

7

Comparação de resultados e validação dos modelos

Os modelos EMB, TMB e GC foram utilizados para a sintetização de séries temporais de atenuação por chuva para os enlaces terrestres de São Paulo.

Foram realizadas sintetizações de séries temporais com diferentes períodos de tempo e foi observado que a estabilidade das estatísticas das séries temporais começa a ocorrer quando as séries têm 10 anos de duração ou mais. Enquanto um estudo com dados experimentais realizado por Fedi [30], citado anteriormente, indicou 10 anos como a duração mínima recomendável para se obter estatísticas confiáveis em séries temporais de dados experimentais de atenuação por chuva para que variações climáticas de longo prazo possam ser confiáveis, no caso das séries temporais sintetizadas, este comprimento de série temporal mostra-se como sendo o mínimo para que as estatísticas de sucessivas séries sintetizadas comecem a convergir para os parâmetros estatísticos utilizados na geração dos dados aleatórios.

Por outro lado, à medida que aumenta o comprimento da série temporal sintetizada, maior é o tempo de processamento da sintetização.

Considerando que os modelos sintetizam séries temporais em que o tempo de amostragem é o mesmo tempo dos dados experimentais de cada enlace, foram escolhidos tamanhos de séries a serem sintetizadas que possibilitam a estabilidade dos modelos sem que o tempo de processamento seja demasiadamente alto. No caso dos enlaces Bradesco, Cenesp15, Scania e Barueri foram sintetizadas séries temporais de 10 e 50 anos e no caso do enlace Paranapiacaba, cujo tempo de amostragem é 1/10 do tempo dos demais enlaces, foram sintetizadas apenas séries de 10 anos uma vez que a sintetização de uma série de 50 anos requer um tempo de processamento demasiadamente grande sem que isto aumente a estabilidade dos resultados.

Os tempos de processamento da sintetização de cada tamanho de série temporal em um microcomputador com processador Intel i7 860 (2.8 GHz) com 8 GB de memória estão apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Tempo de processamento da sintetização das séries temporais

Modelo	Tamanho da série temporal (anos)	Tempo de amostragem (s)	Tempo de processamento
EMB e TMB	10	1	40 segundos
	10	10	4 segundos
	50	1	3 minutos e 20 segundos
	50	10	20 segundos
GC	10	1	2 horas e 50 minutos
	10	10	17 minutos

A otimização das funções desenvolvidas em Matlab e em linguagem C para a sintetização pelo modelo GC e a utilização de outras linguagens de programação podem diminuir o tempo de processamento, mas para os objetivos desta pesquisa os tempos de processamento atuais foram considerados aceitáveis.

As estatísticas de atenuação, duração de desvanecimentos e *fade-slope* das séries temporais sintetizadas por cada modelo para cada enlace foram calculadas e comparadas com as estatísticas dos respectivos dados experimentais utilizando variáveis de testes cujos procedimentos de cálculo são descritos na recomendação ITU-R P.311-13 [24]. Os valores destas variáveis e de seus valores RMS estão apresentados para cada tipo de estatística neste capítulo. Quanto mais próximos de zero são os valores, mais próximas estão as estatísticas dos dados sintetizados das estatísticas dos dados experimentais.

O gerador de números aleatórios dos modelos foi sempre configurado para seu estado inicial antes da primeira sintetização por cada modelo para permitir que as sintetizações possam ser novamente reproduzidas sempre que necessário.

Os resultados obtidos para a melhor sintetização (considerando o valor RMS da variável de teste da CCDF de atenuação) dentre as cinco primeiras que foram realizadas através dos modelos EMB e TMB foram apresentados em [11]. Como os resultados não variam de maneira tão significativa em relação à primeira sintetização de cada modelo, neste trabalho os resultados apresentados são sempre referentes à primeira sintetização.

7.1. Parâmetros dos modelos

Os parâmetros extraídos através dos modelos EMB, TMB e GC que foram utilizados na sintetização das séries temporais estão apresentados nas Tabelas 7.2 e 7.3.

Tabela 7.2 – Valores dos parâmetros dos modelos EMB e TMB

Enlace	Modelo	m	ρ	A_{offset} (dB)	β (s ⁻¹)
Bradesco	EMB	-3,74	2,07	0,00	1,16x10 ⁻⁴
	TMB	-0,96	1,24	1,87	1,26x10 ⁻⁴
Cenesp15	EMB	-2,91	1,88	0,60	1,20x10 ⁻⁴
	TMB	-0,26	1,09	3,13	1,52x10 ⁻⁴
Scania	EMB	-3,47	2,13	0,40	6,43x10 ⁻⁵
	TMB	-1,60	1,54	1,46	6,59x10 ⁻⁵
Barueri	EMB	-3,74	2,21	0,40	5,36x10 ⁻⁵
	TMB	-1,37	1,47	1,67	5,74x10 ⁻⁵
Paranapiacaba	EMB	-3,02	2,23	0,80	5,60x10 ⁻⁵
	TMB	-0,47	1,35	3,54	6,78x10 ⁻⁵

Tabela 7.3 – Valores dos parâmetros do modelo GC

Enlace	b	c	β (s ⁻¹)
Bradesco	10,7	0,0108	1,47x10 ⁻⁴
Cenesp15	11,3	0,0155	1,58x10 ⁻⁴
Scania	16,1	0,0094	1,11x10 ⁻⁴
Barueri	16,5	0,0092	1,06x10 ⁻⁴
Paranapiacaba	17,3	0,0230	7,73x10 ⁻⁵

Nos três modelos o parâmetro β , que tem relação com dinâmica da atenuação, é menor nos três enlaces mais longos. Um estudo da relação entre o valor do parâmetro e a distância do enlace é apresentado em tópico posterior dentro deste mesmo capítulo.

7.2. Resultados da CCDF de atenuação

A Figura 7.1 apresenta um gráfico comparativo da distribuição de atenuação da primeira série temporal sintetizada por cada modelo para o enlace Cenesp15 considerando dois tamanhos diferentes de séries temporais, 10 e 50 anos.

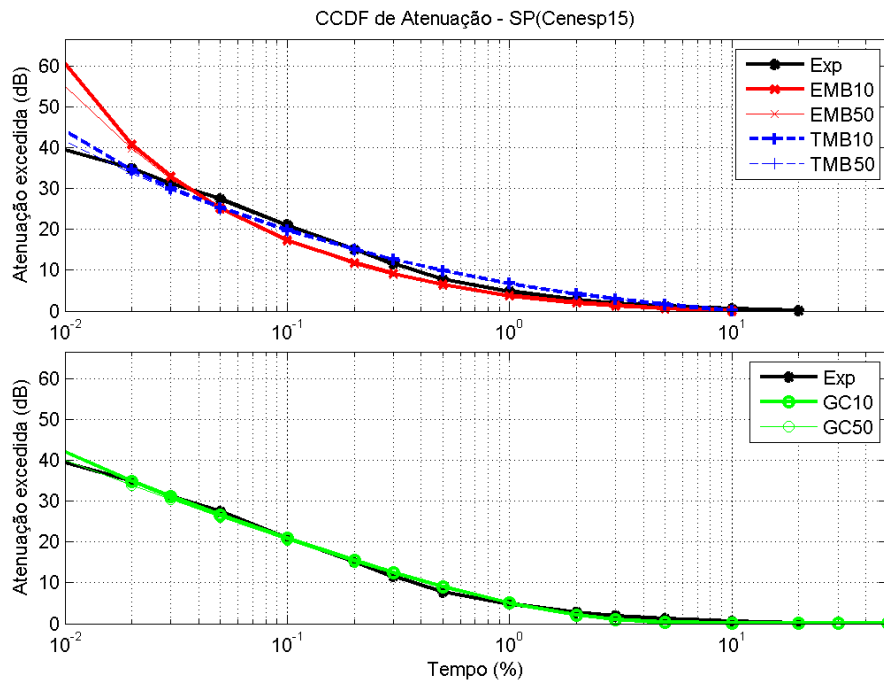


Figura 7.1 – CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Cenesp15

É possível observar que nas atenuações mais altas as séries temporais de 50 anos sintetizadas pelos modelos EMB e TMB apresentam valores mais próximos dos dados experimentais. No caso do modelo GC, as diferenças não são percebidas.

A Figura 7.2 apresenta um gráfico comparativo do erro absoluto da atenuação, em dB, entre a CCDF de atenuação sintetizada por cada modelo e a CCDF experimental do enlace Cenesp15. É possível observar que só há diferença mais significativa entre as séries de 10 e 50 anos nos dois percentuais de tempo mais baixos.

Os gráficos das distribuições de atenuação e dos erros absolutos referentes aos demais enlaces estão apresentados no Apêndice D.

Para avaliar a estabilidade dos modelos foram feitas sintetizações de cinco séries temporais através de cada um. Foram escolhidos os tamanhos de séries

temporais que mais se aproximaram do resultado experimental nos gráficos da Figura 7.1.

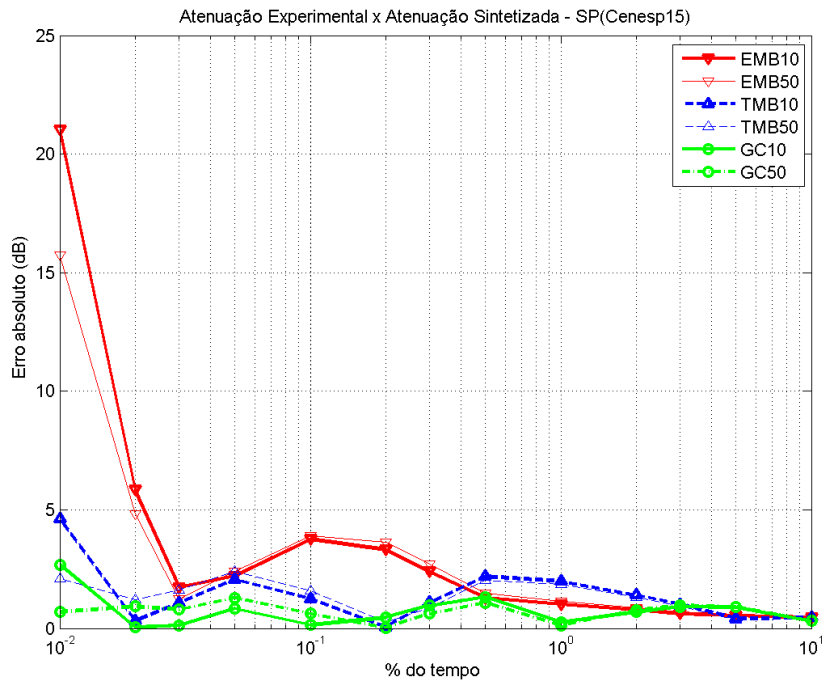


Figura 7.2 – Erro absoluto da CCDF de atenuação das séries temporais sintetizadas – Cenesp15

A Figura 7.3 apresenta o gráfico comparativo das distribuições de atenuação das cinco primeiras séries temporais sintetizadas pelos três modelos para o enlace Cenesp15.

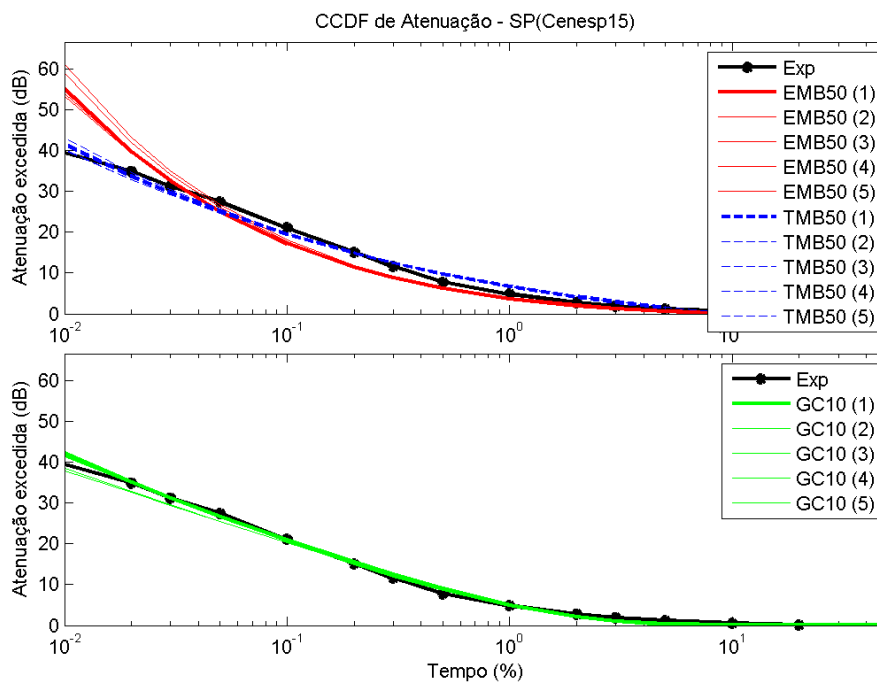


Figura 7.3 – CCDF de atenuação de múltiplas séries temporais sintetizadas – Cenesp15

O gráfico da Figura 7.3 mostra que os modelos são estáveis. Simulações com os outros enlaces também indicaram a estabilidade.

A diferença entre a CCDF de atenuação sintetizada por cada modelo e a CCDF de atenuação experimental é dimensionada para cada enlace através do valor RMS da variável de teste V_i definida pela recomendação ITU-R P.311-13 [24]. A variável de teste V_i é calculada para cada percentual padrão de tempo definido no Capítulo 5 que esteja dentro da faixa analisada através da Equação 7.1 [24]:

$$V_i = \begin{cases} (A_{exp}/10)^{0.2} \ln(A_{sint}/A_{exp}) & \text{for } A_{exp} < 10 \text{ dB} \\ \ln(A_{sint}/A_{exp}) & \text{for } A_{exp} \geq 10 \text{ dB} \end{cases} \quad (7.1)$$

onde A_{exp} é a atenuação experimental e A_{sint} é a atenuação sintetizada.

O valor RMS ρ da variável de teste é calculado para cada faixa conforme a Equação 7.2 [24].

$$\rho = \sqrt{\mu^2 + \sigma^2} \quad (7.2)$$

onde μ é a média e σ é o desvio padrão dos valores da variável de teste.

O valor RMS da variável de teste foi calculado para três faixas de percentuais de tempo com diferentes extensões para avaliar cada modelo em faixas que incluem diferentes níveis de atenuação.

A maior faixa de percentuais de teste foi escolhida para abranger o máximo possível da faixa de percentuais que foi utilizada no ajuste da CCDF de atenuação por cada modelo em cada enlace.

O maior percentual da faixa de ajuste é 10% para todos os enlaces. O percentual máximo de teste utilizado nos testes foi 5% que é o primeiro percentual padrão abaixo de 10%. A razão é que o parâmetro A_{offset} faz com que a atenuação sintetizada correspondente ao percentual de 10% seja igual a zero nos modelos EMB e TMB, podendo até ser um valor negativo muito próximo de zero dependendo da simulação. Um valor negativo ou igual ao zero de atenuação sintetizada faz com que a Equação 7.1 não tenha resultado real.

O menor percentual da faixa de teste varia conforme o enlace e foi definido como sendo o menor percentual de ajuste de cada enlace.

Sendo assim, no caso da faixa de ajuste mais ampla, as distribuições de atenuação experimentais e sintetizadas foram comparadas para os seguintes percentuais de tempo: 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,10, 0,20, 0,30, 0,50, 1, 2, 3 e 5%.

A Tabela 7.4 apresenta os valores RMS da variável de teste dos três modelos para três faixas de percentuais, considerando séries sintetizadas de 10 e 50 anos.

Tabela 7.4 – Valores RMS da variável de teste da CCDF de atenuação de séries temporais sintetizadas

Enlace	Modelo	10 anos			50 anos		
		0,01 a 5%	0,01 a 1%	0,01 a 0,2%	0,01 a 5%	0,01 a 1%	0,01 a 0,2%
Bradesco	EMB	0,18	0,21	0,24	0,17	0,19	0,22
	TMB	0,23	0,17	0,07	0,21	0,16	0,07
	GC	0,33	0,07	0,03	0,34	0,05	0,03
Cenesp15	EMB	0,25	0,22	0,23	0,26	0,22	0,21
	TMB	0,18	0,14	0,06	0,17	0,13	0,06
	GC	0,32	0,06	0,03	0,34	0,05	0,03
Scania	EMB	0,15	0,11	0,14	0,18	0,14	0,14
	TMB	0,13	0,12	0,07	0,11	0,11	0,09
	GC	0,53	0,09	0,05	0,56	0,09	0,05
Barueri	EMB	0,19	0,17	0,18	0,23	0,20	0,20
	TMB	0,19	0,14	0,05	0,17	0,13	0,09
	GC	0,45	0,07	0,03	0,48	0,07	0,04
Paranapiacaba	EMB	0,23	0,14	0,13	-	-	-
	TMB	0,11	0,06	0,05	-	-	-
	GC	0,15	0,05	0,04	-	-	-

Embora nos percentuais de tempo mais baixos das séries de 10 e 50 anos seja observada uma diferença entre os gráficos da CCDF de atenuação e do erro absoluto do enlace Censp15 que foram apresentados nas Figuras 7.1 e 7.2, a diferença não influi nos valores RMS da variável de teste na faixa de percentuais mais baixos indicando que os dois tamanhos de séries temporais proporcionam resultados análogos.

É possível observar na Tabela 7.4 que o modelo GC proporciona os melhores resultados para percentuais de tempo abaixo de 1% do tempo e foi verificado que em alguns casos os resultados são melhores em faixas que se estendem até percentuais de tempo superiores a 1%. O valor do percentual máximo para cada enlace e o respectivo valor mínimo de atenuação experimental em que os resultados do modelo GC são melhores está apresentado na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Percentuais de tempo máximos e valores de atenuação em que o modelo GC proporciona melhor desempenho na CCDF de atenuação

Enlace	Tempo (%)	Atenuação (dB)
Bradesco	2	1,8
Censp15	3	1,9
Scania	1	4,7
Barueri	1	4,6
Paranapiacaba	3	3,5

Os dados da Tabela 7.5 indicam que as séries temporais sintetizadas pelo modelo GC são sempre mais próximas dos dados experimentais nos níveis de atenuação superiores aos valores apresentados para cada enlace.

Embora o modelo TMB tenha resultados piores que o modelo GC, ele proporciona resultados melhores que o modelo EMB na faixa inferior a 1% do tempo na quase totalidade das situações analisadas na Tabela 7.4. A exceção é nas séries temporais de 10 anos do enlace Scania onde os resultados são equivalentes.

Os resultados apresentados na Tabela 7.4 para o modelo GC na faixa até 5% mostram ainda que, embora a Equação 7.1 tenha uma expressão específica para calcular a variável de teste nos níveis de atenuação experimental abaixo de 10 dB

com o objetivo de minimizar a influência dos valores mais baixos de atenuação na avaliação de atenuações previstas ou sintetizadas, esta influência ainda ocorre.

Considerando o conjunto de dados apresentados na Tabela 7.4 é possível observar que os resultados das séries de 10 e 50 anos são muito próximos indicando que a sintetização de séries temporais de 50 anos não é necessária para avaliação da CCDF de atenuação.

7.3. Resultados das estatísticas de *fade-slope*

A diferença entre as estatísticas de *fade-slope* das séries temporais sintetizadas por cada modelo e as estatísticas das séries temporais experimentais pode ser avaliada graficamente e através da variável de teste definida na recomendação ITU-R P.311-13 [24]. Na análise dos resultados foi considerado o intervalo de 30 segundos para o cálculo do *fade-slope*, exceto nos casos em que outro valor é citado.

A Figura 7.4 apresenta as distribuições de *fade-slope* das séries temporais experimental e sintetizadas de 10 anos pelos três modelos para o enlace Cenesp15. Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice D.

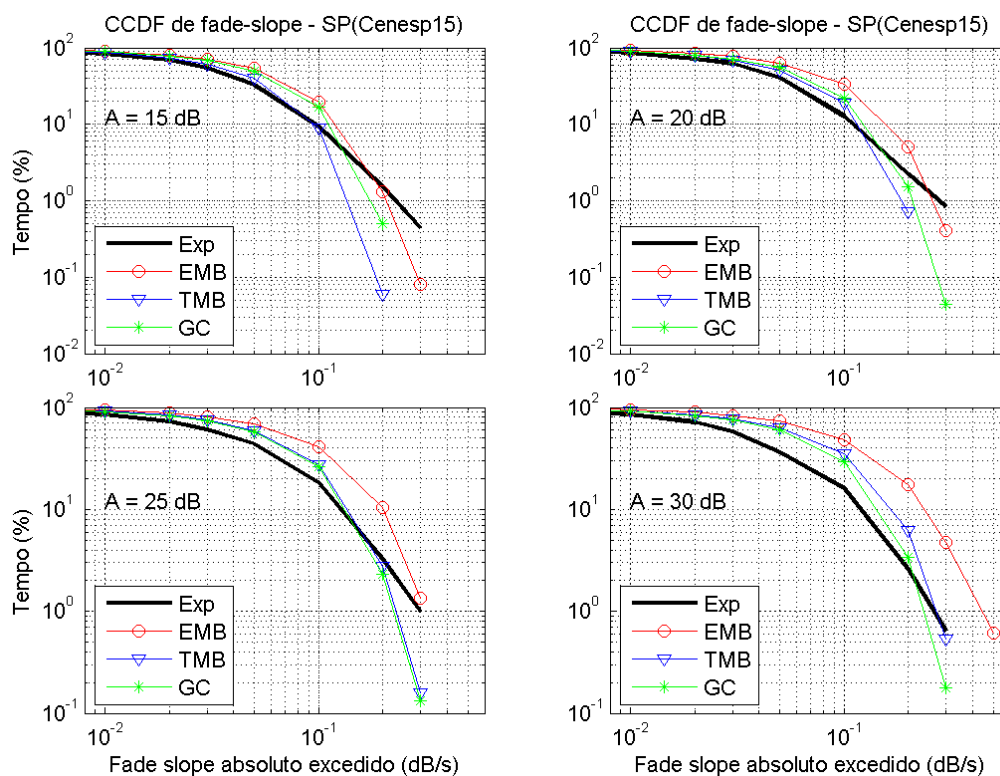


Figura 7.4 – Distribuições de *fade-slope* experimental e sintetizadas – Cenesp15

É possível observar que na maioria dos gráficos dos cinco enlaces as curvas dos modelos GC e TMB estão mais próximas das curvas experimentais. Para dimensionar a diferença entre as estatísticas das séries temporais experimental e sintetizadas, a variável de teste ε_{FS} das estatísticas de *fade-slope* é calculada conforme a Equação 7.3 [24] para cada nível de atenuação e cada nível de *fade-slope* definidos no Capítulo 4.

$$\varepsilon_{FS}(\zeta, A) = 2 \cdot \frac{P_{sint}(\zeta|A) - P_{exp}(\zeta|A)}{P_{sint}(\zeta|A) + P_{exp}(\zeta|A)} \quad (7.3)$$

onde P_{sint} e P_{exp} são as probabilidades de que um dado valor de *fade-slope* ζ , em dB/s, seja excedido em um dado nível de atenuação A (dB) nas séries temporais sintetizadas e experimentais, respectivamente.

O desempenho dos modelos em cada nível de *fade-slope* e de atenuação pode ser avaliado através de gráficos em que os valores da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* (ε_{FS}) são representados numa escala de cores. Os gráficos referentes às séries temporais sintetizadas para 10 anos para o enlace Cenesp15 pelos três modelos estão apresentados na Figura 7.5. Os gráficos dos demais enlaces estão no Apêndice E.

As áreas do gráfico marcadas com ‘+’ são referentes a níveis que não existem nos dados experimentais e sintetizados. Níveis que existem nos dados sintetizados, mas não existem nos dados experimentais são identificados por ‘s’ e níveis que existem nos dados experimentais, mas não foram gerados pelos modelos são apresentados com ‘x’.

É possível observar que os modelos GC e TMB apresentam resultados melhores, sendo que o modelo GC é melhor nas atenuações mais altas e o modelo TMB tem seu melhor desempenho nos níveis intermediários de atenuação. É possível verificar também que o desempenho dos três modelos cai à medida que níveis mais altos de *fade-slope* são considerados.

Para avaliar o desempenho dos modelos por nível de atenuação, o valor RMS da variável de teste é calculado através da Equação 7.2. Da mesma forma pode ser avaliado o desempenho dos modelos no conjunto de todos os níveis de atenuação e em um conjunto de níveis iguais ou superiores a 10 dB. A Tabela 7.6 apresenta os valores RMS da variável de teste para o enlace Cenesp15.

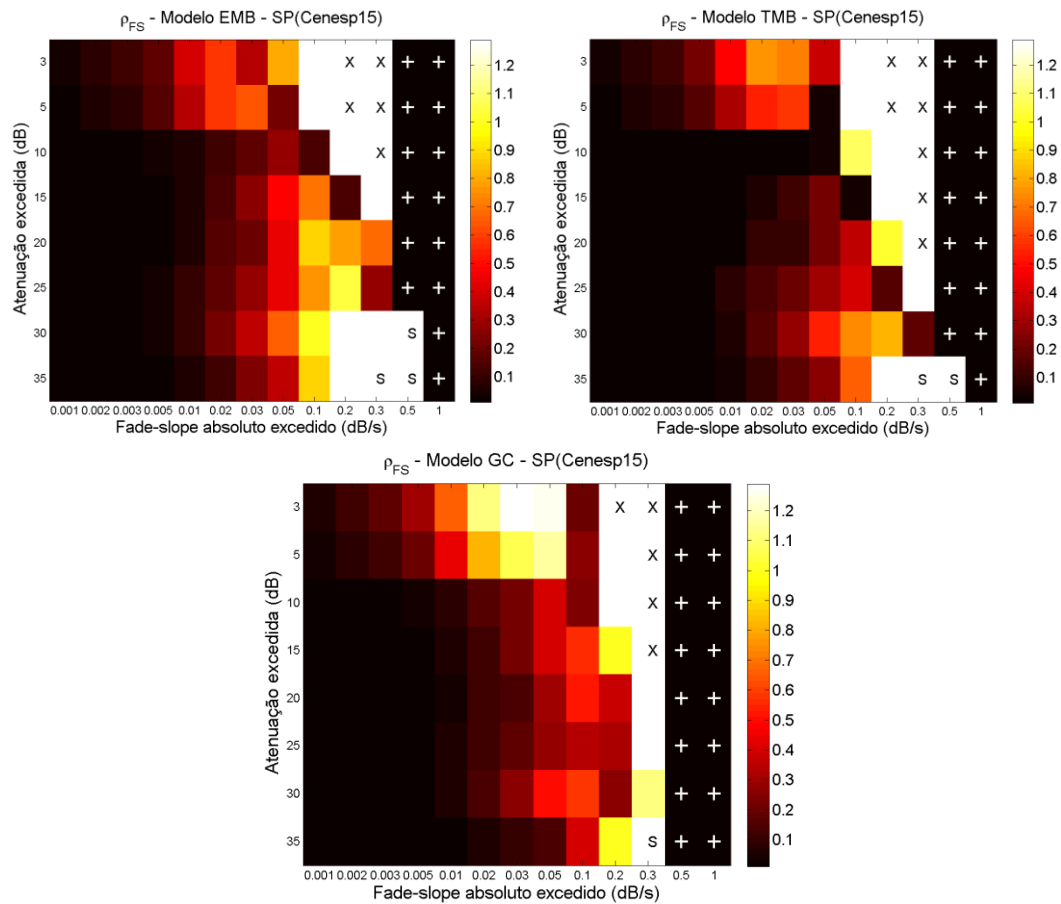


Figura 7.5 – Valores da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* – Cenesp15

Tabela 7.6 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* para cada nível de atenuação – Cenesp15

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
3	1,09	1,11	1,10	1,10	1,11	1,10
5	1,01	1,05	1,01	1,01	1,05	1,01
10	0,79	0,91	0,80	0,75	0,91	0,78
15	0,50	0,83	0,71	0,48	0,81	0,73
20	0,44	0,69	0,59	0,69	0,67	0,63
25	0,44	0,47	0,50	0,75	0,45	0,53
30	0,92	0,39	0,43	0,92	0,40	0,39
35	1,01	0,94	0,69	1,01	0,95	0,70
Geral	0,91	0,90	0,78	0,95	0,90	0,78
≥ 10 dB	0,79	0,82	0,66	0,85	0,81	0,67

As tabelas com os valores RMS para os demais enlaces estão apresentadas no Apêndice E onde foram apresentados, para efeito de comparação, os valores RMS da variável de teste considerando os seguintes valores de intervalos de tempo para o cálculo do *fade-slope*: 20, 30, 40, 50 e 60 segundos.

A Tabela 7.7 apresenta um resumo dos resultados gerais obtidos para todos os enlaces considerando todos os níveis de atenuação e a Tabela 7.8 mostra os resultados considerando apenas os níveis de atenuação maiores ou iguais a 10 dB.

Tabela 7.7 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* – resultados gerais por enlace

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,80	0,67	0,72	0,86	0,66	0,73
Cenesp15	0,91	0,90	0,78	0,95	0,90	0,78
Scania	0,86	0,74	0,75	0,88	0,76	0,80
Barueri	0,95	0,99	0,73	1,00	0,99	0,75
Paranapiacaba	1,03	1,00	0,91	-	-	-
Média	0,91	0,86	0,78	0,92	0,83	0,76

Tabela 7.8 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,79	0,59	0,55	0,85	0,57	0,57
Cenesp15	0,79	0,82	0,66	0,85	0,81	0,67
Scania	0,82	0,66	0,67	0,85	0,68	0,75
Barueri	0,74	0,82	0,68	0,81	0,82	0,71
Paranapiacaba	0,91	0,93	0,87	-	-	-
Média	0,81	0,76	0,69	0,84	0,72	0,67

As Tabelas 7.9 e 7.10 comparam as estatísticas de *fade-slope* dos modelos através da variação dos valores RMS da variável de teste a cada dois modelos.

Tabela 7.9 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* – resultados gerais por enlace

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	-16,3	-10,0	+7,5	-23,3	-15,1	+10,6
Cenesp15	-1,1	-14,3	-13,3	-5,3	-17,9	-13,3
Scania	-14,0	-12,8	+1,4	-13,6	-9,1	+5,3
Barueri	+4,2	-23,2	-26,3	-1,0	-25,0	-24,2
Paranapiacaba	-2,9	-11,7	-9,0	-	-	-
Varição da média	-5,5	-14,3	-9,3	-9,8	-17,4	-8,4

Tabela 7.10 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de *fade-slope* – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	-25,3	-30,4	-6,8	-32,9	-32,9	0,0
Cenesp15	+3,8	-16,5	-19,5	-4,7	-21,2	-17,3
Scania	-19,5	-18,3	+1,5	-20,9	-12,8	+10,3
Barueri	+10,8	-8,1	-17,1	+1,2	-12,3	-13,4
Paranapiacaba	+2,2	-4,4	-6,5	-	-	-
Varição da média	-6,2	-14,8	-9,2	-14,3	-20,2	-6,9

Os dados apresentados nas Tabelas 7.9 e 7.10 mostram uma redução dos valores RMS da variável de teste proporcionada pelo modelo GC em relação ao modelo EMB em todas as situações analisadas permitindo afirmar que o modelo GC aperfeiçoa a sintetização de séries temporais em relação ao modelo EMB.

Quando comparado com o modelo TMB, o modelo GC proporciona resultados melhores na maior parte das situações analisadas, incluindo a variação da média geral dos enlaces.

Nas comparações entre os modelos EMB e TMB observa-se que os melhores resultados variam conforme o enlace considerado. No caso dos enlaces Bradesco e Scania, entretanto, o modelo TMB tem desempenho bem superior.

7.4. Resultados das estatísticas de duração de desvanecimentos

A avaliação das estatísticas de duração de desvanecimentos das séries temporais sintetizadas por cada modelo em relação às estatísticas das séries temporais experimentais é realizada de forma análoga ao caso das estatísticas de *fade-slope* que foi descrito no item anterior.

7.4.1. Número de desvanecimentos

A Figura 7.6 apresenta gráficos das distribuições de número de desvanecimentos das séries temporais experimental e sintetizadas para 10 anos pelos três modelos para o enlace Cenesp15. Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice D.

É possível observar que na maioria dos gráficos os modelos apresentam desempenho semelhante. Somente nos enlaces Scania e Barueri é percebida uma diferença nos desvanecimentos de maior duração.

Para dimensionar a diferença entre as estatísticas das séries temporais experimental e sintetizadas no caso do número de desvanecimentos, a variável de teste ε_N é calculada para cada nível de atenuação e de duração de desvanecimento conforme a Equação 7.4 [24].

$$\varepsilon_N(D, A) = \ln \left(\frac{P_{sint}(D|A)}{P_{exp}(D|A)} \right) \quad (7.4)$$

onde P_{sint} e P_{exp} são as probabilidades de ocorrência de desvanecimentos de duração maior que D (s) dada que a atenuação é maior que A (dB) nas séries temporais sintetizadas e experimentais, respectivamente.

Os níveis de duração considerados na análise foram: 60, 120, 180, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2400 e 3600 segundos. Os níveis de atenuação são os mesmos que foram considerados nas estatísticas de *fade-slope*.

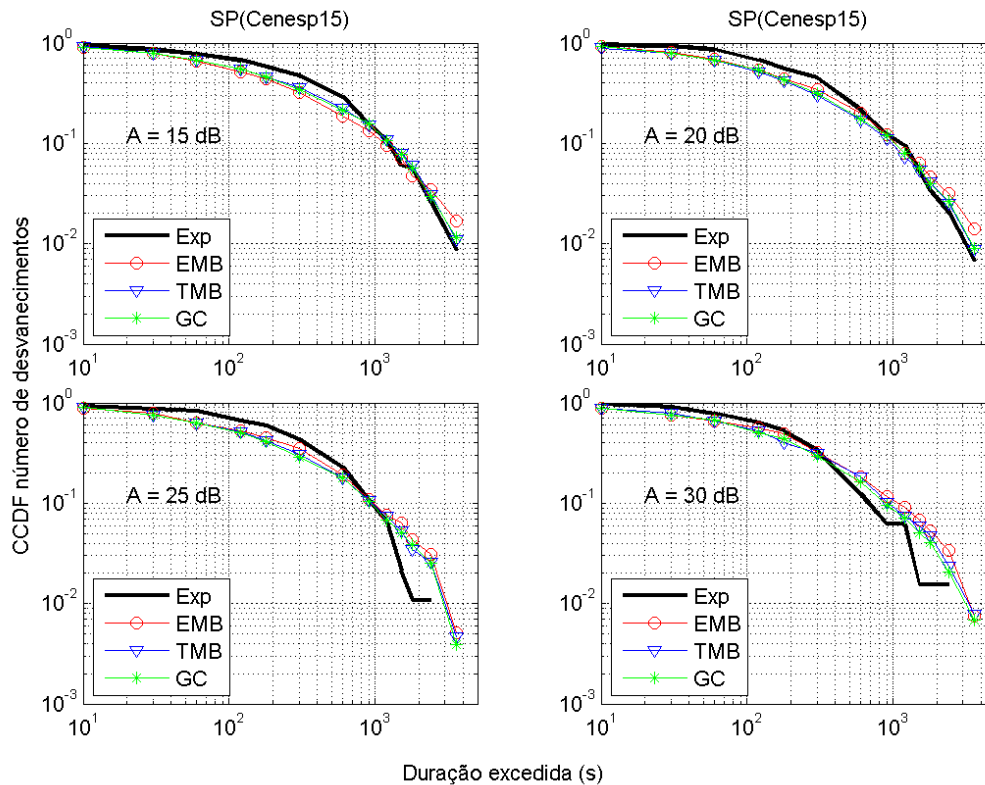


Figura 7.6 – Distribuições de número de desvanecimentos experimental e sintetizadas – Cenesp15

O desempenho dos modelos em cada nível de atenuação e de duração de desvanecimento pode ser avaliado através dos gráficos dos valores da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos (ε_{FDN}). Os gráficos referentes às séries temporais sintetizadas para 10 anos pelos três modelos para o enlace Cenesp15 estão apresentados na Figura 7.7. Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice E.

As áreas do gráfico marcadas com 's' são referentes a níveis que existem nos dados sintetizados, mas não existem nos experimentais.

Considerando o conjunto de enlaces, os modelos EMB e TMB apresentam desempenhos semelhantes. O modelo GC tem desempenho inferior nos enlaces Scania e Barueri e nos níveis de atenuação iguais a 3 e 5 dB. Também é possível observar que desvanecimentos com durações mais longas, que não estão presentes nos dados experimentais, são sintetizados pelos três modelos.

Para avaliar o desempenho dos modelos em função dos níveis de atenuação, é realizado um procedimento análogo ao das estatísticas de *fade-slope*. A Tabela 7.11 apresenta os valores RMS da variável de teste para o enlace Cenesp15.

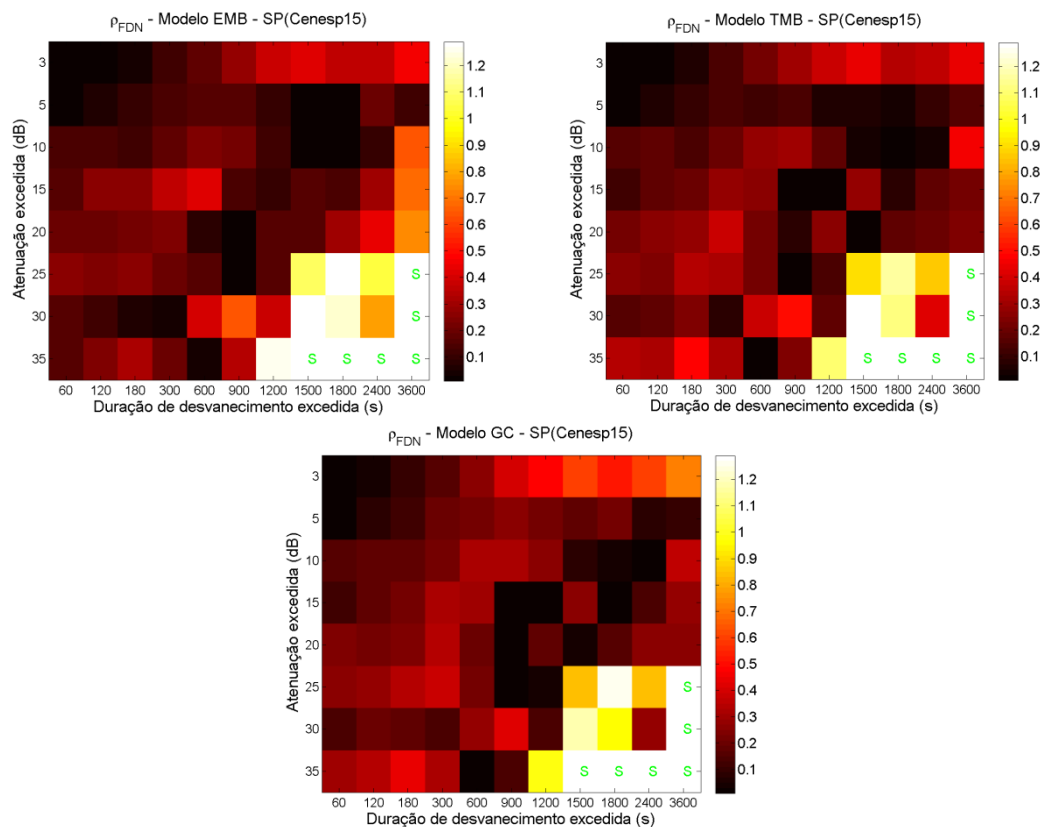


Figura 7.7 – Valores da variável de teste – número de desvanecimentos – Cenesp15

Tabela 7.11 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos para cada nível de atenuação – Cenesp15

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
3	0,30	0,30	0,44	0,31	0,31	0,46
5	0,12	0,11	0,18	0,13	0,12	0,17
10	0,24	0,23	0,24	0,25	0,24	0,25
15	0,32	0,20	0,21	0,27	0,21	0,21
20	0,32	0,24	0,22	0,37	0,23	0,22
25	0,67	0,58	0,60	0,73	0,60	0,60
30	0,72	0,62	0,54	0,71	0,52	0,47
35	0,53	0,51	0,47	0,49	0,42	0,41
Geral	0,48	0,42	0,42	0,49	0,39	0,41
≥ 10 dB	0,53	0,45	0,42	0,53	0,42	0,41

As tabelas dos demais enlaces estão no Apêndice E.

No caso do enlace Cenesp15, cujos dados estão apresentados na Tabela 7.11, os modelo TMB e GC apresentam resultados próximos entre si e melhores do que o modelo EMB, o que também pode ser observado nos gráficos da Figura 7.5. Quando são analisadas as tabelas dos demais enlaces é observado que o modelo de melhor desempenho varia de acordo com o enlace. As Tabelas 7.12 e 7.13 apresentam um resumo com os resultados gerais de cada enlace.

Tabela 7.12 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,52	0,50	0,52	0,53	0,49	0,52
Cenesp15	0,48	0,42	0,42	0,49	0,39	0,41
Scania	0,34	0,35	0,45	0,33	0,34	0,41
Barueri	0,31	0,32	0,35	0,33	0,33	0,34
Paranapiacaba	0,49	0,55	0,59	-	-	-
Média	0,43	0,43	0,47	0,42	0,39	0,42

Tabela 7.13 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,57	0,56	0,52	0,57	0,54	0,52
Cenesp15	0,53	0,45	0,42	0,53	0,42	0,41
Scania	0,38	0,39	0,48	0,37	0,38	0,43
Barueri	0,33	0,33	0,37	0,36	0,35	0,36
Paranapiacaba	0,45	0,52	0,58	-	-	-
Média	0,45	0,45	0,47	0,46	0,42	0,43

Quando é analisado o conjunto de enlaces e os dois tamanhos de séries temporais é observado que o desempenho dos modelos varia conforme o enlace. Na média geral, entretanto, os modelos têm desempenho muito próximo.

Analisando os resultados das séries temporais de 10 anos é possível observar que o modelo EMB tem resultado melhor nos três enlaces mais longos (Scania, Barueri e Paranapiacaba) e pior nos dois mais curtos (Bradesco e Cenesp15).

Os valores RMS das variáveis de teste nestas estatísticas são sempre menores do que nas estatísticas de *fade-slope* indicando que no caso de número de desvanecimentos os três modelos apresentam um desempenho melhor.

As Tabelas 7.14 e 7.15 comparam as estatísticas de número de desvanecimentos através da variação dos valores RMS para cada dois modelos.

Tabela 7.14 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	-3,8	0,0	+4,0	-7,5	-1,9	+6,1
Cenesp15	-12,5	-12,5	0,0	-20,4	-16,3	+5,1
Scania	+2,9	+32,4	+28,6	+3,0	+24,2	+20,6
Barueri	+3,2	+12,9	+9,4	0,0	+3,0	+3,0
Paranapiacaba	+12,2	+20,4	+7,3	-	-	-
Variação da média	0,0	+9,3	+9,3	-7,1	0,0	+7,7

Tabela 7.15 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de número de desvanecimentos – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	-1,8	-8,8	-7,1	-5,3	-8,8	-3,7
Cenesp15	-15,1	-20,8	-6,7	-20,8	-22,6	-2,4
Scania	+2,6	+26,3	+23,1	+2,7	+16,2	+13,2
Barueri	0,0	+12,1	+12,1	-2,8	0,0	+2,9
Paranapiacaba	+15,6	+28,9	+11,5	-	-	-
Variação da média	0,0	+4,4	+4,4	-8,7	-6,5	+2,4

As Tabelas 7.14 e 7.15 confirmam que os melhores resultados variam conforme o enlace que é analisado. Não há uma tendência dominante para o conjunto.

7.4.2. Tempo relativo de desvanecimento

A Figura 7.8 apresenta gráficos das distribuições de tempo relativo de desvanecimento das séries temporais experimental e sintetizadas para 10 anos pelos três modelos para o enlace Cenesp15.

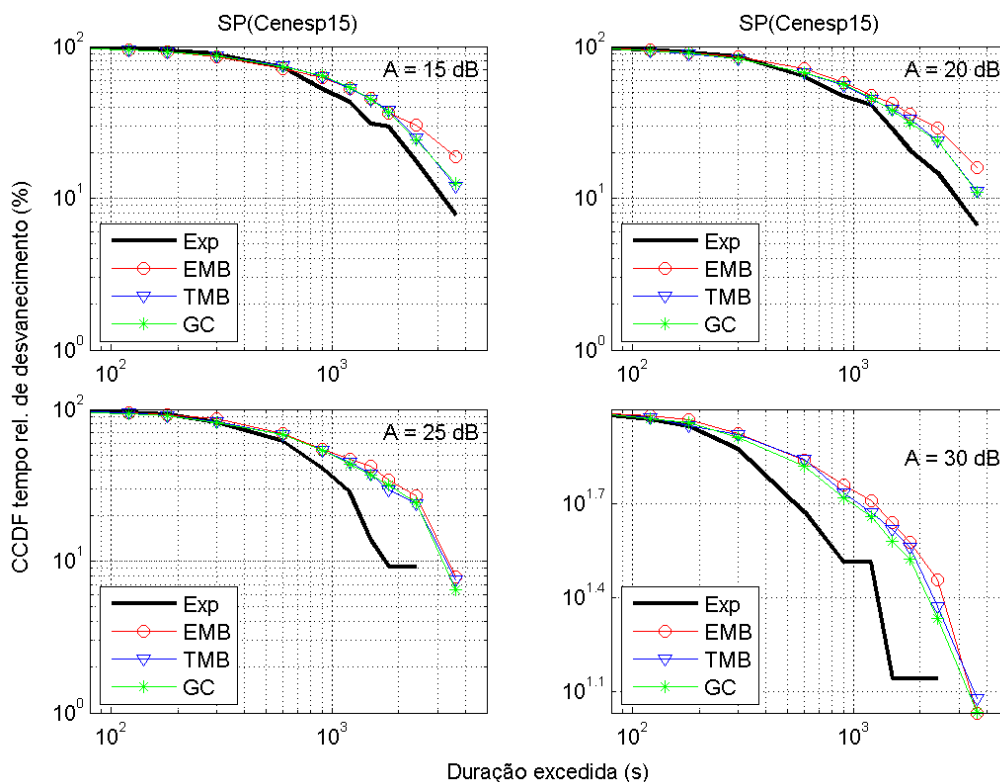


Figura 7.8 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento experimental e sintetizadas – Cenesp15

Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice D.

É possível observar em alguns gráficos dos cinco enlaces que os modelos apresentam desempenhos semelhantes, mas o modelo GC tem resultados mais próximos dos dados experimentais em alguns casos, especialmente no caso do enlace Barueri.

Para dimensionar a diferença entre as estatísticas de tempo relativo de desvanecimento das séries temporais experimental e sintetizadas, a variável de teste ε_T é calculada para cada nível de atenuação e de duração de desvanecimento conforme a Equação 7.5 [24].

$$\varepsilon_T(D, A) = \ln \left(\frac{100 - F_{sint}(D|A)}{100 - F_{exp}(D|A)} \right) \quad (7.5)$$

onde F_{sint} e F_{exp} são os percentuais totais de tempo de desvanecimento devido a desvanecimentos de duração maior que D (s) dada que a atenuação é maior que A (dB) nas séries temporais sintetizadas e experimentais, respectivamente.

Os níveis de duração e de atenuação são os mesmos que foram considerados nas estatísticas de número de desvanecimentos.

O desempenho dos modelos em cada nível de duração de desvanecimento e de atenuação pode ser avaliado através de gráficos dos valores da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento (ε_{FDT}). Os gráficos referentes às séries temporais sintetizadas para 10 anos pelos três modelos para o enlace Censep15 estão apresentados na Figura 7.9.

As áreas dos gráficos marcadas com 's' são referentes a níveis que existem nos dados sintetizados, mas não existem nos experimentais.

Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice E.

Nos enlaces Bradesco, Cenesp15 e Paranapiacaba o desempenho dos modelos é semelhante, mas a diferença é significativa no caso do enlace Barueri onde o modelo GC é melhor. No caso do enlace Scania, os modelos EMB e TMB são melhores nos desvanecimentos de duração inferior a 600 segundos enquanto o modelo GC é melhor nos desvanecimentos acima deste valor.

O desempenho do modelo GC é sempre melhor para desvanecimentos de durações superiores a 600 segundos em relação a seu próprio desempenho nos desvanecimentos mais curtos. No caso dos níveis de atenuação, o modelo GC tem desempenho inferior aos demais modelos no nível de 3 dB.

A Tabela 7.16 apresenta os valores RMS da variável de teste para o enlace Cenesp15.

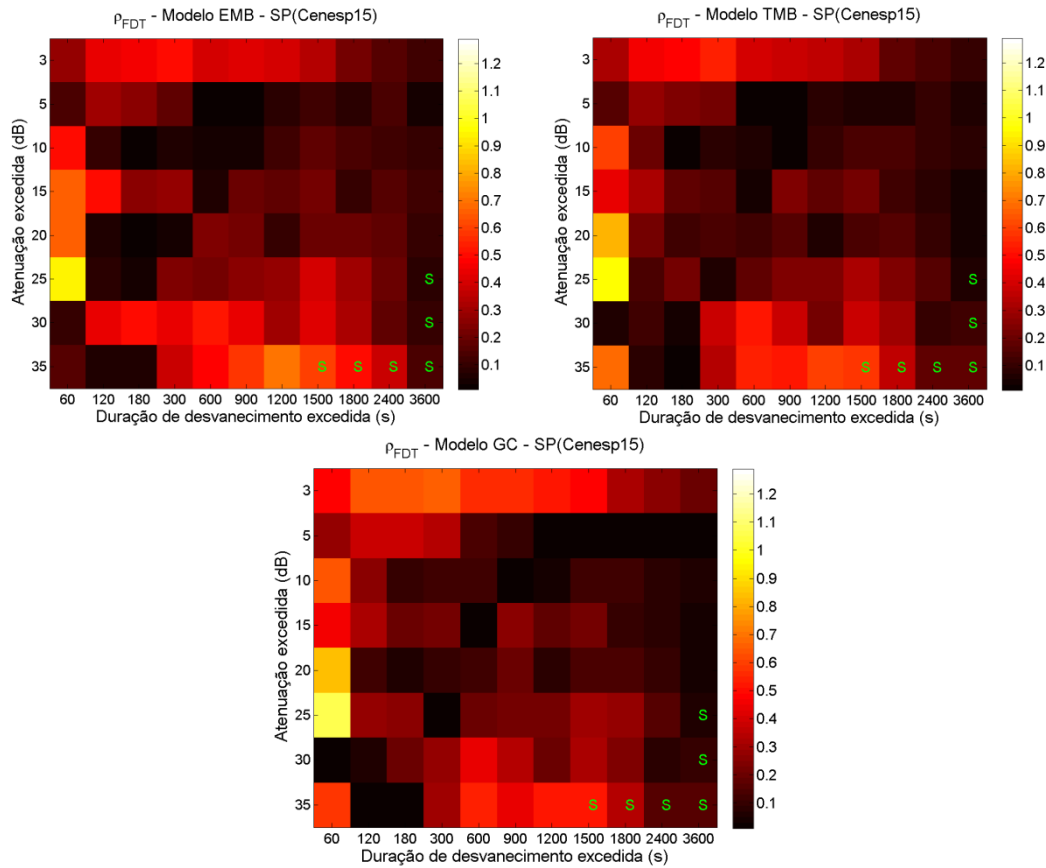


Figura 7.9 – Valores da variável de teste – tempo rel. de desvanecimento – Cenesp15

Tabela 7.16 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento para cada nível de atenuação – Cenesp15

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
3	0,37	0,37	0,52	0,38	0,38	0,52
5	0,16	0,15	0,22	0,16	0,16	0,23
10	0,19	0,21	0,23	0,19	0,24	0,25
15	0,31	0,22	0,24	0,23	0,24	0,24
20	0,26	0,29	0,28	0,30	0,28	0,29
25	0,37	0,36	0,39	0,35	0,35	0,36
30	0,38	0,29	0,25	0,36	0,23	0,21
35	0,44	0,44	0,39	0,40	0,33	0,31
Geral	0,39	0,35	0,39	0,37	0,32	0,37
≥ 10 dB	0,37	0,34	0,33	0,34	0,29	0,30

A Tabela 7.16 mostra que os modelos apresentam desempenho muito próximo quando é considerado o conjunto de atenuações. Quando são analisados separadamente os níveis, diferenças de desempenho são observadas.

As tabelas dos demais enlaces estão no Apêndice E.

As Tabelas 7.17 e 7.18 apresentam um resumo dos resultados gerais de cada enlace e mostram que o desempenho dos três modelos é muito próximo nas estatísticas de tempo relativo de desvanecimento.

Tabela 7.17 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,57	0,55	0,59	0,55	0,50	0,57
Cenesp15	0,39	0,35	0,39	0,37	0,32	0,37
Scania	0,36	0,37	0,45	0,38	0,37	0,44
Barueri	0,42	0,43	0,42	0,47	0,45	0,41
Paranapiacaba	0,33	0,37	0,41	-	-	-
Média	0,41	0,41	0,45	0,44	0,41	0,45

Tabela 7.18 – Valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Nível (dB)	10 anos			50 anos		
	EMB	TMB	GC	EMB	TMB	GC
Bradesco	0,57	0,57	0,56	0,54	0,51	0,52
Cenesp15	0,37	0,34	0,33	0,34	0,29	0,30
Scania	0,41	0,41	0,45	0,41	0,41	0,43
Barueri	0,46	0,46	0,42	0,51	0,49	0,41
Paranapiacaba	0,36	0,41	0,45	-	-	-
Média	0,43	0,44	0,44	0,45	0,42	0,41

As Tabelas 7.19 e 7.20 comparam as estatísticas de tempo relativo de desvanecimento através da variação dos valores RMS para cada dois modelos.

Tabela 7.19 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	-3,5	+3,5	+7,3	-9,1	+3,6	+14,0
Cenesp15	-10,3	0,0	+11,4	-13,5	0,0	+15,6
Scania	+2,8	+25,0	+21,6	-2,6	+15,8	+18,9
Barueri	+2,4	0,0	-2,3	-4,3	-12,8	-8,9
Paranapiacaba	+12,1	+24,2	+10,8	-	-	-
Varição da média	0,0	+9,8	+9,8	-6,8	+2,3	+9,8

Tabela 7.20 – Variação percentual dos valores RMS da variável de teste das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento – resultados gerais por enlace para $A \geq 10$ dB

Enlace	10 anos			50 anos		
	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC	EMB ↓ TMB	EMB ↓ GC	TMB ↓ GC
Bradesco	0,0	-1,8	-1,8	-5,6	-3,7	+2,0
Cenesp15	-8,1	-10,8	-2,9	-14,7	-11,8	+3,4
Scania	0,0	+9,8	+9,8	0,0	+4,9	+4,9
Barueri	0,0	-8,7	-8,7	-3,9	-19,6	-16,3
Paranapiacaba	+13,9	+25,0	+9,8	-	-	-
Varição da média	+2,3	+2,3	0,0	-6,7	-8,9	-2,4

Os dados das Tabelas 7.19 e 7.20 confirmam que os melhores resultados variam conforme o enlace que é analisado. Os únicos pontos que se destacam são o desempenho superior do modelo EMB no caso do enlace Paranapiacaba e o desempenho inferior do modelo GC no enlace Scania.

Os valores RMS das variáveis de teste destas estatísticas são muito próximos dos valores obtidos nas estatísticas de número de desvanecimentos. Isto indica que nas estatísticas de duração de desvanecimentos os modelos têm desempenho superior ao desempenho nas estatísticas de *fade-slope*.

7.5. Resumo dos resultados

O conjunto de resultados apresentados nos itens anteriores indica que as estatísticas estacionárias de atenuação por chuvas das séries temporais sintetizadas pelo modelo TMB são mais próximas das estatísticas dos dados experimentais que as estatísticas das séries sintetizadas pelo modelo EMB. Os resultados são especialmente melhores quando são consideradas as atenuações mais altas. O modelo GC, entretanto, é o que apresenta os melhores resultados para níveis de atenuação por chuva superiores a 1,9 dB nos dois enlaces mais curtos (Bradesco e Cenesp15), 3,5 dB no enlace Paranapiacaba e 4,7 dB nos enlaces Scania e Barueri.

O desempenho do modelo GC também é superior ao desempenho dos modelos EMB e TMB nas estatísticas de *fade-slope*. Quando ele é comparado com o modelo EMB, os resultados são sempre melhores. Quando a comparação é com o modelo TMB, o desempenho é melhor no conjunto de enlaces analisados e sempre melhor quando são considerados somente os níveis de atenuação iguais ou superiores a 10 dB.

Quando a análise dos resultados das estatísticas de *fade-slope* é feita considerando os níveis de atenuação é possível observar que o modelo TMB tem seu melhor desempenho nas atenuações médias enquanto o modelo GC se destaca nas atenuações mais altas. Quando são observados os níveis de *fade-slope* verifica-se que os três modelos pioram o desempenho à medida que aumenta o nível de *fade-slope*.

No caso das estatísticas de duração de desvanecimentos, tanto no caso número de desvanecimentos quanto no caso de tempo relativo de desvanecimento, as análises realizadas indicam que os modelos apresentam desempenhos muito próximos. Quando são considerados os níveis de duração é observado que nas estatísticas de tempo relativo de desvanecimento os modelos EMB e TMB têm desempenho melhor para desvanecimentos com durações abaixo de 600 segundos enquanto o modelo GC é melhor nos níveis de duração acima de 600 segundos.

É observado também que tanto no caso das estatísticas de número de desvanecimentos quanto nas estatísticas de tempo relativo de desvanecimento, os valores RMS das variáveis de teste dos três modelos são quase sempre inferiores aos valores obtidos nas estatísticas de *fade-slope* o que indica que os três modelos

proporcionam resultados melhores nas estatísticas de duração de desvanecimentos.

7.6. Sensibilidade dos modelos à variação do parâmetro dinâmico β

Para avaliar a sensibilidade das estatísticas dinâmicas das séries temporais sintetizadas pelos modelos EMB, TMB e GC à variação dos valores do parâmetro dinâmico β , foram realizadas sintetizações sucessivas de séries temporais de 10 anos (exceto no enlace Paranapiacaba, onde, devido à sua maior taxa de amostragem, o tamanho escolhido para a série foi um ano) variando β com incrementos de $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ dentro de uma faixa ampla de valores em torno dos valores extraídos por cada modelo.

A cada sintetização realizada, as estatísticas de *fade-slope* e de duração de eventos foram determinadas e comparadas com as estatísticas experimentais através dos valores RMS das variáveis de teste. A partir do conjunto de valores RMS foi possível identificar os valores de β que produzem as séries temporais com as estatísticas mais próximas das estatísticas das séries experimentais.

A Tabela 7.21 apresenta os valores do parâmetro dinâmico que proporcionam os melhores resultados de cada modelo para cada estatística de cada enlace. Foi considerado como o melhor resultado aquele que tem o menor valor RMS da variável de teste considerando o conjunto de todos os níveis de atenuação. Os níveis de atenuação, duração e *fade-slope* são os mesmos que foram considerados nas análises comparativas apresentadas neste mesmo capítulo.

Os melhores valores do parâmetro dinâmico para as estatísticas de *fade-slope*, número de desvanecimentos e tempo relativo de desvanecimento são denominados na tabela como β_{FS} , β_{FDN} , β_{FDT} , respectivamente, enquanto os valores dos parâmetros extraídos pelos modelos são denominados β_{EXT} .

Em diversos casos apresentados na tabela os melhores parâmetros dinâmicos das estatísticas de *fade-slope* apresentam valores distantes dos valores dos melhores parâmetros das estatísticas de duração de desvanecimentos indicando que nestes casos os modelos não conseguem maximizar seu desempenho para ambas estatísticas ao mesmo tempo.

Tabela 7.21 – Parâmetro β : valores extraídos x melhores valores para cada estatística

Enlace	Modelo	β_{EXT} ($\times 10^{-4} s^{-1}$)	β_{FS}	β_{FDN}	β_{FDT}	β_{FS}	β_{FDN}	β_{FDT}
			($\times 10^{-4} s^{-1}$)	($\times 10^{-4} s^{-1}$)	($\times 10^{-4} s^{-1}$)	($\times 10^{-4} s^{-1}$)	($\times 10^{-4} s^{-1}$)	($\times 10^{-4} s^{-1}$)
			<i>todos os níveis de atenuação</i>			<i>$A \geq 10$ dB</i>		
Bradesco	EMB	1,16	0,76	1,24	1,15	0,49	1,60	1,57
	TMB	1,26	1,48	1,39	1,21	1,48	1,78	1,33
	GC	1,47	1,36	1,27	1,00	1,66	1,78	1,75
Cenesp15	EMB	1,20	0,85	1,54	1,12	0,85	1,69	1,39
	TMB	1,52	2,14	1,75	1,36	2,14	1,84	1,60
	GC	1,58	2,40	1,68	1,35	2,37	1,83	1,74
Scania	EMB	0,64	0,65	0,50	0,77	0,32	0,50	0,77
	TMB	0,66	0,56	0,53	0,71	0,56	0,53	0,68
	GC	1,11	0,76	0,67	0,70	0,79	0,73	0,73
Barueri	EMB	0,54	0,62	0,62	0,77	0,62	0,62	0,77
	TMB	0,57	1,19	0,68	0,89	1,07	0,68	0,74
	GC	1,06	0,87	0,72	0,72	0,87	0,72	0,72
Paranapia- caba	EMB	0,56	0,62	0,56	0,56	0,53	0,53	0,56
	TMB	0,68	1,07	0,71	0,53	0,80	0,44	0,53
	GC	0,77	1,50	0,54	0,54	1,35	0,54	0,54

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos em cada estatística em comparação com os resultados que seriam obtidos caso os modelos tivessem extraídos parâmetros dinâmicos com valores iguais aos valores ótimos, foram calculados os valores RMS das variáveis de teste para as estatísticas das séries temporais sintetizadas com cada parâmetro dinâmico de melhor desempenho.

Os valores RMS das variáveis de teste (ρ) para cada valor de parâmetro dinâmico que foi mostrado na Tabela 7.21 estão apresentados nas Tabelas 7.22 e 7.23. Nestas tabelas $\rho_{\beta_{ext}}$ é o valor RMS referente à sintetização com o parâmetro β extraído por cada modelo e $\rho_{m\beta}$ é referente à sintetização com o melhor β de cada estatística.

Tabela 7.22 – Comparação entre valores RMS obtidos nas estatísticas dinâmicas – resultados gerais

Enlace	Modelo	<i>fade-slope</i>			número de desvanecimentos			tempo relativo de desvanecimento		
		$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$	$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$	$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$
Bradesco	EMB	0,80	0,71	-11	0,52	0,51	-2	0,57	0,56	-2
	TMB	0,67	0,61	-9	0,50	0,48	-4	0,55	0,55	0
	GC	0,72	0,69	-4	0,52	0,50	-4	0,59	0,56	-5
Cenesp15	EMB	0,91	0,88	-3	0,48	0,43	-10	0,39	0,38	-3
	TMB	0,90	0,82	-9	0,42	0,39	-7	0,35	0,35	0
	GC	0,78	0,72	-8	0,42	0,42	0	0,39	0,38	-3
Scania	EMB	0,86	0,80	-7	0,34	0,32	-6	0,36	0,34	-6
	TMB	0,74	0,72	-3	0,35	0,32	-9	0,37	0,36	-3
	GC	0,75	0,47	-37	0,45	0,32	-29	0,45	0,35	-22
Barueri	EMB	0,95	0,91	-4	0,31	0,29	-6	0,42	0,36	-14
	TMB	0,99	0,85	-14	0,32	0,30	-6	0,43	0,36	-16
	GC	0,73	0,66	-10	0,35	0,28	-20	0,42	0,39	-7
Paranapia-caba	EMB	1,03	1,03	0	0,49	0,42	-14	0,33	0,29	-12
	TMB	1,00	0,97	-3	0,55	0,43	-22	0,37	0,29	-22
	GC	0,91	0,89	-2	0,59	0,43	-27	0,41	0,29	-29

Os valores apresentados nas Tabelas 7.22 e 7.23 indicam que o uso dos valores ótimos do parâmetro dinâmico de cada estatística, modelo e enlace proporciona uma melhora nos resultados dos três modelos.

No caso das estatísticas de *fade-slope* o uso dos valores ótimos dos parâmetros dinâmicos de cada modelo continua mantendo o modelo GC como sendo o que proporciona os melhores resultados seguido pelo modelo TMB. Nas estatísticas de duração de desvanecimentos os valores ótimos fazem com que os três modelos continuem a proporcionar resultados muito próximos.

O conjunto de sintetizações realizado permitiu traçar gráficos dos valores RMS das variáveis de teste em função dos valores de β . Os gráficos referentes ao enlace Cenesp15 estão apresentados nas Figuras 7.10 e 7.11.

Os gráficos dos demais enlaces estão apresentados no Apêndice F.

Tabela 7.23 – Comparação entre valores RMS obtidos nas estatísticas dinâmicas – resultados gerais para $A \geq 10$ dB

Enlace	Modelo	<i>fade-slope</i>			número de desvanecimentos			tempo relativo de desvanecimento		
		$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$	$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$	$\rho_{\beta\text{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\Delta\rho(\%)$
Bradesco	EMB	0,79	0,58	-27	0,57	0,49	-14	0,57	0,56	-2
	TMB	0,59	0,52	-12	0,56	0,48	-14	0,57	0,55	-4
	GC	0,55	0,51	-7	0,52	0,47	-10	0,56	0,55	-2
Cenesp15	EMB	0,79	0,73	-8	0,53	0,41	-23	0,37	0,34	-8
	TMB	0,82	0,71	-13	0,45	0,40	-11	0,34	0,32	-6
	GC	0,66	0,57	-14	0,42	0,40	-5	0,33	0,33	0
Scania	EMB	0,82	0,67	-18	0,38	0,36	-5	0,41	0,37	-10
	TMB	0,66	0,59	-11	0,39	0,37	-5	0,41	0,40	-2
	GC	0,67	0,39	-42	0,48	0,37	-23	0,45	0,38	-16
Barueri	EMB	0,74	0,70	-5	0,33	0,30	-9	0,46	0,38	-17
	TMB	0,82	0,70	-15	0,33	0,30	-9	0,46	0,39	-15
	GC	0,68	0,60	-12	0,37	0,30	-19	0,42	0,39	-7
Paranapia-caba	EMB	0,91	0,90	-1	0,45	0,41	-9	0,36	0,31	-14
	TMB	0,93	0,90	-3	0,52	0,42	-19	0,41	0,32	-22
	GC	0,87	0,82	-6	0,58	0,41	-29	0,45	0,31	-31

Em todos os enlaces os resultados das estatísticas de duração de desvanecimentos das séries sintetizadas pelos três modelos apresentam uma variação semelhante dentro da faixa de parâmetros dinâmicos analisada. Além disto, os resultados dos três modelos são sempre muito próximos.

Nas estatísticas de *fade-slope*, entretanto, além dos resultados dos modelos apresentarem variações diferentes dentro da faixa de parâmetros dinâmicos considerada, eles mostraram que os modelos são muito sensíveis a pequenas variações no valor do parâmetro dinâmico.

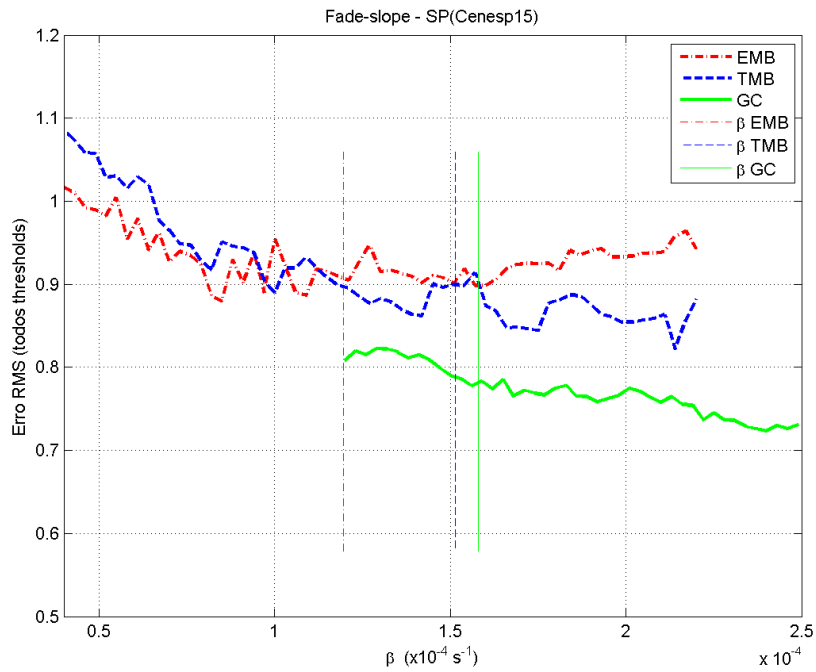


Figura 7.10 – Sensibilidade das estatísticas de *fade-slope* à variação do parâmetro dinâmico – Cenesp15

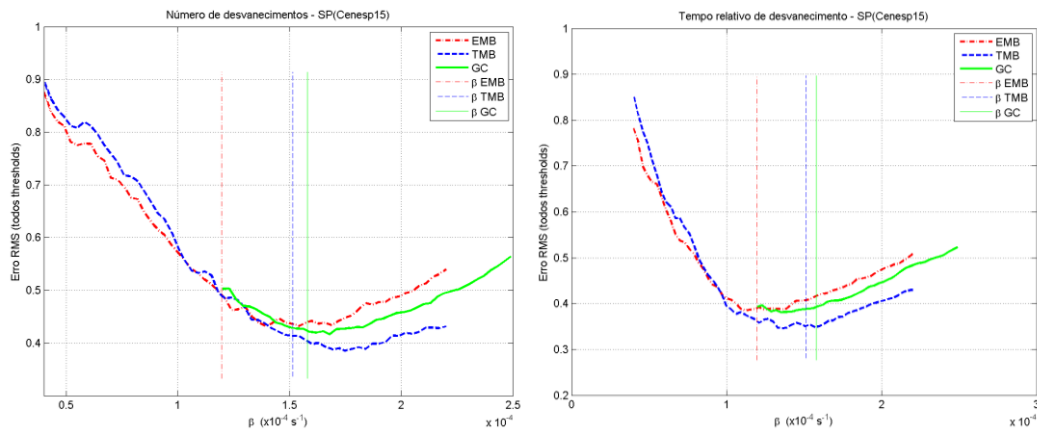


Figura 7.11 – Sensibilidade das estatísticas de duração de desvanecimentos à variação do parâmetro dinâmico – Cenesp15

7.7. Relação entre a distância do enlace e o valor do parâmetro dinâmico β

A Tabela 7.24 apresenta os valores do parâmetro dinâmico β extraídos por cada modelo para cada enlace.

Tabela 7.24 – Valores do parâmetro dinâmico extraídos pelos modelos

Enlace	Distância (km)	β_{EMB} ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	β_{TMB} ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)	β_{GC} ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)
Bradesco	12,79	1,16	1,26	1,47
Cenesp15	12,78	1,20	1,52	1,58
Scania	18,38	0,64	0,66	1,11
Barueri	21,69	0,54	0,57	1,06
Paranapiacaba	42,99	0,56	0,68	0,77

Os valores do parâmetro β indicam a existência de uma relação com as distâncias dos enlaces uma vez que os enlaces mais longos apresentam valores menores do parâmetro nos três modelos.

Se considerarmos a distribuição geográfica dos enlaces que foi apresentada na Figura 3.2, observamos que os percursos dos enlaces Bradesco e Barueri formam um ângulo de 11,7 graus. As células de chuva, portanto, cruzam os enlaces formando ângulos cujos valores em relação à direção dos enlaces são muito próximos. Nestes dois enlaces o valor do β é sempre menor no enlace Barueri, o mais longo, reforçando a hipótese de que o valor do β diminui com o aumento da distância do enlace.

O gráfico apresentado na Figura 7.12 apresenta os valores dos parâmetros extraídos pelos três modelos em função das distâncias dos enlaces. Também estão plotadas no mesmo gráfico duas curvas ajustadas aos valores dos parâmetros de cada modelo. Um ajuste foi realizado através de lei de potência e o outro através de função exponencial conforme as expressões apresentadas nas Equações 7.6 e 7.7:

$$\beta_{pot} = a \cdot d^{-b} \quad (7.6)$$

$$\beta_{expn} = a \cdot e^{-b \cdot d} + c \quad (7.7)$$

onde d é a distância do enlace em quilômetros e a , b e c são parâmetros associados a cada modelo.

Os ajustes foram realizados através de uma biblioteca de funções do Matlab. Os valores dos parâmetros a , b e c estão apresentados nas Tabelas 7.25 e 7.26.

Cada ajuste foi avaliado através do coeficiente de determinação, também chamado R-quadrado. Este coeficiente é um número de 0 a 1 que revela o grau de correspondência entre os valores ajustados e os dados reais. Quanto mais próximo de 1 é o valor de R-quadrado, mais confiável é o ajuste.

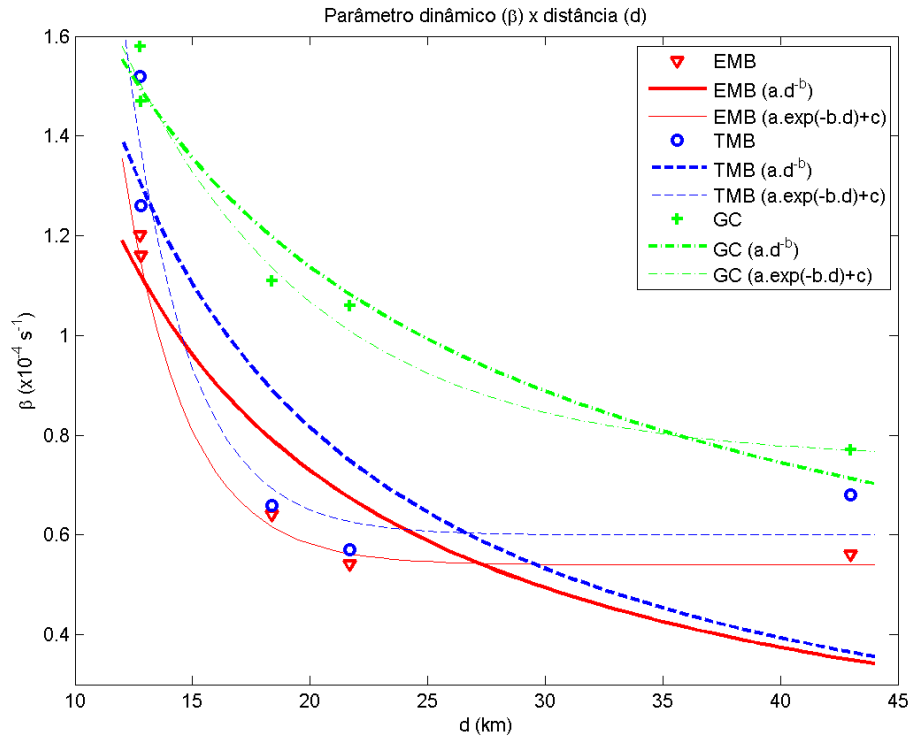


Figura 7.12 – Relação entre distância do enlace e valores dos parâmetros dinâmicos

Tabela 7.25 – Relação $\beta \times d$ – parâmetros do ajuste através de lei de potência

Modelo	a ($\times 10^{-4}$)	b	R-quadrado
EMB	5,4	0,64	0,72
TMB	5,8	0,62	0,59
GC	6,7	0,59	0,95

Tabela 7.26 – Relação $\beta \times d$ – parâmetros do ajuste exponencial

Modelo	a ($\times 10^{-4}$)	b	c	R-quadrado
EMB	69,0	0,37	0,54	0,99
TMB	100,0	0,38	0,60	0,94
GC	3,5	0,12	0,75	0,98

O ajuste através de lei de potência teve bom resultado apenas no caso do modelo GC enquanto o ajuste exponencial proporcionou bons resultados para os três modelos.

O valor do parâmetro a do modelo TMB no ajuste exponencial teve que ser limitado para que ocorresse a convergência no processo de ajuste de curva feito pelo Matlab. Valores muito superiores a 100 podem ser obtidos embora o aumento do valor de R-quadrado seja inferior a 0,01 indicando que a melhora no ajuste não é relevante.

O aprofundamento da análise da relação entre a distância do enlace e o valor do parâmetro dinâmico levou em consideração os valores ótimos do parâmetro para cada enlace, modelo e tipo de estatística. Estes valores foram apresentados na Tabela 7.21.

Novas curvas foram ajustadas ao conjunto de valores ótimos através das funções apresentadas nas Equações 7.6 e 7.7.

As Tabelas 7.27 e 7.28 apresentam os valores dos parâmetros de cada ajuste.

Tabela 7.27 – Relação $\beta_{OT} \times d$ – parâmetros do ajuste através de lei de potência

Modelo	a ($\times 10^{-4}$)	b	R-quadrado
EMB	7,0	0,74	0,52
TMB	13,2	0,87	0,46
GC	9,4	0,75	0,31

Tabela 7.28 – Relação $\beta_{OT} \times d$ – parâmetros do ajuste exponencial

Modelo	a ($\times 10^{-4}$)	b	c	R-quadrado
EMB	106	0,419	0,61	0,65
TMB	1500	0,590	0,75	0,66
GC	1500	0,596	0,77	0,51

O ajuste exponencial também teve o melhor resultado nesta análise.

Nos modelos TMB e GC o valor do parâmetro a também teve que ser limitado para que ocorresse a convergência no processo de ajuste de curva feito

pelo Matlab. Valores muito superiores podem ser obtidos sem, entretanto, proporcionarem um aumento superior a 0,01 no valor de R-quadrado.

As Figuras 7.13 a 7.15 apresentam os gráficos dos ajustes para cada modelo. Para facilitar a comparação, foram incluídas nos gráficos as curvas de ajuste de cada modelo que foram apresentadas na Figura 7.12. Nestes gráficos, P_{EXT} é referente aos parâmetros extraídos pelos modelos e P_{OTM} são os valores ótimos do parâmetro dinâmico. FS, FDn e FDt fazem referência às estatísticas de *fade-slope*, número de desvanecimentos e tempo relativo de desvanecimento, respectivamente.

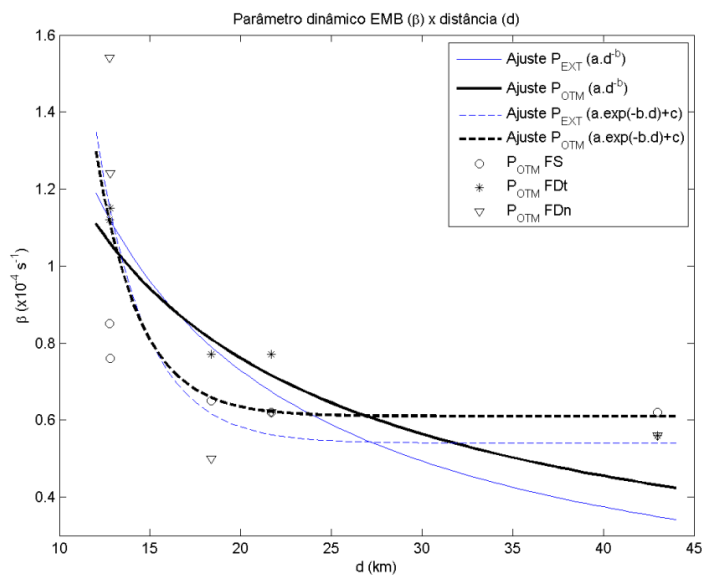


Figura 7.13 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – EMB

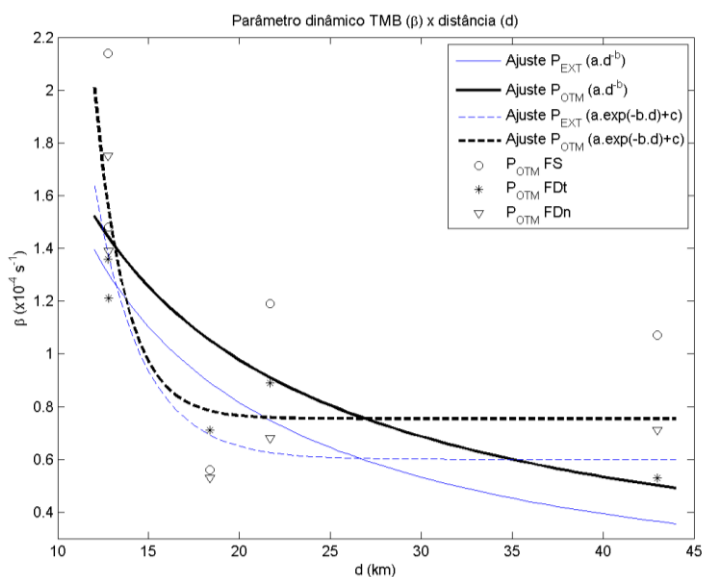


Figura 7.14 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – TMB

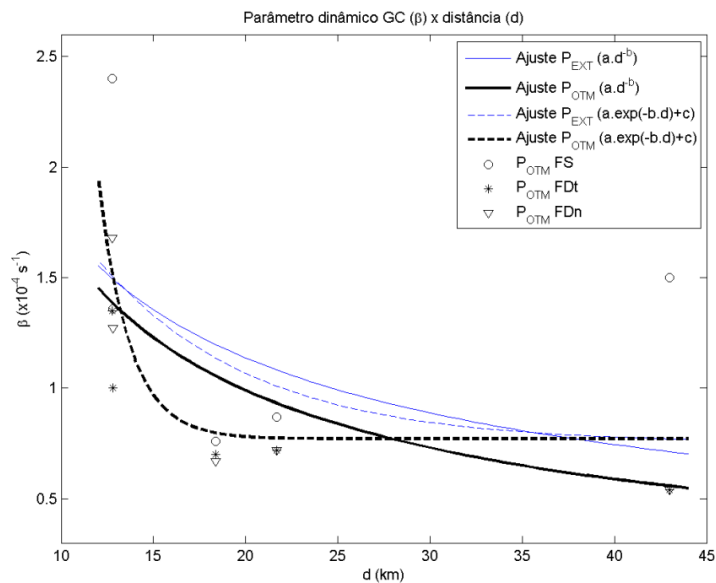


Figura 7.15 – Relação distância dos enlaces x valores dos parâmetros dinâmicos – GC

Quando as curvas ajustadas aos valores extraídos pelos modelos são comparadas com as curvas ajustadas ao conjunto de valores ótimos é possível verificar que as diferenças são menores no modelo EMB em ambos os tipos de ajuste (lei de potência e exponencial). A maior diferença gráfica ocorre entre as curvas de ajuste exponencial no modelo GC para distâncias entre aproximadamente 15 e 25 km.

Para avaliar o impacto que as funções ajustadas têm nos resultados dos modelos, os valores do parâmetro dinâmico dos enlaces foram calculados através da função de ajuste exponencial. Estes parâmetros foram utilizados na sintetização de séries temporais de atenuação e os valores RMS das variáveis de teste das estatísticas dinâmicas foram calculados. A função de ajuste exponencial foi escolhida por ter proporcionado ajustes melhores que a função de lei de potência conforme os valores de R-quadrado apresentados nas Tabelas 7.25 a 7.28.

Os valores do parâmetro dinâmico que foram calculados através da função de ajuste exponencial da Equação 7.7 para cada enlace e modelo utilizando os parâmetros das Tabelas 7.26 e 7.28 estão apresentados na Tabela 7.29.

A Tabela 7.30 apresenta os valores RMS das variáveis de teste referentes às estatísticas de *fade-slope* (FS), número de desvanecimentos (FDn) e tempo relativo de desvanecimento (FDt).

Tabela 7.29 – Parâmetro β : valores extraídos x valores por ajuste exponencial

Enlace	Modelo	β_{ext} ($\times 10^{-4} s^{-1}$)	β_{ae} ($\times 10^{-4} s^{-1}$)	β_{ao} ($\times 10^{-4} s^{-1}$)
Bradesco	EMB	1,16	1,15	1,11
	TMB	1,26	1,37	1,55
	GC	1,47	1,50	1,51
Cenesp15	EMB	1,20	1,15	1,11
	TMB	1,52	1,38	1,55
	GC	1,58	1,51	1,51
Scania	EMB	0,64	0,62	0,66
	TMB	0,66	0,69	0,78
	GC	1,11	1,14	0,80
Barueri	EMB	0,54	0,56	0,62
	TMB	0,57	0,63	0,76
	GC	1,06	1,01	0,77
Paranapia- caba	EMB	0,56	0,54	0,61
	TMB	0,68	0,60	0,75
	GC	0,77	0,77	0,77

Tabela 7.30 – Comparação entre valores RMS das estatísticas dinâmicas – parâmetros extraídos x parâmetros ajustados

Enlace	Modelo	FS				FDn				FDt			
		$\rho_{\beta_{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\rho_{\beta_{ae}}$	$\rho_{\beta_{ao}}$	$\rho_{\beta_{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\rho_{\beta_{ae}}$	$\rho_{\beta_{ao}}$	$\rho_{\beta_{ext}}$	$\rho_{m\beta}$	$\rho_{\beta_{ae}}$	$\rho_{\beta_{ao}}$
Bradesco	EMB	0,80	0,71	0,80	0,80	0,52	0,51	0,52	0,52	0,57	0,56	0,56	0,57
	TMB	0,67	0,61	0,64	0,65	0,50	0,48	0,48	0,48	0,55	0,55	0,55	0,57
	GC	0,72	0,69	0,72	0,72	0,52	0,50	0,52	0,52	0,59	0,56	0,59	0,59
Cenesp15	EMB	0,91	0,88	0,92	0,92	0,48	0,43	0,51	0,52	0,39	0,38	0,39	0,38
	TMB	0,90	0,82	0,86	0,90	0,42	0,39	0,44	0,41	0,35	0,35	0,35	0,35
	GC	0,78	0,72	0,79	0,79	0,42	0,42	0,43	0,43	0,39	0,38	0,39	0,39
Scania	EMB	0,86	0,80	0,83	0,80	0,34	0,32	0,34	0,34	0,36	0,34	0,38	0,36
	TMB	0,74	0,72	0,76	0,74	0,35	0,32	0,34	0,35	0,37	0,36	0,36	0,36
	GC	0,75	0,47	0,78	0,51	0,45	0,32	0,46	0,36	0,45	0,35	0,46	0,38
Barueri	EMB	0,95	0,91	0,98	0,91	0,31	0,29	0,31	0,29	0,42	0,36	0,42	0,40
	TMB	0,99	0,85	0,97	0,92	0,32	0,30	0,31	0,30	0,43	0,36	0,42	0,36
	GC	0,73	0,66	0,74	0,73	0,35	0,28	0,34	0,29	0,42	0,39	0,40	0,37
Parana- piacaba	EMB	1,03	1,03	1,03	1,03	0,49	0,42	0,43	0,43	0,33	0,29	0,29	0,29
	TMB	1,00	0,97	1,02	0,98	0,55	0,43	0,45	0,44	0,37	0,29	0,30	0,30
	GC	0,91	0,89	0,92	0,92	0,59	0,43	0,47	0,47	0,41	0,29	0,33	0,33

Na Tabela 7.29, β_{ae} é o valor do β calculado através de função de ajuste exponencial aos parâmetros extraídos (Tabela 7.26) enquanto β_{ao} é o valor calculado através da função de ajuste exponencial aos parâmetros ótimos (Tabela 7.28).

Na Tabela 7.30, $\rho_{\beta ae}$ é o valor RMS da variável de teste cuja série temporal foi sintetizada com o parâmetro dinâmico β_{ae} enquanto $\rho_{\beta ao}$ é valor RMS da variável de teste cuja série temporal foi sintetizada a partir de valor do parâmetro dinâmico β_{ao} .

Os resultados indicam que o uso da função exponencial obtida através de ajuste aos parâmetros ótimos proporciona melhores resultados (colunas $\rho_{\beta ao}$) que o uso da função exponencial obtida através de ajuste aos parâmetros extraídos pelos modelos (colunas $\rho_{\beta ae}$).

Além disto, o uso da função exponencial obtida através de ajuste aos parâmetros ótimos aproxima os resultados obtidos (colunas $\rho_{\beta ao}$) dos melhores resultados (colunas $\rho_{m\beta}$) em alguns casos, incluindo o caso do uso do modelo GC no enlace Scania que apresenta uma diferença grande entre o resultado obtido com o β extraído e o resultado obtido com o melhor β .

Sendo assim, é possível propor as seguintes equações para cálculo do parâmetro dinâmico β em s^{-1} de enlaces terrestres:

$$\beta_{EMB} = (106 e^{-0,419 d} + 0,61) \times 10^{-4} \quad (7.8)$$

$$\beta_{TMB} = (1500 e^{-0,590 d} + 0,75) \times 10^{-4} \quad (7.9)$$

$$\beta_{GC} = (1500 e^{-0,596 d} + 0,77) \times 10^{-4} \quad (7.10)$$

onde d é a distância do enlace em quilômetros, neste caso limitada ao intervalo entre 12,78 e 42,99 km.

Embora seja de se esperar que o parâmetro dinâmico apresente outras dependências, em particular com fatores geoclimáticos, com os dados disponíveis neste trabalho é possível analisar apenas a dependência com a distância.

A possibilidade de extrair o parâmetro dinâmico dos modelos para enlaces terrestres a partir das distâncias dos enlaces e sem a necessidade de existência de uma série temporal de atenuação amplia bastante a importância dos modelos de sintetização de séries temporais de atenuação uma vez que existem bancos de

dados que permitem a extração dos parâmetros estacionários dos modelos para uma grande quantidade de localidades.

7.8. O uso do modelo EMB em outros trabalhos

Não foi encontrada literatura técnica documentando aplicações do modelo EMB a enlaces terrestres para que fosse feita uma comparação dos resultados.

Os trabalhos encontrados cujos resultados são apresentados através de erro RMS da variável de teste de cada estatística são referentes a enlaces de comunicação por satélite e consideram parâmetros diferentes para o cálculo das variáveis de teste. Alguns resultados são apresentados a seguir como informação adicional sobre valores RMS das variáveis de teste que foram obtidos nestes trabalhos em que o modelo foi aplicado para o mesmo tipo de sistema para o qual ele foi desenvolvido. Não é objetivo, entretanto, que os resultados apresentados sejam comparados com os resultados obtidos neste trabalho.

Rodrigues [09] aplicou o modelo EMB para quatro enlaces satélite operando nas frequências de 11,4 e 12 GHz e localizados em três regiões de climas diferentes no Brasil (equatorial, tropical e subtropical).

As faixas de percentuais de tempo utilizadas para o ajuste lognormal EMB variaram para cada enlace.

Os níveis de duração de desvanecimentos e de *fade-slope* considerados para as estatísticas dinâmicas foram os mesmos que foram utilizados neste trabalho, mas níveis adicionais de atenuação foram considerados nos cálculos. Os níveis de atenuação considerados foram [09]: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 17,5, 20 e 22 dB.

O *fade-slope* foi calculado para intervalo de 50 segundos e os dados experimentais tem taxa de amostragem de 1 Hz.

A Tabela 7.31 apresenta os valores RMS das variáveis de teste para as estatísticas dos dados sintetizados pelo modelo EMB para os quatro enlaces.

Embora existam diferenças nos parâmetros utilizados nos cálculos da variável de teste, os valores RMS das variáveis indicam que as estatísticas de *fade-slope* dos dados sintetizados também são piores que as estatísticas de duração de desvanecimentos. Neste estudo, entretanto, há uma diferença significativa entre os resultados das estatísticas de número de desvanecimentos e de tempo relativo de desvanecimento.

Tabela 7.31 – Valores RMS das variáveis de teste das estatísticas de enlaces satélite no Brasil – modelo EMB [09]

Cidade	Clima	$\rho_{\text{ccdf-aten}}$	ρ_{FS}	ρ_{FDn}	ρ_{FDt}
Mosqueiro	Equatorial	0,179	0,709	0,575	0,236
Rio de Janeiro	Tropical	0,151	0,761	0,551	0,414
Curitiba	Subtropical	0,137	0,721	0,608	0,293
Porto Alegre	Subtropical	0,088	0,720	0,598	0,296

Carrie et al. [51] aplicou o modelo para seis enlaces localizados em regiões de clima temperado do Canadá, Itália e Bélgica operando nas frequências de 19, 20, 27, 30 e 50 GHz. Os dados experimentais têm taxa de amostragem de 1 Hz.

A variável de teste das estatísticas de *fade-slope* foi calculada de maneira diferente da maneira sugerida em [24] e seus valores RMS variam entre 0,505 e 0,920. O *fade-slope* foi calculado para intervalo de 50 segundos.

Os valores RMS da variável de teste da CCDF de atenuação variam de 0,180 a 0,243 dependendo do enlace, mas as faixas de percentuais de tempo consideradas no ajuste da CCDF e as faixas testadas não são informadas.

Não são apresentados resultados referentes às estatísticas de número de desvanecimentos, mas no caso das estatísticas de tempo relativo de desvanecimento os valores RMS da variável de teste variam entre 0,345 e 0,494, sendo que os níveis de atenuação que foram considerados não são informados.

Neste trabalho, os resultados das estatísticas de *fade-slope* dos dados sintetizados também são piores que os resultados das estatísticas de duração de desvanecimento.

Apesar das diferenças citadas entre os tipos de enlaces, climas e parâmetros considerados na validação do modelo, de uma forma geral é possível afirmar que os resultados da aplicação do modelo EMB aos enlaces satélite são muito próximos dos resultados obtidos na aplicação do modelo aos enlaces terrestres.