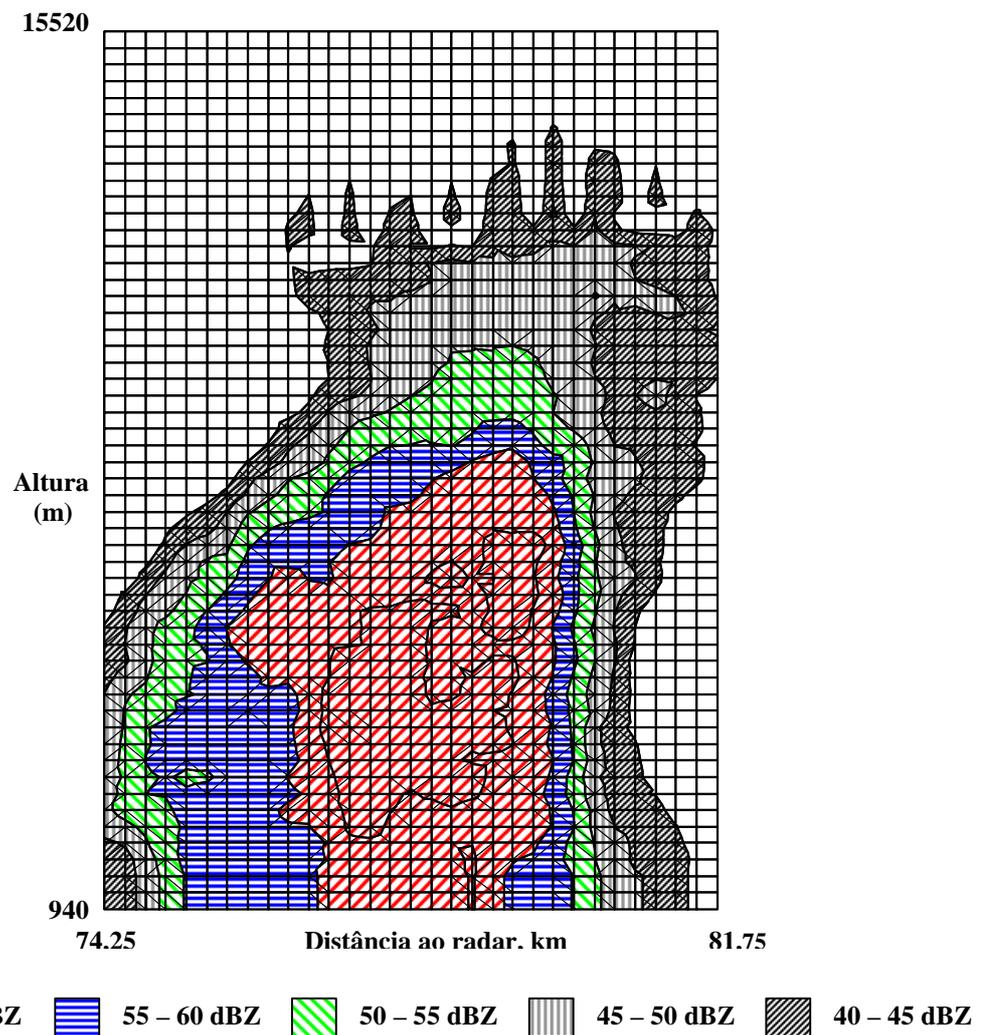


Figura 101 Representação do RHI analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 5, radar de Tefé.

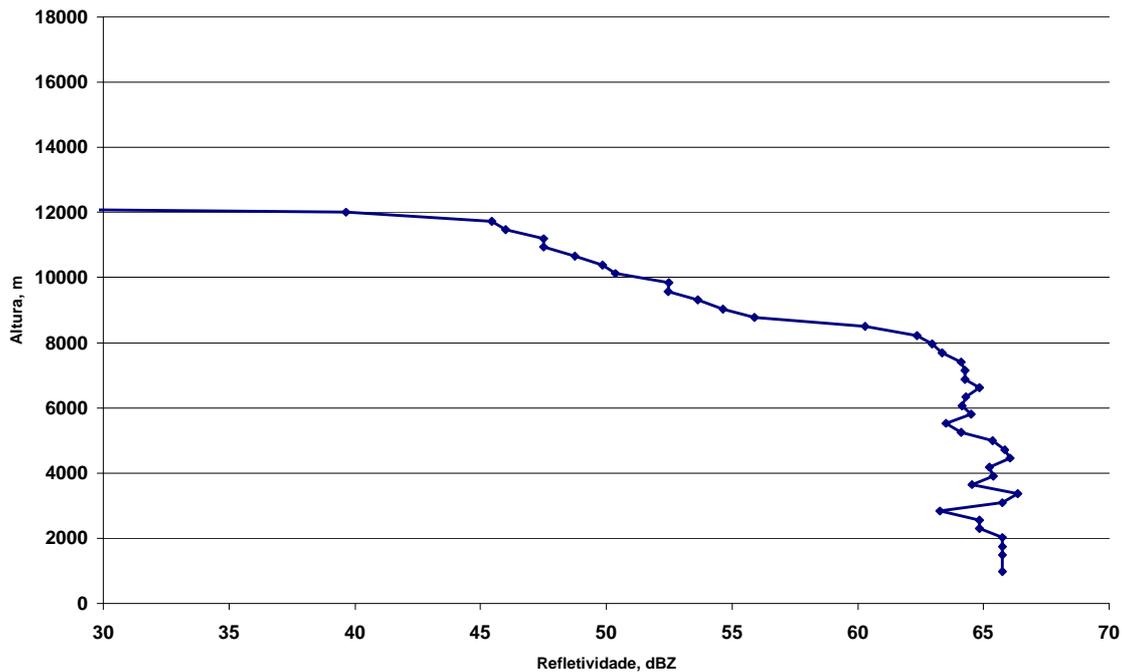


Figura 102 Perfil vertical do tipo 5 para uma distância de 79 km do radar de Tefé.

Se considerarmos que Tefé apresenta a mesma relação Z-R do que Tabatinga, as taxas de chuva excedida na célula analisada variaram entre 100 e 150 mm/h, confirmando o fato de ser a região equatorial uma área caracterizada por precipitações de alta intensidade. Valores em torno ou acima de 100 mm/h são observados em probabilidade anuais menores do que 0,01%, conforme pode ser verificado na tabela 3 do capítulo 3. Acontece porém, que mesmo este alto patamar, algumas vezes, é superado, contribuindo para um comportamento inesperado nas pequenas percentagens de tempo das distribuições estatísticas de precipitação. A figura 103 ilustra o perfil horizontal de um evento excepcional medido na região[17]. Para o cálculo da taxa de precipitação foi utilizada a relação Z-R de dois segmentos para a cidade de Tabatinga definida no capítulo 7.

O grande problema é que este tipo de evento afeta fortemente o desempenho dos enlaces terrestre na região. Considerando que a célula da figura 103 cobre distâncias maiores do que 15 km, com intensidades acima de 150 mm/h, verifica-se que um enlace terrestre típico, de 5 a 10 km, poderia estar totalmente imerso na mesma e, conseqüentemente, sofrer forte atenuação. Para o caso do enlace terra-satélite o problema não é menor. Para este caso observa-se que tanto a elevada

intensidade da chuva quanto a grande altura alcançada pela mesma contribuem significativamente para a atenuação do sinal.

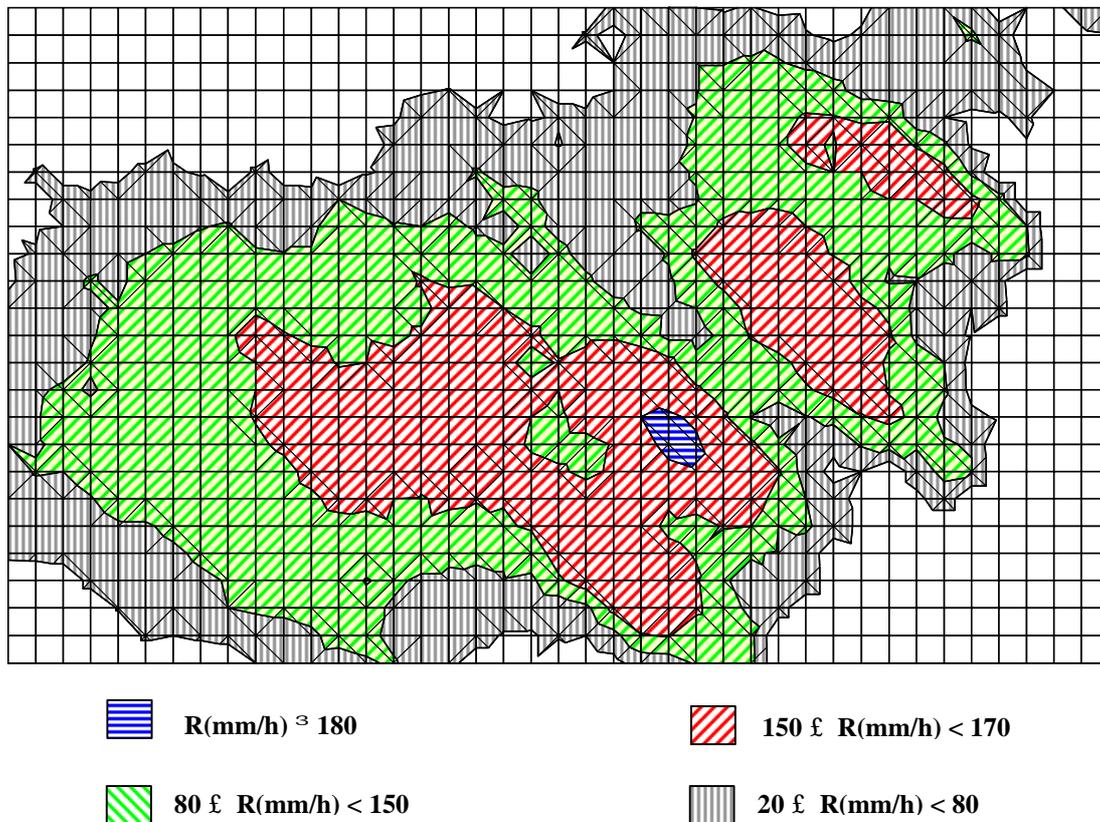


Figura 103 Perfil horizontal de um evento excepcional medido na região através do radar de Tefé.

### 9.3.6 Comentários sobre os perfis

A figura 104 mostra a probabilidade de ocorrência dos tipos de perfil aqui descritos, em função do valor da refletividade observada nas vizinhanças do solo [133]. Ressalta-se que o gráfico apresenta a probabilidade para cada intensidade de precipitação, assim, apesar do mesmo ter sido levantado para a cidade de Montreal, Canadá, localizada em uma região temperada. Este deve ser o comportamento médio em outras regiões, variando apenas a probabilidade de ocorrência de um determinado valor de refletividade (taxa de precipitação). Similarmente, outro aspecto que deve ser ressaltado é que o tipo de perfil não está diretamente relacionado com o valor da taxa de precipitação. Em outras palavras, uma mesma taxa de precipitação excedida pode ser observada em mais de um tipo de perfil

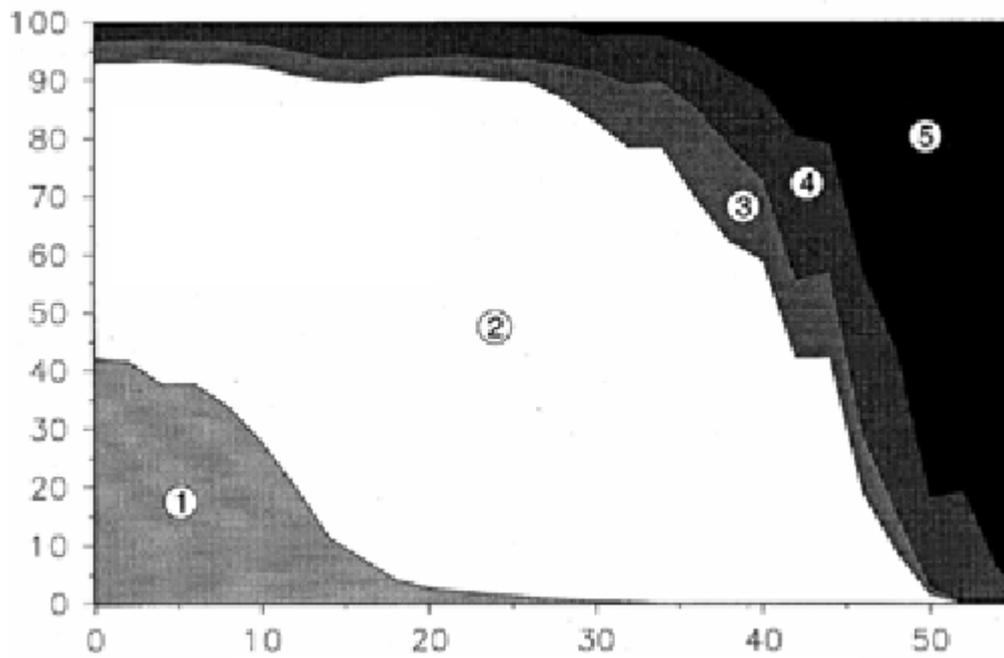


Figura 104 Probabilidade de ocorrência dos tipos de perfil em função da refletividade da chuva perto do solo [133].