

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PREVISÃO DE VAZÃO EM UMA BACIA DO SEMI-ÁRIDO USANDO
PREVISÕES CLIMÁTICAS NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO**

Klécia Forte de Oliveira

Campina Grande – PB

2006

Klécia Forte de Oliveira

**PREVISÃO DE VAZÃO EM UMA BACIA DO SEMI-ÁRIDO USANDO
PREVISÕES CLIMÁTICAS NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, área de Engenharia de Recursos Hídricos.

Orientadores: Carlos de Oliveira Galvão
Paulo Nobre

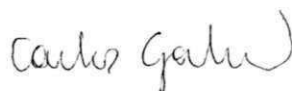
Campina Grande – PB
Maio - 2006

048p 2006	<p>Oliveira, Klécia Forte de</p> <p>Previsão de vazão em uma bacia do semi-árido usando previsões climáticas numéricas de precipitação/Klécia Forte de Oliveira. Campina Grande: 2006.</p> <p>77f: il.</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.</p> <p>Orientadores: Carlos de Oliveira Galvão e Paulo Nobre.</p> <p>1. Previsão de vazão. 2. Previsões climáticas. 3. Semi-árido.</p> <p style="text-align: right;">CDU 556.06</p>
--------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------


Klécia Forte de Oliveira

**PREVISÃO DE VAZÃO EM UMA BACIA DO SEMI-ÁRIDO USANDO
PREVISÕES CLIMÁTICAS NUMÉRICAS DE PRECIPITAÇÃO**

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
Universidade Federal de Campina Grande



Profª. Drª. Rosires Catão Curi
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. Walter Collischonn
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aprovada em 26 de maio de 2006

Agradecimentos

A minha família.

A Gustavo que me acompanhou.

A Chico e Ana Cláudia, que corrigiram o texto.

Aos meus orientadores, Carlos e Paulo.

Aos colegas e amigos dos laboratórios de Hidráulica I e II.

Ao Preclihne/CT-HIDRO/FINEP pelo aprendizado.

Ao SegHidro/CT-INFO/MCT pelo apoio financeiro e experiência propiciada.

A FUNCEME, na pessoa do Sr. David Moncunnil, pelo acesso aos dados do modelo atmosférico.

À Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, por ceder dados de precipitação observada.

Ao CNPq pelo apoio financeiro em parte da pesquisa.

Resumo

Previsões climáticas numéricas de precipitação, resultantes do aninhamento de um modelo regional em um modelo de circulação geral da atmosfera, são usadas para prever vazões na bacia do rio Piancó. A região está localizada no semi-árido paraibano, no norte do Nordeste, apresentando grande variabilidade climática e comprovada previsibilidade sazonal. A previsão de precipitação foi gerada a partir de valores observados de TSM, num conjunto de dez simulações de distintas condições iniciais. Em razão da identificação de erros sistemáticos, aplicou-se um método de correção aos valores previstos, baseado nas médias e desvios das climatologias observada e do modelo. As precipitações previstas diárias são usadas como entrada para um modelo chuva-vazão concentrado, em escala diária. Em seguida, as precipitações previstas são acumuladas à escala mensal e corrigidas, sendo usadas como entrada para um modelo chuva-vazão concentrado, em escala mensal. Os resultados mostram que a previsão em conjunto fornece melhores ajustes à precipitação observada. A agregação das precipitações previstas diárias à escala mensal não resultou em melhores correlações entre previsão e observação. Considerando a escala sazonal, as vazões foram previstas corretamente em 65,5% dos anos analisados, quando categorizadas (se baixas, médias ou altas).

Abstract

Numerical climate forecasts, produced by a regional model nested in an atmospheric general circulation model, are used to forecast runoff in Piancó river basin. This basin is located in the Brazilian semi-arid region (in the State of Paraíba), in northeastern Brazil, that presents high climate variability and high seasonal predictability. An ensemble of ten simulations of rainfall forecasts, forced with observed SSTs, was used in this study. Due to the presence of systematic errors, a method of correction was applied to the precipitation forecasts, based on the mean and deviations of model's and observations' climatologies. The daily precipitation forecasts are used as input for a lumped hydrological model, at daily scale. After that, the precipitation forecasts are accumulated at the monthly scale and corrected, and used as input for a lumped hydrological model. The results show that the ensemble of forecasts produces better adjustments to the observed precipitation records. The aggregation of daily precipitation forecasts at the monthly scale did not result in better correlations between forecasted and observed data. Regarding to the seasonal scale, the outflows had been forecast correctly in 65,5% of the analyzed years, when categorized (if low, average or high).

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas e Abreviaturas	xii
1 – Introdução	1
2 – Sobre a utilização de previsões de precipitação para previsão de vazões	3
2.1 – Previsibilidade sazonal sobre o NEB	3
2.2 – Modelos atmosféricos	5
2.3 – Acoplamento entre modelos atmosféricos e hidrológicos	9
3 – Estudo de caso: a bacia do rio Piancó	12
3.1 – Caracterização	12
3.2 – Precipitação observada	13
3.2.1 – Precipitação média sobre a bacia	15
3.2.2 - Consistência dos dados observados de precipitação	17
3.3 – Vazão observada	18
3.3.1 – Análise dos dados observados de vazão	19
4 – Metodologia	22
4.1 - Previsão de precipitação	22
4.1.1 – Sobre os dados de previsão	22
4.1.2 – Correção dos dados previstos	23
4.1.3 – Análise da qualidade da previsão de precipitação	25
4.2 – Modelo chuva-vazão	26
4.2.1 – O modelo Tank diário	26
4.2.2 – O modelo Tank mensal	28
4.3 – Geração de vazões	29
4.3.1 – Simulações	29
4.3.2 - Análise da qualidade da previsão de vazão	30
5 – Resultados e Discussão	31
5.1 –Previsão de precipitação	31
5.1.1 – Correção da precipitação diária	31
5.1.2 – Correção da precipitação mensal	39
5.1.3 – Precipitação nos postos	40

5.2 – Calibração e validação do modelo chuva-vazão	43
5.2.1 - Calibração	43
5.2.2 - Validação	49
5.3 –Previsão de vazão	57
5.3.1 – Previsão de vazão usando o modelo Tank diário	58
5.3.2 – Previsão de vazão usando o modelo Tank mensal	67
5.3.3 – Síntese	70
6 – Conclusões e Recomendações	71
7 – Referências Bibliográficas	73
Anexos	77

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Esquema da localização da bacia do rio Piancó	12
Figura 3.2 – Curvas de nível na região da bacia do rio Piancó	13
Figura 3.3 – Bacia do rio Piancó – postos pluviométricos usados	14
Figura 3.4 – Precipitação média mensal na bacia do rio Piancó	16
Figura 3.5 – Vazões médias mensais do rio Piancó na seção do posto Piancó	19
Figura 3.6 – Vazão observada diária (em m ³ /s) nos anos de 1965 e 1966	20
Figura 4.1 - Área abrangida pelo modelo regional	23
Figura 4.2 - Esquema de interpolação	23
Figura 4.3 – Valores climatológicos de precipitação na bacia do rio Piancó	24
Figura 4.4 – Esquema do modelo Tank diário	27
Figura 4.5 – Esquema do modelo Tank mensal	29
Figura 4.6 - Esquema das vazões simuladas	30
Figura 5.1 – Valores de precipitação diária para o ano de 1984	32
Figura 5.2 – Funções densidade de probabilidade das precipitações médias diárias sobre a bacia	34
Figura 5.3 – Valores mensais de precipitação	35
Figura 5.4 – Valores mensais observados de precipitação e climatologia mensal (Cli)	37
Figura 5.5 – Valores sazonais de precipitação – as linhas em cinza correspondem aos limites de variação dos membros de previsão corrigida	38
Figura 5.6 – Valores sazonais de precipitação para os postos Itaporanga e Serra Grande	43
Figura 5.7 - Valores diários de Qobs e Qsim – Classificação do ano e coeficiente de correlação (R) entre Qobs e Qsim	45
Figura 5.8 - Valores mensais de Qbs e Qsim – Classificação do ano e coeficiente de correlação (R) entre Qobs e Qsim	47
Figura 5.9 - Valores anuais de Qobs e Qsim – os anos assinalados apresentam falhas na observação da vazão	49

Figura 5.10 - Valores diários de Qobs e Qsim – Classificação do ano e coeficiente de correlação (R) entre Qobs e Qsim	50
Figura 5.11 - Valores mensais de Qobs e Qsim – Classificação do ano e coeficiente de correlação (R) entre Qobs e Qsim	54
Figura 5.12 - Valores anuais de Qobs e Qsim - os anos assinalados apresentam falhas na observação da vazão	57
Figura 5.13 - Valores diários de Qobs; Qs,po e Média Qs,pc	59
Figura 5.14 – Valores mensais de Qobs; Qs,po e Média Qs,pc	64
Figura 5.15 - Valores sazonais de vazão – as linhas tracejadas correspondem aos limites de variação dos membros de Qs,pc	67
Figura 5.16 - Valores sazonais de vazão – as linhas tracejadas correspondem aos limites de variação dos membros de Qs,pc	69

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Informações dos postos pluviométricos utilizados neste estudo	15
Tabela 3.2 – Classificação dos anos segundo a precipitação anual observada	16
Tabela 3.3 – Precipitação nos postos vizinhos ao posto Conceição em 15/06/1965	17
Tabela 3.4 – Precipitação total anual	18
Tabela 3. 5 – Correlação entre a precipitação sazonal média sobre a bacia e a precipitação sazonal em cada posto pluviométrico	18
Tabela 3.6 – Informações do posto fluviométrico Piancó	19
Tabela 3.7 – Classificação dos anos segundo a vazão média anual	21
Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo Tank mensal	29
Tabela 5.1 – <i>Bias</i> calculado entre os membros de Pp e Pc e Pobs	31
Tabela 5.2 – Correlação (R) calculada entre os membros de Pp e Pc e Pobs	32
Tabela 5.3 – Classes de ocorrência dos valores diários de Pobs; Pp,m e Pc,m	33
Tabela 5.4 – Correlação (R) calculada entre os membros de Pp e Pc e Pobs	34
Tabela 5.5 – Valores de correlação mensal entre Pobs e Pc,m e classificação dos anos	37
Tabela 5.6 – Correlação (R) calculada entre os membros de Pp e Pc e Pobs	38
Tabela 5.7 - Correlação (R) calculada entre os membros de Pc e Pobs	39
Tabela 5.8 – Valores de correlação mensal e classificação dos anos segundo o total precipitado anual	39
Tabela 5.9 - Correlação (R) calculada entre os membros de Pc e Pobs	40
Tabela 5.10 – Erro médio absoluto entre a precipitação prevista e a observada	40
Tabela 5.11 – Estatísticas sazonais entre a precipitação observada e prevista	42
Tabela 5.12 – Parâmetros do modelo Tank	44
Tabela 5.13 – Valores de <i>bias</i> calculados entre Qsim e Qobs diários	44
Tabela 5.14 - Valores de <i>bias</i> calculados entre Qsim e Qobs diários	50
Tabela 5.15 - <i>Bias</i> calculado entre os membros de Qs,pc; Média Qs,pc; Qs,po e Qobs	58

Tabela 5.16 - Correlação (R) calculada entre os membros de $Q_{s,pc}$; Média $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	58
Tabela 5.17 - Correlação (R) calculada entre os membros de $Q_{s,pc}$; Média $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	63
Tabela 5.18 - Correlações entre os valores mensais de Média $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	63
Tabela 5.19 - Correlação (R) calculada entre os valores sazonais dos membros de $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	66
Tabela 5.20 - Classificação dos anos segundo a vazão média sazonal	67
Tabela 5.21 - Correlação (R) calculada entre os membros de $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	68
Tabela 5.22 - Bias calculado entre os membros de $Q_{s,pc}$; $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	68
Tabela 5.23 - Correlações entre os valores mensais de Média $Q_{s,pc}$ e Q_{obs}	68
Tabela 5.24 - Correlação (R) calculada entre os membros de $Q_{s,pc}$, $Q_{s,po}$ e Q_{obs}	69
Tabela 5.25 - Erro médio absoluto entre a vazão observada e vazões simuladas	70

Lista de Siglas e Abreviaturas

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECHAM	<i>European Community-Hamburg</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCGA	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MR	Modelo Regional
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NEB	Nordeste do Brasil
RSM	<i>Regional Spectral Model</i>
SIMOC	Sistema de Modelagem Estatística dos Oceanos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical



!!+" , - . !!\$" # . !!/%0 1 & . !! " # !!\$%
& ' (((") * .
- 2 0# - # *
3 4 !!!% - - 5
2 - &
- 2 6
0
3 - &
7 &
8 9 2

BG C? 4 !! % # . 3 !!+ %) . !!/%
, . !!/% 5 0
-
, ; 8 -
H . ((" l ' ((+% 3
< 8
& - & 03
3 - 3 - <
; ; , - 0
& -
BC National Centers for Environmental Prediction < ;) 13 C#B(J
> - K ((\$ % B) ' Max Planck Institute 1) | B \$ 0'
. @) 1B1 = & &
. !! / % 8
0 @ 6
03 & &
0
& - & 0
3 &
- < " -
&
- < 0 8
- 6
& L & 0

- BM !! % & 6 - -
8 - - 03
6 &
& - % 03 7
) 3 F 1)) 3F1) % &
- - - #
% 5
& %
- 6 : &
) * 0 !!+" ' (((" BM !! "
3 . !!+%) * 0 !!+%
- 0F
; , ; 1, % ' (((%
- 8
& - 8 - 0 ;
BM !! % 3 . !!+% - &
9 5 % &
< & 5
0
& <
& ; 1, 0 . < 7
& 8
-
- 0

- ; , & <
0 1
- 2 -

=

+

0 N
 8 ;1, ; B !! " ; . !!+" # . 3 !!+ %
 2 & = 8
 & & :
 9 0 A - !! %
 &) N% 2
 - ! +
 ! \$% - ;1, &
 8 (!! %A) N
 , B !! %
 # - ' 0 !! % : %
 =
 0; 7 - - 6 &
 8 "
 ;1, # O - P 0 l l
 (JJ% 9 & - 6
 7 ;1, 0 A 6
 : 0 1 <
 F#B%
 & - %
 A F#B : F
 8
 ;1, l l (JJ" B # 4 (Q % :
 F ; - : F #
 R) -6 S R) % : A &
 - & < <
 6 ;1, "
 5 l l (JJ" ; . !!+%
 F : 1 ; T <A &
 # 1; A#% &
 & ; 0 !!+% 9
 A & B < ; B !! %
 2 < & ;1, 0 # 0 !!/ %
 8 F#B
 & ;1, 0 1 &
 B !!D% & ;1, 0
 # - B !!D% 7 - 8

& ; 1, & . B %
& F#B - 8 A 3
: R) - 6 : # 0
A F#B &
& - B)' %
& ; 1, 0;
F#B
7 # . !!!/ % A) 3 F 1)
) 3F1) % S ; 3 8 1 § 31%
& 9 #SBA) # B - 1
A % C ; !!\$% -
F#B 0 F F#B
& B)') 3F1) - &
- 0

!"
A B)' & - B)' % 8
&
1 * !!! % A B)'
: 8 & ; <
4 % 8 & - 0# - ; 0 !!+% 7 6
; 1, E
: < 0 A
&
& 0 A : <
&
F#B
& 0 17 H . ((%
8
F#B - &
; 1, 0
A B)'
0 A & :
0 A
- %

0 A & < &
F - - &
& 0 &
& &
. 0 &
9 .
& 0 F\$ 7 8 \$ 9 0
- &
U < - 01 8
B)' & 7 !! !! 4 BC
& 8 9 0 A
BC B)' & *downscaling%* : 0 ;
BC 7 - &
B)' 0 . !!!/% 8
-) * . !!!" > N 4 ((J" ;
. !! " # ' !! %0# - # . !!!/% &
& BC -
8 B)' 0
; 0 !! % *downscaling* :
C#B BC% 1) | B+ B)' %0 ;
E - Q! 4 " - ! 4 0
- - & F#B 0
& 8 BC 8
B)' 7 0
& BC - Q! 4 -
8 - ! 4 01 5
- & Q! 4 03 ; 0 !! % 8
- 9
& ; 1, 0 ;
& - BC" &
V - 0
@ *downscaling* : *downscaling* 0 '
(((% &
- B)' 8 -
- 0 A ' (((% B)' 1) BH .
European Centre for Médium-Range Weather Forecasts% *downscaling*
- " &

A - & - 0
 E & / +
 % & C %- J +W"
 & / - % C J(QW0
 ; 7 # X ((Q% O) &
 C - & -
 % B)' 1) | B %
 : *Large-Scale Geostrophic* < X#' 0 1
 # X ((Q% 8 &
 & - &
 - < & % *downscaling* 0 6
 % 8 !W0 A 8
 - 8 & &
 - 0; - 0)
 % 8 & 8 2 - 0
 ; -
 = *ensemble*% B)' % F#B
 8 = 7 & B)' B)' %
 & - F#B 0 A
 - 7 &
 0 1 8
 8 - !! " F M ,
 !!+%0
 - !! % - =
 & 1) BH. ;) 13
 & 8 0F
 E !!E! E! @F) % E!
 !!E! @F) %0 A & &
 / V ! V /! V 0)
 03 7
 8 ! V /! V
 = 1) BH.
 8 5 8 &
 = % 7 0 A
 & 8

= / ++ % 8
& - 0
) = F M , !!+% = /
0A 8 S - 3
/ 8 -
0
= & &
& 01 - &
1 B , !!!% 0# -
% %
0
1 1 B , !!!% 0A
- & - %
8 B#1_{FAF X} H 4 ((/ % 6
E % " % : B#1_{XYB}% %
0A & B#1_{FAF X}
B#1_{U1#X} - % &
< - -
8 8
& 0A - B#1_{XYB} B#1
: - % : 0
A & B#1_{U1#X} B#1_{XYB}0
1 B , !!!% &
2 & " < -
0
> # . 3 !!+ % - &
) 0 !!!/ %
& 0 F -
8 % 8 - 0
) 0 !!!/ % 8 &
+JW 8 / \$W

& 2 0 F & % - 0 & :
' 0 !!!/% &
& &
- 0 A 0 !!!/%
& ' 0 !!!/% 8 &
6 7 & 0 F
7 & \$ 0 0 0

\$!" % &' ; 7 & - - 0
1 8
- & # X ((Q' '
(((% & B)'
BC % - <) . !!!/"
' . !!!/" | 0 !!\$%
A -
0 # - , - 0 !!!/%
- & -
" 7 &
= &
-
0
) 0 !!!/% =
&
< @ - 0 A 8
& B)') 3F1) 8 - -
Q! 4 - 7 % > - -
- ! 4 0 &
< & &
- & 8 - 0 1
& & <
0; &

%

8

%

0

=

,

0 !!!/%

-

&

I F#N#

- 0A

8

&

6

- 0

;

&

&

-

& 0 U

downscaling

&

& -

&

&

0

#

(

&

)

- 3 < 7 3 . -

+0 % - 3 1

) 3 DZ\$+[/ \# JZ/ Q/ \# -

+JZ J[\$ \H +QZ\$ [\$(\H) : !!!%A 3 [-

&) 8) <B

U[- & 7 +/ +

- " -

3 C ' &

1 C ' ; 0 : -

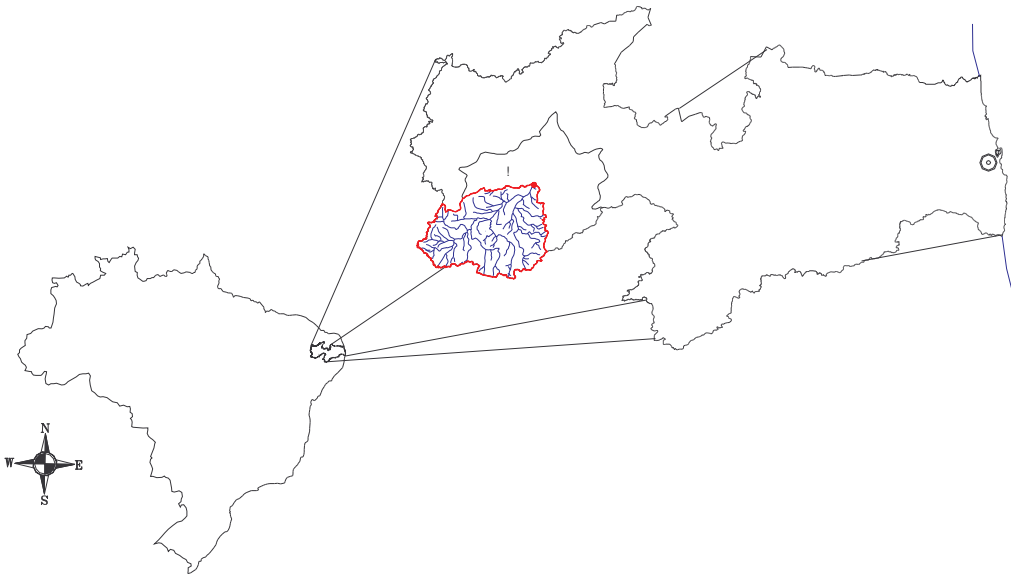
3 < & - \$J 3 C

' ; 0N = 7 3 X

((\$% ' (((% , - !! % ; . !!+% :

- - = ;

H . ((%



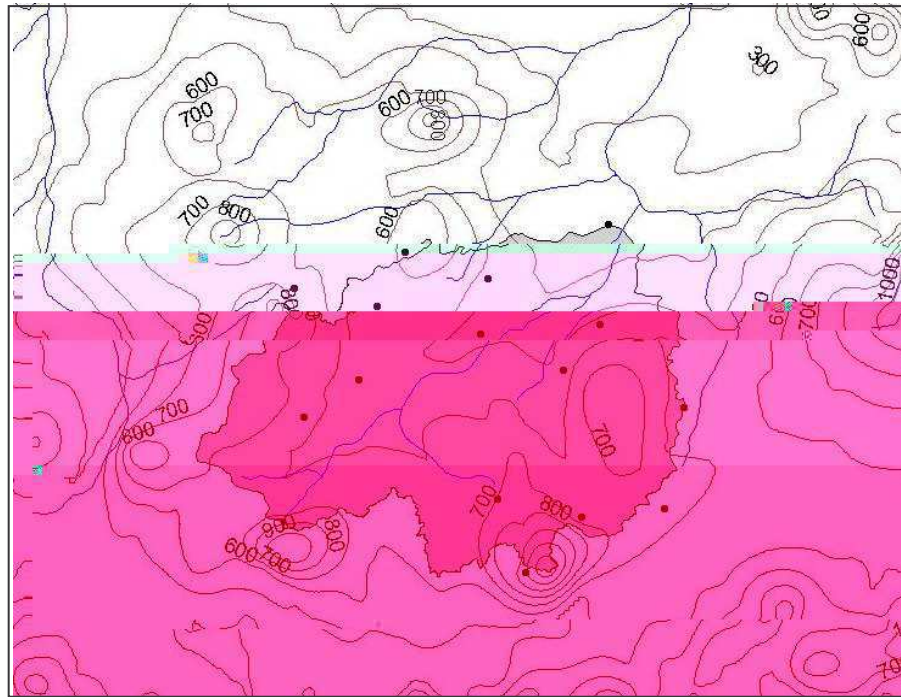
. - +0 L 1 8 & 3

- 3 (0 Q 4] &

3 . - +0 %

\$//! 4 0 - < - & -

7 0' - & 3 # =
 3 , B ; 4 !! % A - D!!
 . - +0 % & QJ! , - !! %
 < 8 & +0 0 % &
 - /// , - !! % -
 & ' (((%



. - +0 L) - 3

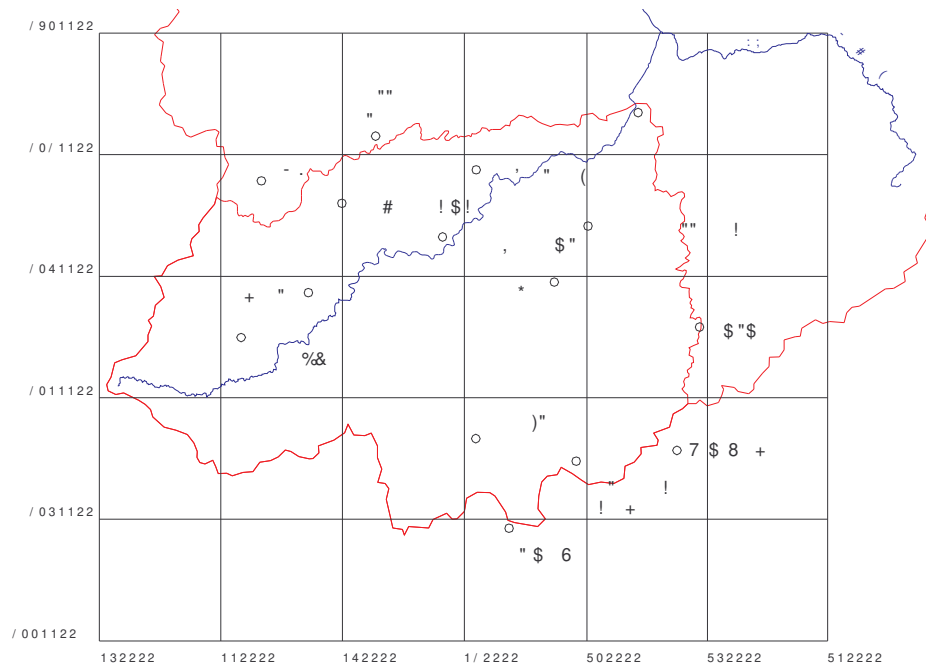
#

U 8 - 3
 1) 3 3 8
 7 (D+ ((
 ((\$< !! % &
 & +0+% A & #
 S & I - I H % -6 ; O < ;
 EW * 0 0 0 % -6 17 ' O 1
 3 < 1# 0 . - +0+ &
 - 3 0

A

& +0 0

+



. - +0+ L , 3 L

(++ 0 & (D 0;
 ((! ((\$ & OS
 - 8 - - &
 2
 # 6 U ; L #@U1; 1 ' ((% A
 ((((+ -
 & 0 F +0 7 &
 - (D! !! 01
 & \$0 0 % 3 &
 < 7 . - 8 8 - F +0 0

F +0 L S &

) & ' *	"	+	! % + , - . . . /
!!J+J!!D	3	V (!< V !!!/	!/V (JJ< V (JJ
!!J+J! D	> S %	!JV (D < V !!!/	!DV (JJ" !QV (JJ" !V (JQ' < V ((+)
!!J+Q! !	# S %	!V (++< V !!!/	!+V (D\$" !V (D/" !JV (DD" ! V (JD" !/V (JD" < V (J(" !QV (Q < +V (Q " !< V ((+)
!!J+Q!	, N	!JV (D < !V !!!/	!(< !V (D/" V (J " !+V (J\$" !JV (J\$" V (JJ" !/V ((!< V ((" !Q< V ((+)
!!J+Q! +	3 S	!+V (< V !!!/	V (JJ" ! V ((< V ((+)
!!J+Q! \$	; A %	!V (++< V !!!/	!DV ((" !V ((< V ((+)
!!J+Q! /	B ; % -	!(V (++< V !!!/	! < DV (D " ! (V (J\$" !JV (Q " !V (Q " ! V (QD" V ((!< V ((
!!J+Q! J	S B % -	!V (!< V !!!/	!D< V (J(" !QV (Q+< V ((" < V ((+)
!!J+Q! Q	S # B %	!JV (D < V !!!/	!QV (Q " ! (V (Q\$" ! < V ((" < V ((+)
!!J+Q! (	# ' %	! V (D < !V !!!/	! < QV (D " ! \$V (D+" V (J " !Q< (V (J+" !QV (JJ" !JV ((!" ! < V ((" !/ < V ((+)
!!J+Q! !	) &	V (!< V !!!/	! V (DQ' V (D(" !DV (J!" ! (V (QD" ! < V ((" < V ((+)
!!J+Q!	, # .	! V (++< V !!!/	! V (D! < V (D " ! (V (JJ" V (QD" !J< ! (V ((" ! < V ((" < V ((+)
!!J+Q! +	, >	!V (++< JV ((	! < DV (D " !/V (D\$" !QV (D/" ! V (DD" !+V (JJ" ! (V (JJ" V (JJ" V (Q+" ! (V (Q\$" !+V (QD" !DV (QD" !/ < (V (QJ" ! \$V (QD" V (QD" ! V (Q" !/V (Q
!!J+J! +/	^ 7	!JV (D < JV ((	V (JD" V (JQ' ! (V (Q" V (QD" ! V (QJ
!!J+Q! +	F	!(V (< V (Q'	!+V (D " !QV (D " V (D/" !(< V (DQ' !+V (J " V (J\$" V (J/" V (JD" V (JJ" !/V (JQ' !< V (JQ' !JV (J(" V (J(

-) - I H 0

#

"

&

&

& / 0 % 3

&

-

3 -

F

F

0

7

6

0 # -

'

#

!!!%

&

6

&

F

K - -

&

:

8

0

3

&

6 0 S 8

<

&

-

&

0 F

-

&

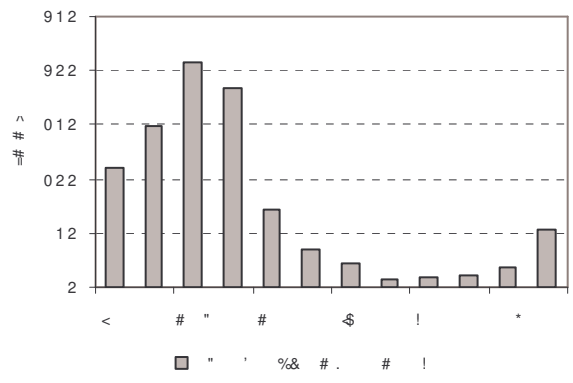
-

F

0

/

1 . - +0\$ & 3 0
 8 & = 0
 0; <



. - +0\$ L 3 & 3
 & <
 0 3
 6 -
 % - 6 0 F +0 &
 - 0

\$	0	) !	\$	0) !
(D+	JQ D/	; -	(Q	\$D+ +	#
(D\$	D+ Q\$	)	( Q+	/ QQ	#
(D/	QJ\$!!	; #	(Q\$	Q ! /	;
(DD	J! Q!	#	(Q/	JJ/ /)
(DJ	+D (	)	( QD	! D ()
(DQ	(! Q	; #	(QJ	D+ (\$Q	#
(D(	Q+ / (	; #	( QQ	Q J \$+	;
(J!	/ QJ +	#	(Q	! \$Q\$\$)
(J	+ J+	)	((!	/! J	#
(J	Q! +D	; #	((	D+! DJ	#
(J+	(\$J (	; #	(( \$	JJ)
(J\$	\$! J JD)	((/	(/ + !!)
(J/	/ \$/	)	(( D	J(D !!	;
(JD	JQ +	; #	((J	Q\$ Q!	;
(JJ	(J	)	(( Q	+ \$! Q	#
(JQ	J! / D+	#	(( (	J/ J ! J	;
(J(	QD+ J	; #	!!!	(! J !	;
(Q!	J\$! Q+	; #	!!	D! Q+J	#
(Q	D/ \$	#			

- 6 0

1) 2

A &
 (D+ ((I H V; 0 &
 1# & ((\$!! 0 -
 I H V; %
 & 0
 - E) & # ' 0
)

A - &) & / =
 (D/ 8 2 &
 F +0+% & -
 (J + / 0 S 8
 - & & 0)
 &) & - J! 0

F +0+ L 3 &) & / V DV (D/

"	3 4	5 6) 37 4
) &	J!!	<
S	!!	++
, >	J	J D
, # .	+	D!
, N	+J \$	+J!
B	D+!	\$!

8

A & - # ' < 8
 (Q ((! ((- 01
 & , # . , > , N
 F +0\$%A , > 7 ! 4 #
 ' 8 +J!! !!!! 7 0
 @ 8 & F +0\$ 6
 & 0A 7 #
 ' S - 8 - &
 (Q ((0 S 8 # '
 0 - 7

&

-

8

6

0

F +0\$ L 3 &

\$	,	# .	,	>	'	,	N	8
(Q		QQD		!! D	#		+D	!!
((!		(! (		+J\$ D	#		+\$! __	!!
((		( Q! __		/ QJ! __	#		#	!!
U_		!		\$	J /		((<

_ U : # ' 4 %
 __ 3 0

8 8

6

&

&

&

F

+0' %

(J (((0; F +0' 8
 = = % 0

F +0' L)

&

&

&

	\$ ")
,	N	\$! (+
,	>	D ! (\$ (
,	# .	J ! JJ!
)	&	J ! Q Q
#	'	J ! Q!
S		J ! (! J
S	-	Q ! QJ+
>		D ! (/!
B		/ ! (! J
;	A	D ! J(!
3		D ! QDD
3	S	J ! Q /
^	7	! ! QQ'
#	'	! D/ (
F		+ ! QD!

_C (Q ((! ((

9

A

3

0 #

= (D+

!!

I H V ; 0

F +0D 7

&

0U

-

& F

Q

+0D

7 0 A

8

&

6

8

0

F

+0D L S

&

3

) & ')		+	! %
+J+\$!!!!	3	! V (D+< V !!	! < (VD+" ! VD\$" !+< \$VD(" !(< WJ\$" ! WJ/" !< WJ/" < VQ+" ! Q< (VQ/" !+< J VQQ" ! J< QVQ" ! VQ/" VQ/" ! < DV(!" !/< J V " ! \$V " ! D< J V / " ! < +V Q' ! Q' Q

1

&

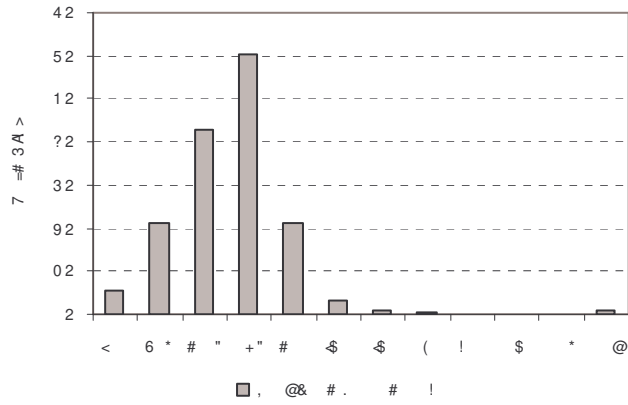
. - +0\$%

<

. - +0' %)

7

0



. - +0' L N

3

&

3

\$:

"

- \$0 0 %

&

&

-

<

&

; 11X !! " X # !! % 3

8

=

0 A

5

3 7

7 M

' ' + ' + \$ / \$ /

<

7

5

M S

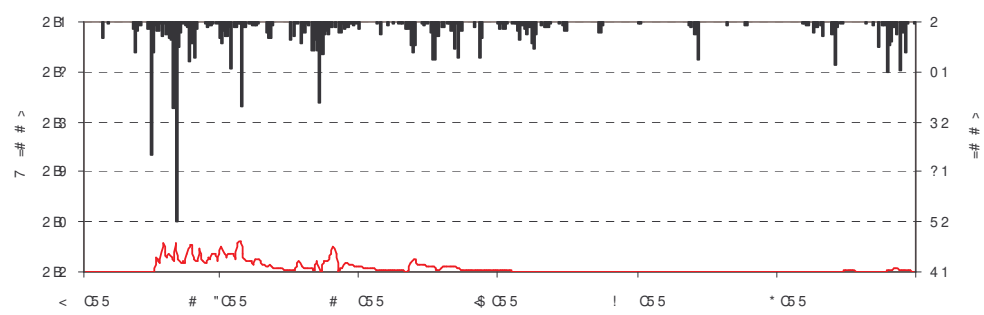
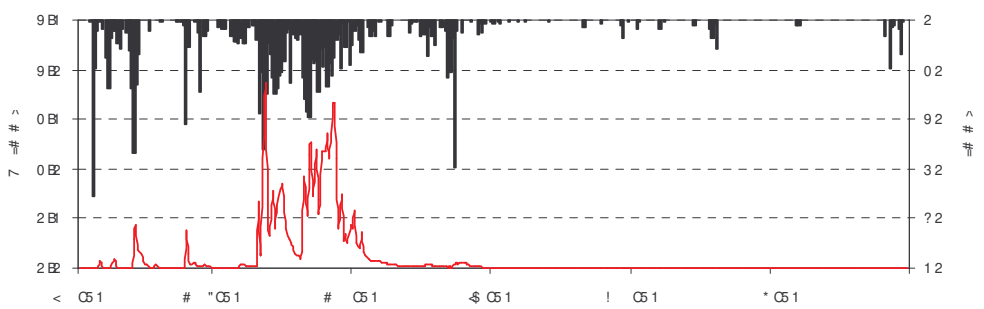
E %

' " %

(

' " % + ' " % \$
 ' ' ' + ' \$ ' / " % / ' ' ' + ' \$ ' / "
 0 5
 2 18 & +0 %
 (- α *) \leq \leq (+ α *) +0 %
 A 5 " 5 180 +0 % % $t\alpha$
 # - : / W"
 18 & +0+0
 = (*) / 2 +0 %
 = $\sqrt{(*) * (+ + 1) / 12}$ +0+ %

A 0
) 2
 N - 0 A
 (DD 8
 (D/ F +0 % F
 8 - : :
 . - +0D% < 6 & & - &
 < 8 0



. - +0D L N +V % (D/ (DD

)

& 7 ^, %

^ B% ^ % 3 6

- 7 % - 6 0 F + 0

& 0

F + 0 L) & -

, - ;	, - /	, - -	, - <	, - =	, - ,	, < .	, <	, <	, < #	, < ;	, < /	, < -
^	^ B	^ ,	^	^ B	^ ,	^ ,	^	^ ,	^	^	^	^ ,
, <<	, < =	, < ,	, = .	, =	, =	, = #	, = ;	, = /	, = -	, = <	, = =	, = ,
^	^ B	^ B	^ B	^ B	^ ,	^ B	^ B	^	^	^ ,	^	^
, , .	, ,	, ,	, , #	, , ;	, , /	, , -	, , <	, , =	, , ,	, , ,	, ,	, ,
^ ,	^ B	^ B	^ ,	^ B	^	^ B	^ B	^ ,	^ ,	^ B	^ ,	^ ,

;

; 1

;

(J !!!% 01
 - (J *Regional Spectral Model* L C#B > -
 a K ((\$% B)' *European Community-Hamburg* L 1) | B\$0 *Max*
Planck Institute . &) B - C

I L .@) 1B10

A - & 7 QZ 7 - %
 (0A - & D! 4 7 D! 4
 - +°#L D°; // °HL+°10 . - \$0 7

- 0A C#B(J 1) | B\$0
 - 6 - 0

;

& - 0 & -

% D 0@ & 7

. !!!/ %A

. 3 !!!+ " ' 0 !!!/ " A 0

!!!/ %0

&

&

F#B03

&

=

8

0 F

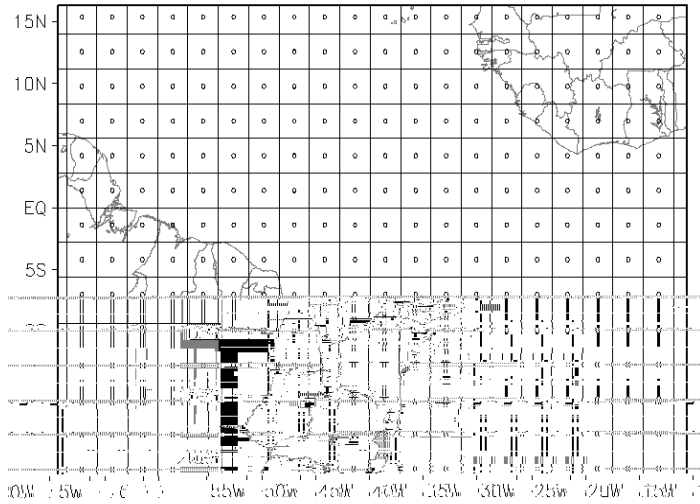
7 %

8

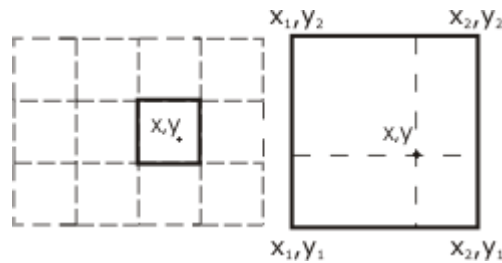
=

$$= i_{1,1} * i_{1,1} + i_{1,2} * i_{1,2} + i_{2,1} * i_{2,1} + i_{2,2} * i_{2,2} \quad \$0 \%$$

A & - " 7 . - \$0 0



. - \$0 < 0 - -



$$i_{1,1} = \frac{(2-)}{(2-1)} * \frac{(2-)}{(2-1)}$$

$$i_{2,1} = \frac{(-1)}{(2-1)} * \frac{(2-)}{2-1}$$

$$i_{1,2} = \frac{(2-)}{(2-1)} * \frac{(-1)}{2-1}$$

$$i_{2,2} = \frac{(-1)}{(2-1)} * \frac{(-1)}{2-1}$$

. - \$0 < 1 8 &

;)

' . !!!/%

& 0 & < 8

6 & &

& = 0 S

. - \$0+ - 8 7 -) < 3 %

². E' et a/0 !!!/%

& 3 0 A

= E %) <3 8 -

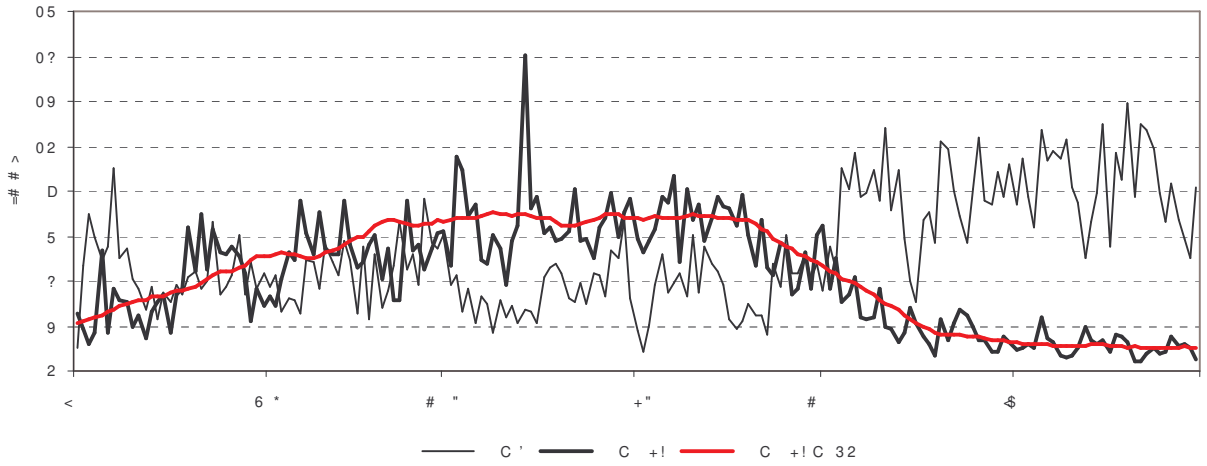
& " %) <3 <B+! 8 -

+! 01 5 8

b< / " c / d0A

(J

!!!0



. - \$0+ L N

&

3

) &

&

A

=

0 18 & \$0 %

A

. !!! / %

0

$$= - + \frac{\sigma}{\sigma} (, - -)$$

\$0 %

A

&

-

" -

-

0%

P% σ

0

-

0 N

, 8

8

-

0

A

&

2

&

&

0

; # \$: >

8 & & & 03
 & & E % &
 % & 0 &
 F &
 +0 0 0) = & &
 - & - &

< & 8 0 3
 &
 0
) & E %
 bias % & % -
 0 A bias 180 \$0+%%
 - % - %

H 4 ((/ %
 = - / - \$0+%

& - &
 & 7 &
 bias0

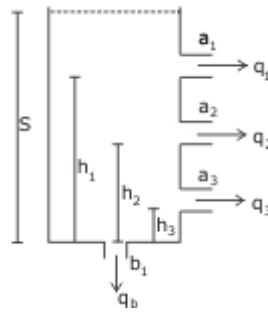
A & % & %
 & % 18 & \$0\$%# - H 4 ((/ %
 & - E %
 < 6 8
 - < " % 8 2
 & 7 8

0 A - & < 0

$$= \frac{\text{cov}(,)}{\sigma * \sigma} \quad \$0\$%$$

A cov(,) : $\sigma * \sigma$
 0

$0 A$
 $: 0A$
 $&$
 0
 A
 $<$
 $-$
 7
 $\%$
 $<$
 $\%$
 18
 $&$
 $\$ \Omega \%$
 $-$
 0
 $=$
 $*$
 $($
 $-$
 $)$
 $\$ \Omega \%$
 A
 0
 A
 $\%$
 0
 $\%$
 0

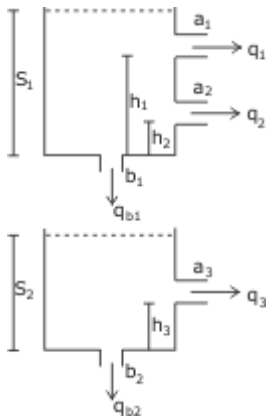


\dots $\$ \Omega$ L 1 8 F 4

)

3
 $&$
 $&$
 F 4
 7
 $+D$
 $&$
 $&$
 $+0 \%$
 $&$
 $+0+ \%$
 E $(D+$ $(($ $((\$$ $!!$ $0A$
 $(($ $((+$ 8
 $&$ $&$ 0
 $&$ F $=$
 $&$ $+0$ 0 0 A $&$ 8
 $\#$ $,$ $&$ $(D+$ $<$ $(D$ J $,$ $-$
 $!!$ $\%$ 8 $; NBA$ $-$ 3 $0A$
 $&$
 8 6 0

& F 4
 (D+ (JQ0 & = &
 & 8 F ((Q% 8 8
 = 8
 0 @ & -
 & +0 0 %
 0 3 & F 4 :
 F / 0 % (J((((\$!! 0
 ; ? 0 7
 A F 4 & 8 . -
 \$0 %0 A 8 " -
 0 & 18 &
 \$Q % & & & 0
 # 4E %
 %
 0 A : 8
 : 6 % 0
 8 0
 = * \$Q %
) %
 : % 0 A %
 18 & \$Q %
 8 % 0 A %
 8 0 8
 % 0 A 8 0 A
 8 & 8 0



. - \$0' L 1 8 F 4

' (((% 3 0 .
 - 3
 & +0+% & 8 e \ ; A
 0 F \$0 7 : F 4 0

F \$0 L 3 : F 4

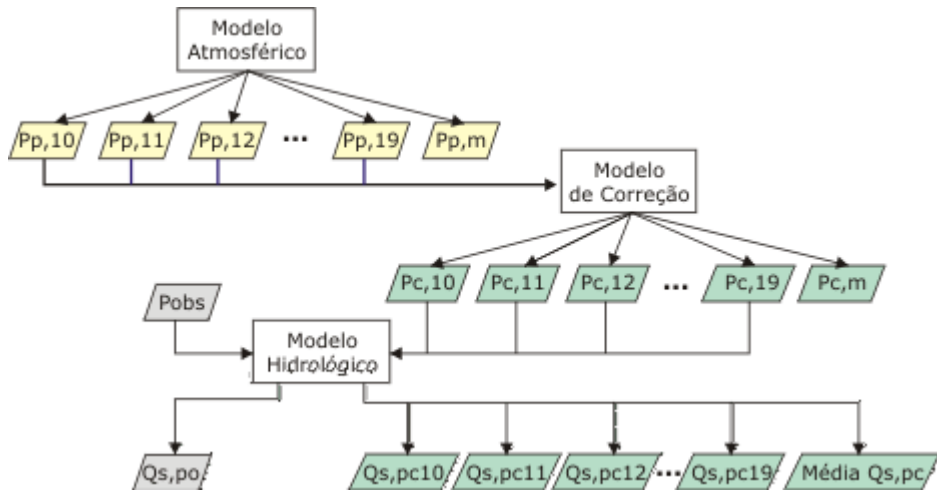
6	@3 4	7	7)	% 3 4	% 3 4	%# 3 4
9	(J	! \$ /	! Q Q D	D !	\$ D	\$(Q (
6			#			
9	! +\$\$! ! //	! ! (! ++	! ! !	

; # 8

; #

& F 4 5
 & F 4 0 A
 - & 0
 & & \$0 0 % 8
 & - 0 3
 & & 3 % & 3 % < <
 8? ! (0 A & &
 & 8
 8 & -
 & / 0 0 / 0 0 % 0 1 5
 F 4 0 -

& - &
 . - \$D%0
 ; . - \$D E % 3 E & " % 3 E
 & " %3 E & - " %^ E
 & " %^ E &
 - " %B ^ E
 & - 0 A -
 0 3 & -
 & F 4 0 ; -
 & 2 & "
 F 4 0



. - \$D < 1 8

; # 1\$: >

& & \$0 0+ % 8 2
 & % - E % bias %
 F 4 0 3 % &
 0

/ A 5

/

= E = -
& % = - 0A
3 " - 3 0 =
E %3 & " %3
& - 0
3 = 8 &
F 4 -
0 3 & 6 E %
bias % & %
- 0
&
& / 0 0+%

/) :

A *bias* 3 3 3 F
/ 0 7 0 1 &
3 % 8 2
0

F / 0 L *Bias* 3 3 3

	3	3 _l	3	3	3 ₊	3 _{\$}	3 _/	3 _D	3 _J	3 _Q	3 _l
3	+Q!	J\$	+DJ	+\$Q	+J+	+J/	+J/	\$+	\$!J	\$J!	+J(
3	!/Q	!\$J	!\$/	!\$Q	!J	!/\$	!++	!D\$	!DJ	!JJ	!J!

A *bias* 8 6 &
0) = A . !!!/ % &
6 7 0
1 7 & + W0 6
& 0

5 :

& - & F / 0 %
& & 0

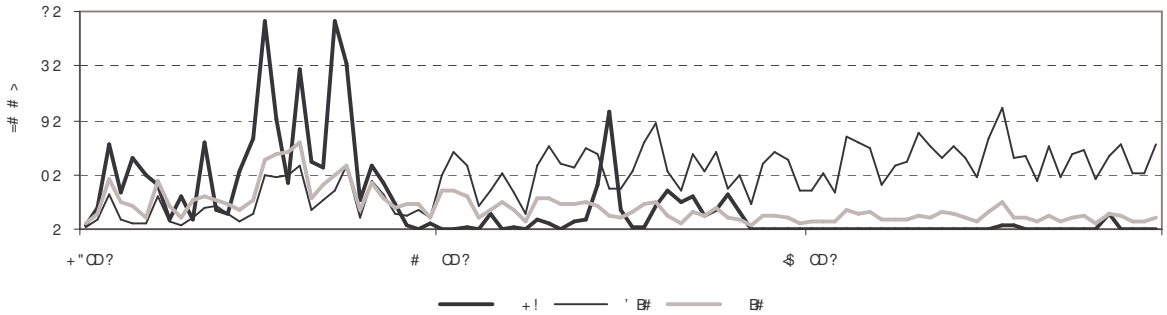
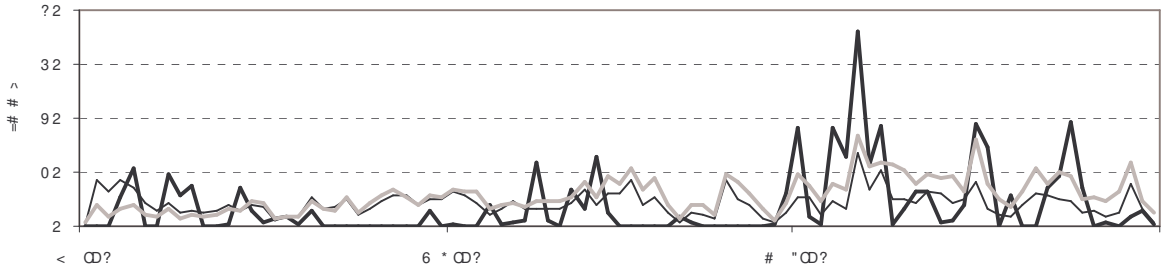
F / 0 L) & C% 3 3 3

A :	3	3 !	3	3	3 +	3 \$	3 /	3 D	3 J	3 Q	3 (
3	< ! D+	< ! \$/	< ! \$/	< ! +\$	< ! \$(	< ! !	< ! Q	< ! Q	< ! D	< ! \$D	< ! D
3	! /	! ! Q	!	! \$	! ! (	! \$	! \$	! +D	! Q	! \$\$! /

A F / 0

& OS 8
-
& 0 &
& 6 &
6 - 2
0 1 = 0

A . - / 0 < & 0 ;
& 3 %
& 3 % - 3 %



. - / 0 L N & (Q \$

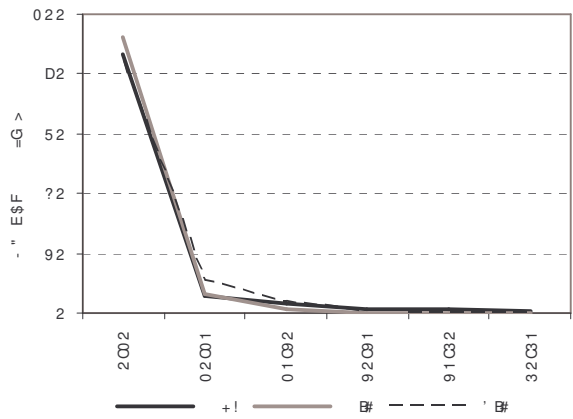
. - / 0 & =
& 3 % 3 % - 3 %

5 0 & 8 +/
 7 6 & =
 0 3 & - & F / 0+
 < 8 !< ! /< ! !< /
 8 6 = & 0
 !< / = - 0
 A 8 8
 F / 0+ - & &
 0; & 8 +/ 0
 6 & = + !\$W 8 8
 = - ! W 0 8
 & 8 8 /
 8?6 = - 0
 & 8 8 +/
 bias F / 0 0; 8?6
 & &
 & 0

F / 0+ L) 6 3 " 3 3

)		B	B
3 %	. 8?6	W%	
!< !	QD JD	(+Q	Q\$ \$+
!< /	/ \$D	D\$!	! (/
/< !	+ !J	!Q	+ / D
!< /	/	! \$	! QQ
/<+!	/	!!!	! \$
+!<+!	! J\$!!!	!! \$
+!<\$!	! D/	!!!	!!!
\$!<! !	! +/	!!!	!!!
/!<D!	!! Q	!!!	!!!
D!<J!	!! Q	!!!	!!!
J!<Q!	!!	!!!	!!!
Q!<! !	!! \$!!!	!!!

)		B	B
3 %	. 8?6	W%	
!	+ !\$	!! D	!!
!</	J/ \$	D Q!	/ D(



. - / 0 L . &

&

F / 0\$ <

& & &

- - & & 0 1

= & -

%0A - & . -

/ 0+ 8 & &

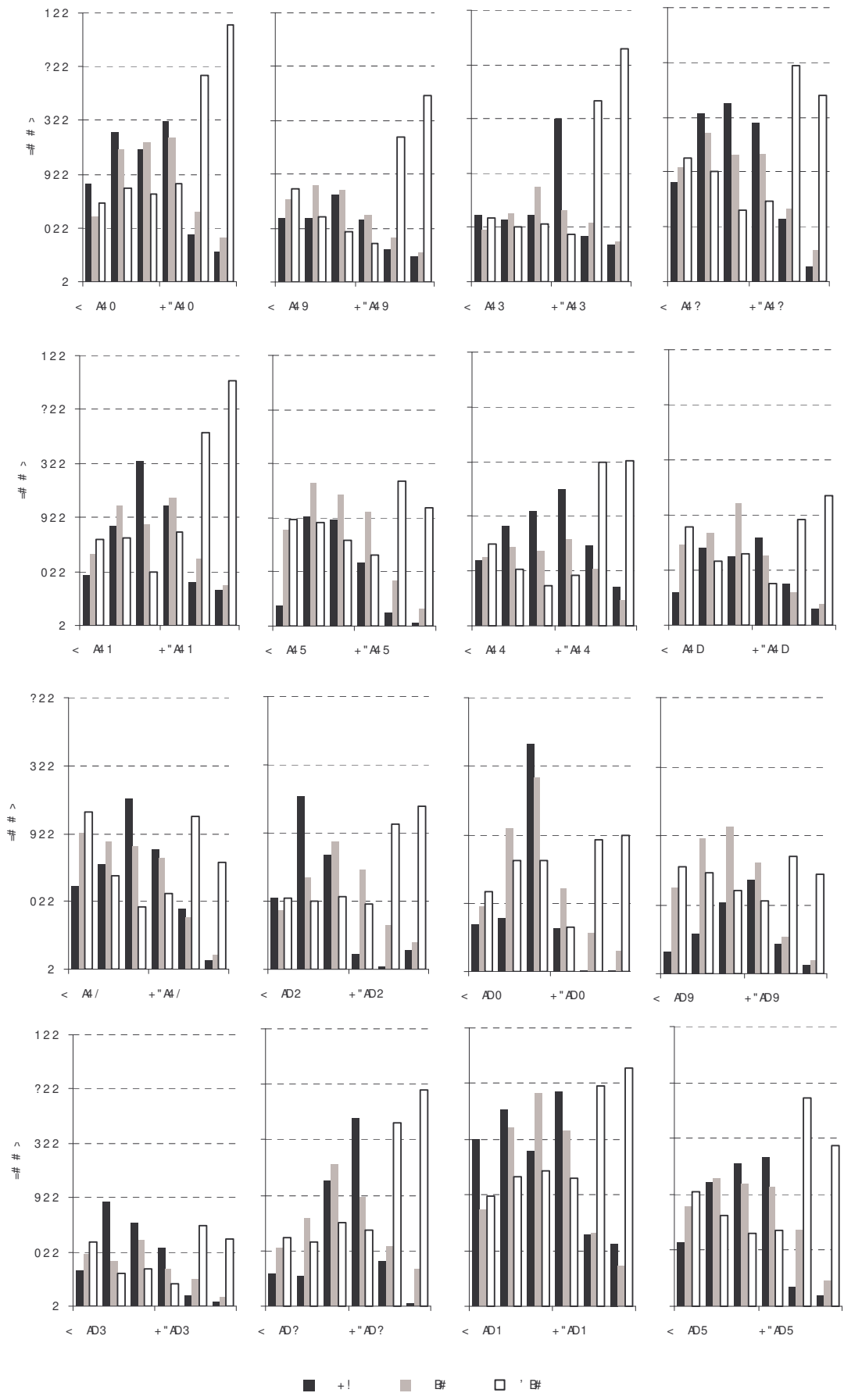
= 6 = 6 6 & +0 0 %2 & 0

& 8 -

0

F / 0\$ L) & C% 3 3 3

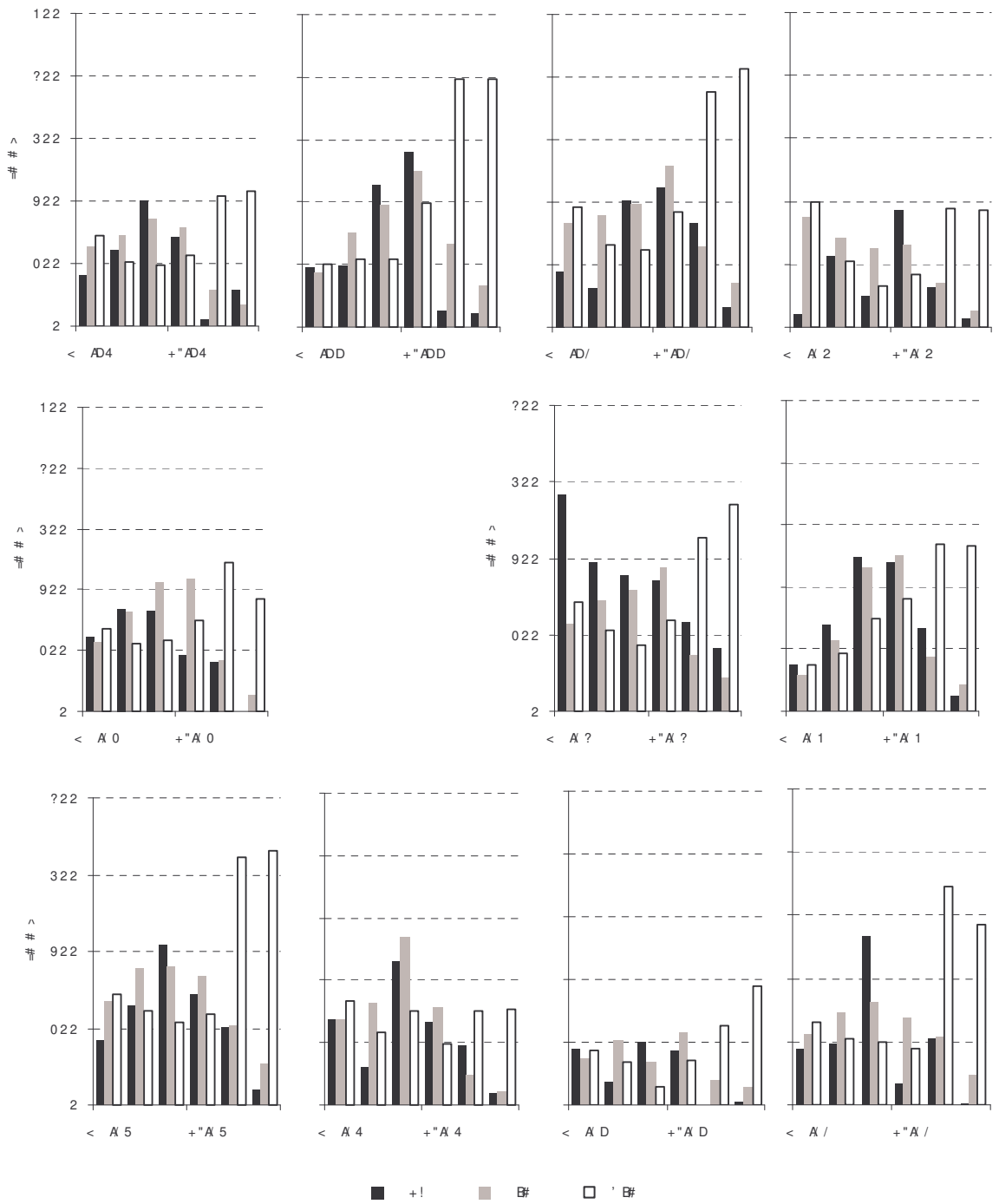
A		!			+	\$	/	D	J	Q	(
3	△ J	△ Q	△ !	△ (D	△ /J	△ !	△ DJ	△ QD	△ D+	△ +!!	△ !+
3	! JD	! / J	! / Q+	! D\$/	! / \$	! D /	! \$QD	! D J	! / !!	! D+	! / Q



. - / 0+ L N

&

+/



.- / 0+ L N

&

)

8

F / 0

& &

&

& - 3 % & & +0 0 %

)

7

&

8 ! J!

8

- 0 U

6

8

7

6

0)

+D

< =

0 F & - . - / O\$

F / O' < =

& L 8 &

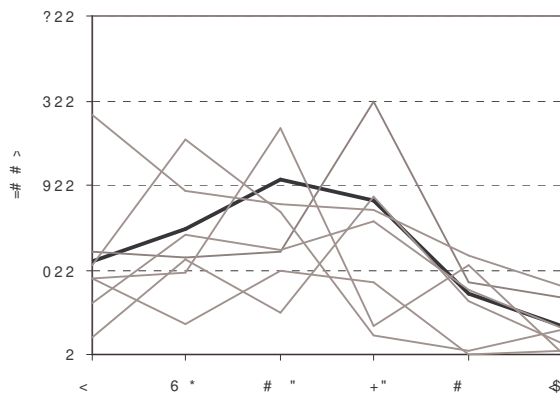
-

0

F / O' L N & 3 3 &

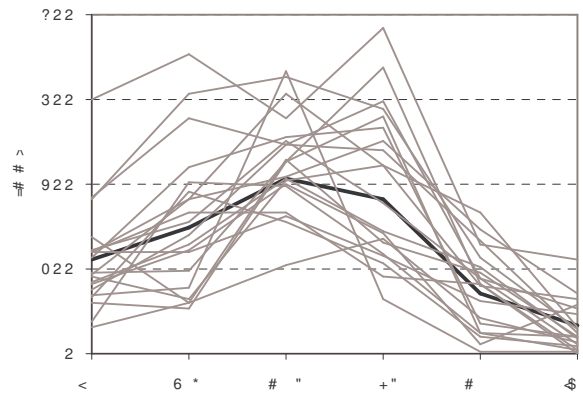
	, <	, <	, < #	, < ;	, < /	, < -	, < <	, < =	, < ,	, = .	, =	, =	, = #	, = ;
C	! (	! (	! + \$	! ( \$ J	! J / (	! ( ! \$	! Q Q	! D + D	! J (	! / J	! Q Q J	! J ! /	! J + \$	! J Q
F_)	;	;))	;)	#	;	;	#	#	#	;
	, = /	, = -	, = <	, = =	, = ,	, , .	, ,	, , ;	, , /	, , -	, , <	, , =	, , ,	
C	! J (	! Q Q Q	! Q D D	! Q Q	! J J	! (	! J \$ D	! / ! Q	! (D \$	! Q J	! Q /	! D !	! D (\$	
F_))	#	;)	#	#))	;	;	#	;	

_F E# L " ; L ") < 0



! 0 / 43B4DBD2B/ 2B/ ?B/ DB/ /

. - / O\$ L N



! ! ! . "

& -) %

; . - / 0+ / O\$ ((((+ & +0 %

& &

- - &

F / O\$ % # & &

- & 8 8 &

& & 0 S -

& - . - / O' 0 ; -