

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE



PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS INTRASAZONAIS PARA A BACIA DO RIO MADEIRA

CHAMADA PÚBLICA N. 001/2020 - FAPESP – FAPEAM

SISTEMA DE PREVISÃO DE SECAS E ENCHENTES
EM APOIO À GESTÃO DA RESERVA DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO RIO
MADEIRA



LABCLIM

Laboratório de Modelagem
do Sistema Climático Terrestre

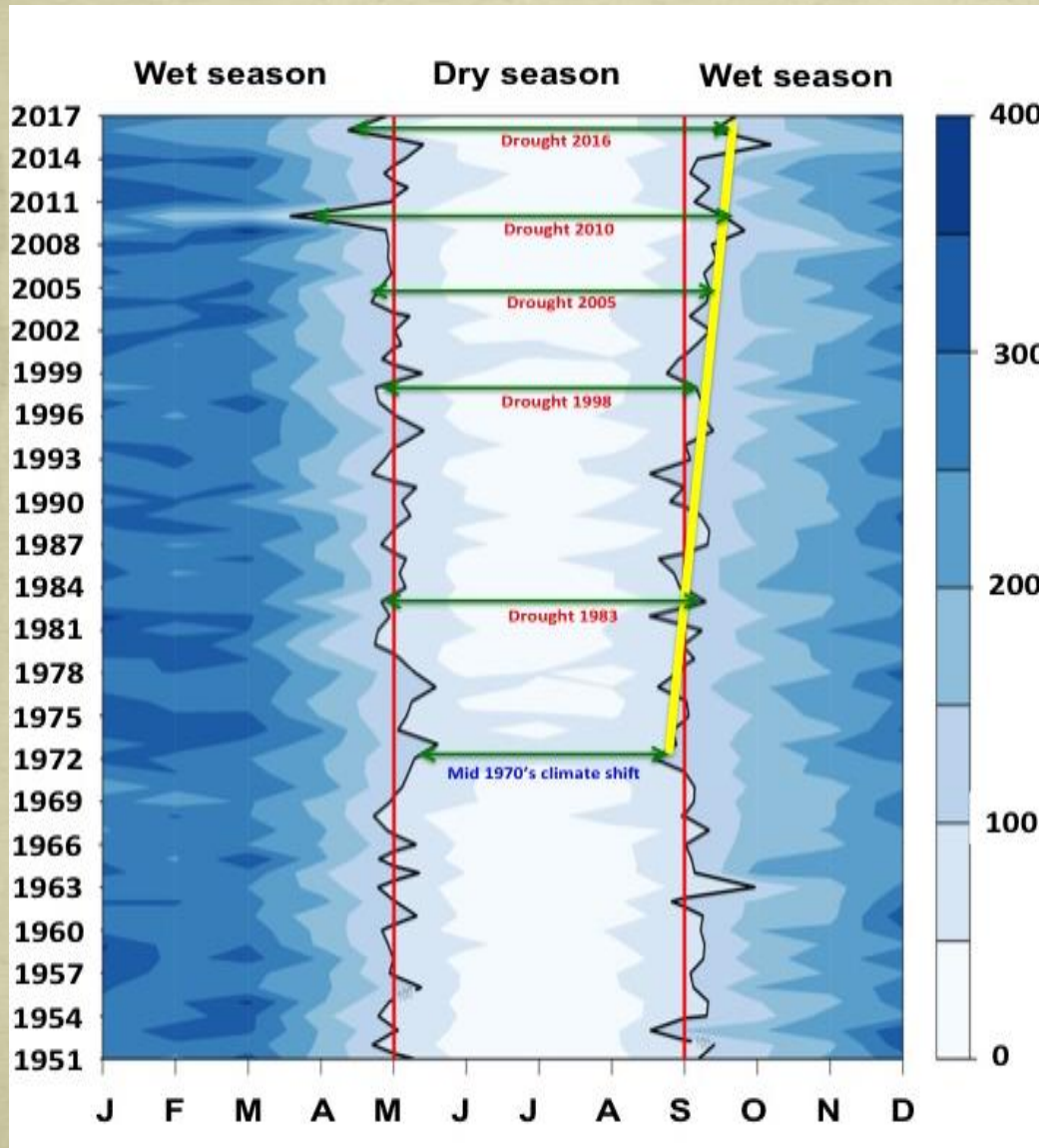


FAPEAM

Fundação de Amparo à Pesquisa
do Estado do Amazonas

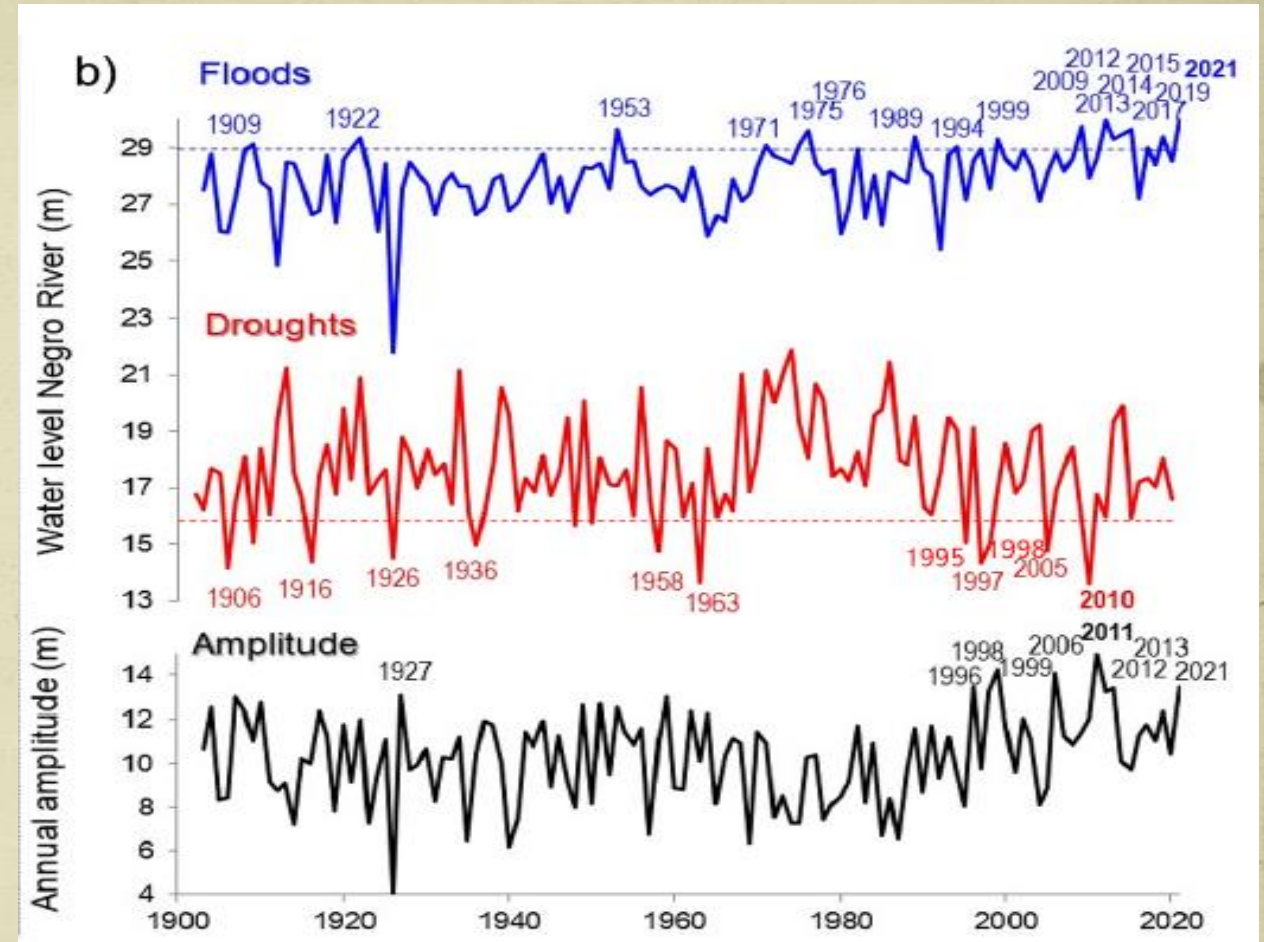


O risco de inundações e secas extremas aumentaram com maior frequência coincidindo com uma hipótese de intensificação do ciclo hidrológico.



(Marengo *et al.*, 2018)

Rainfall for Southern Amazonia (mm/month)



Espinoza *et al.*, (2011); Tomasella *et al.*, (2011); Satyamurty *et al.*, (2013); Espinoza *et al.*, (2014); Filizola *et al.*, (2014); Marengo e Espinoza (2016); Jimenez *et al.*, (2018); Espinoza *et al.*, (2019) e Espinoza *et al.*, (2022).

Tais eventos extremos impactam a população Amazônica, na qual depende fortemente dos recursos hídricos.



Biodiversidade



Geração de energia



Saúde



Navegação fluvial



Transporte



Agricultura



Economia




Povos e comunidades

As previsões antecipadas visam contribuir para:

Planejamento estratégico de prevenção e mitigação dos efeitos de desastres naturais relacionados às secas e enchentes;

O gerenciamento dos recursos hídricos em seus diversos usos, como:

- 
- Geração de energia e uso da água em reservatórios;
 - Alocação de água para agricultura;
 - Avaliação da fauna e flora;
 - Qualidade da água;
 - Transporte, navegação fluvial e abastecimento.

(Foster *et. al.*, 2017; Meißner *et. al.*, 2017; Shah *et. al.*, 2017; Vitart e Robertson, 2018). 4

1.1 OBJETIVO

Avaliar o desempenho e as incertezas das previsões intrasazonais hidroclimáticas para a bacia do Rio Madeira utilizando diferentes parametrizações físicas atmosféricas e hidrológicas.

a) Avaliar o desempenho e as incertezas das previsões intrasazonais de precipitação e evapotranspiração para a bacia do Rio Madeira utilizando diferentes parametrizações físicas do Modelo Regional Eta;

b) Avaliar o desempenho e as incertezas das previsões intrasazonais de descarga (vazão), cota (nível) e áreas inundáveis para a bacia do Rio Madeira utilizando diferentes parametrizações físicas do Modelo Regional Eta e do Modelo Hidrológico Distribuído de Grandes Bacias (MGB);

c) Contribuir para o aprimoramento e desenvolvimento da capacidade de previsão hidrológica intrasazonal em antecipar alertas de eventos hidroclimáticos (secas e enchentes), na bacia do Rio Madeira;

d) Avaliar e quantificar as fontes de incertezas e sua importância relativa ao resultado da previsão intrasazonal hidroclimática na bacia do Rio Madeira;

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

- ✓ O rio Madeira é o segundo maior afluente da Amazônia;
- ✓ Precipitação média anual de 1.940 mm
- ✓ Vazão média anual $31.200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- ✓ Unidades geomorfológicas: os Andes, o escudo brasileiro, a planície amazônica e a formação do arco de Fitzcarrald;
- ✓ Sistemas Atmosféricos: ZCIT; ZCAS e Alta da Bolívia (AB);
- ✓ A hidrovia do rio Madeira é uma importante via de escoamento de grãos – Centro-Oeste – Mercado internacional.

(Molinier *et al.*, 1995; Guyot 1996; Hamilton *et al.*, 2002; ANTAQ, 2011; Muniz & Filizola Júnior, 2015; Molina-Carpio *et al.*, 2017; Espinoza *et al.*, 2019).

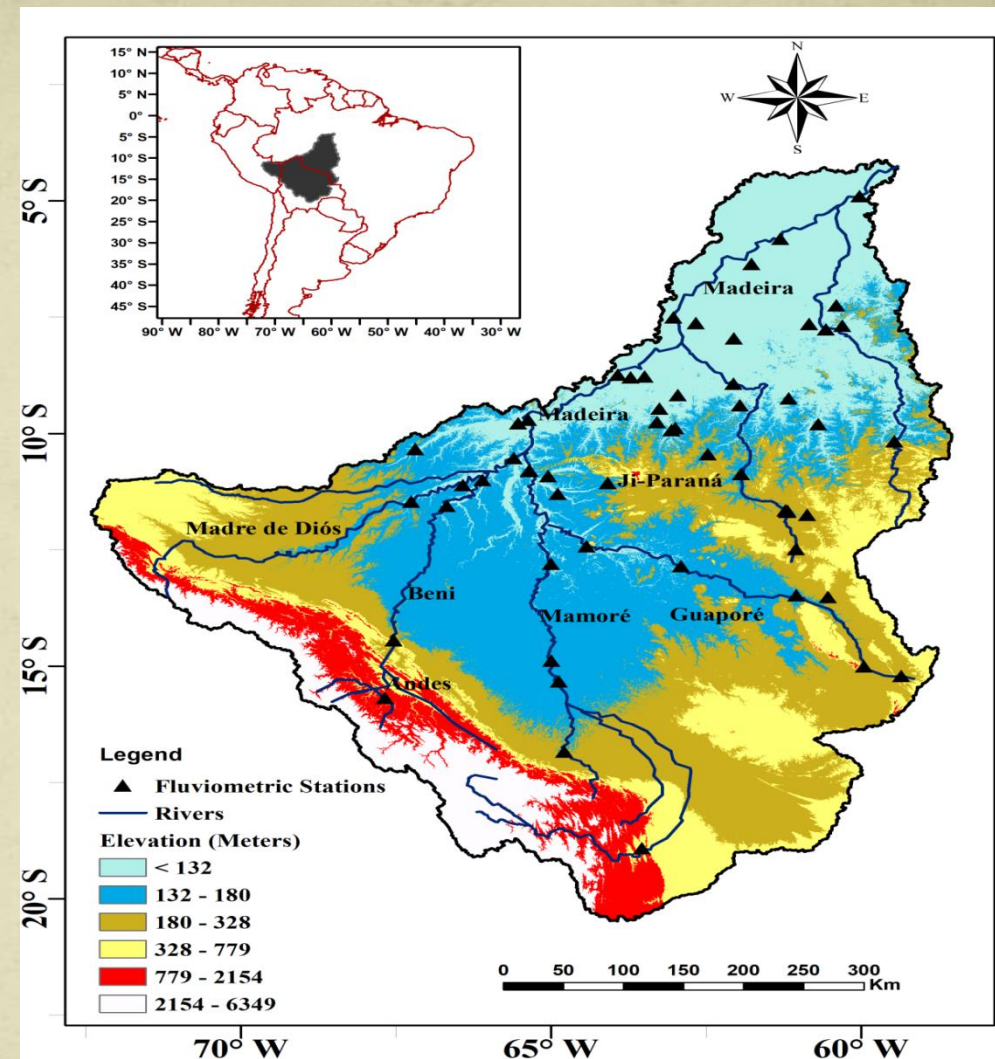


Figura 2.1 - Localização da bacia do rio Madeira apresentado os principais rios (linhas azuis), o relevo e estações fluviométricas na Agência Nacional das Águas (ANA).

2.2 MODELO CLIMÁTICO REGIONAL ETA – CPTEC/INPE

✓ Características:

Coordenada Vertical “ η ” (Mesinger, 1984);

Grade Horizontal: Grade E de Arakawa;

Integração no tempo: Particionamento explícito (“split-explicit”);

Domínio espacial: 12°N-45°S e 25°W-90°W;

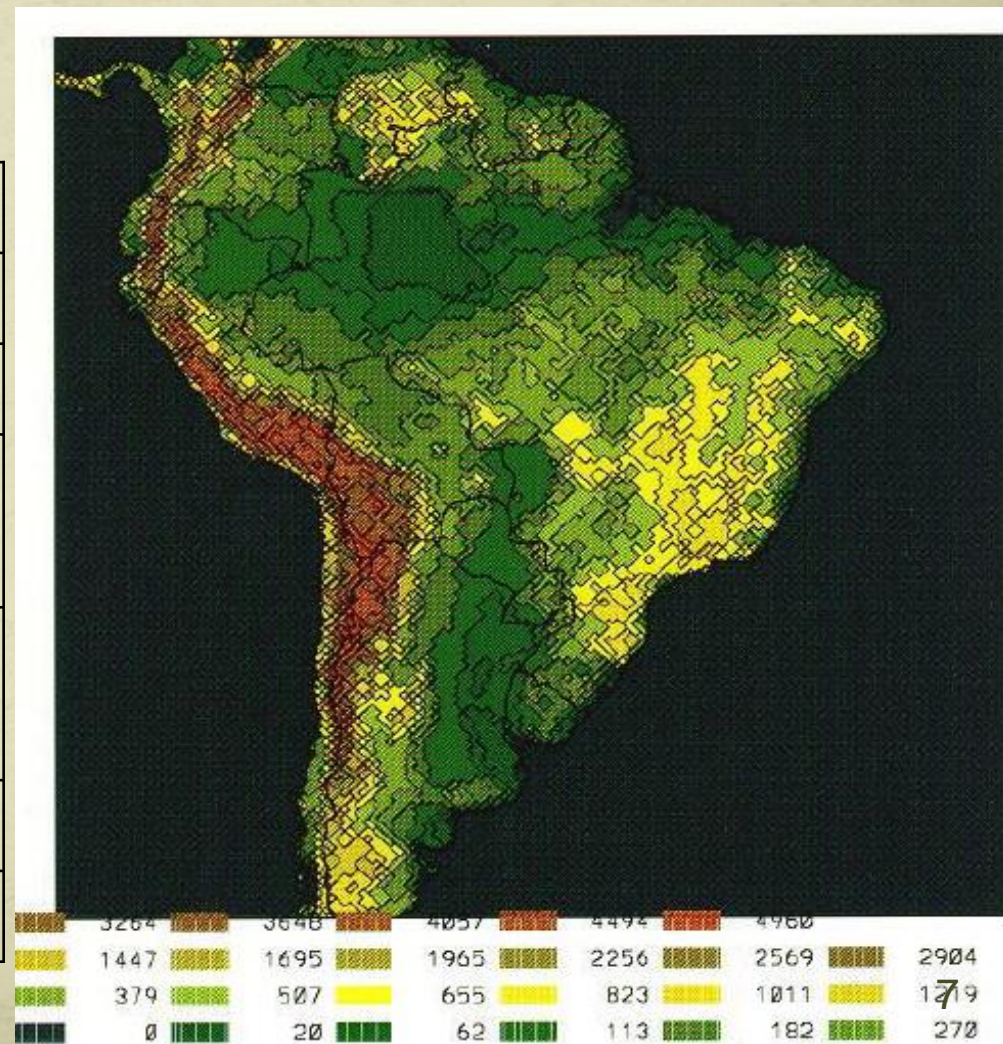
Resolução: 40 km horizontal;

38 níveis verticais – Topo do modelo 25 hPa.

Tabela 1 – Parametrizações incluídas no modelo regional Eta-CPTEC.

Difusão turbulenta na CLP	Mellor e Yamada (1974)
Radiação de onda curta	Fels e Schwarzkopf (1975)
Radiação de onda longa	Lacis e Hansen (1974)
Parametrização de Convecção	Betts-Miller-Janjic (Janjic, 1994); Kain-Fritsh (Kain, 2004)
Microfísica de nuvem	Zhao <i>et al.</i> (1997) ; Ferrier (2002)
Esquema de superfície	NOAH (Ek <i>et al.</i> , 2003)
Mapa de vegetação	Sestini <i>et al.</i> (2002) + PRODES 2015

Chou *et al.*, 2005, 2012; Bustamente *et al.*, 2012; Mesinger *et al.*, 2012)



2.3 MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS - MGB

É um modelo hidrológico distribuído baseado em processos que simulam o ciclo hidrológico através de relações físicas e conceituais.

Os processos representados no MGB-IPH são:

- Interceptação;
- Evapotranspiração;
- Balanço de água no solo;
- Escoamentos superficiais, sub-superficiais e subterrâneos;
- Propagação de Muskingum-Cunge e inercial de vazões na rede de drenagem.

(Collischonn *et al.*, 2001; Collischonn *et al.*, 2007; Paiva *et al.*, 2011; Pontes *et al.*, 2017).

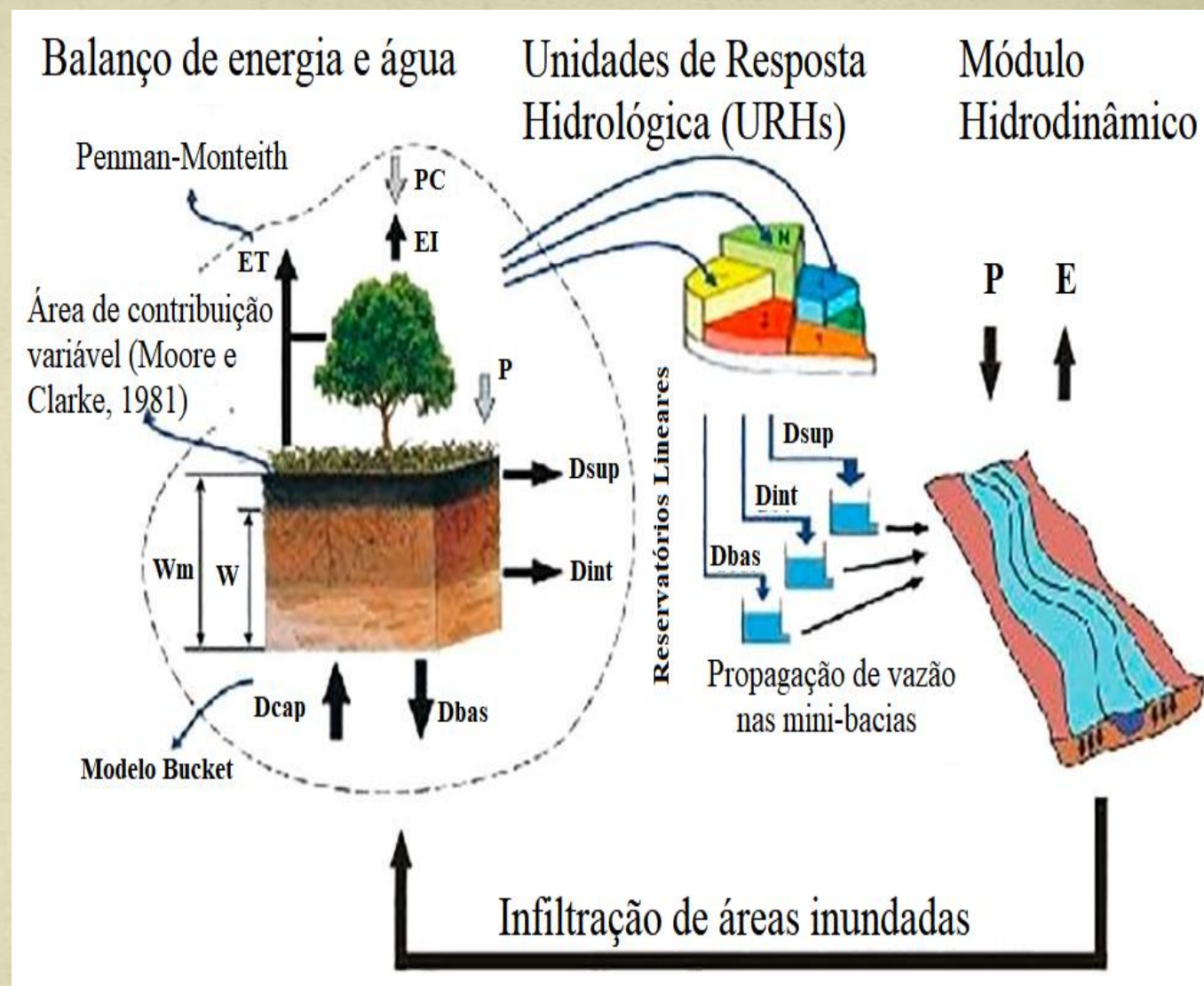


Figura 2.2 - Principais processos hidrológicos representados no modelo MGB-IPH.

2.4 ESTRATÉGIA NUMÉRICA DE PREVISÕES SAZONAL



2.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO

Para avaliação e calibração do modelo hidrológico serão empregadas métricas estatísticas de desempenho:

Coeficiente de Correlação de Anomalias (ACC);

Coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe para vazão (NSE);

Coeficiente de eficiência de Nash–Sutcliffe para logaritmos de vazão (NSElog);

Eficiência Kling-Gupta (KGE 2012).

2.6 MÉTODO DE CORREÇÃO DE VIÉS

Three different methods of Bias Correction (BC)

Linear Scaling (LS) by Lenderink et al. (2007);

Empirical Quantile Mapping (EQM) by Themeßl et al. (2012);

Gamma Quantile Mapping - Parametric (PQM) by Piani et al. (2010)

**Precipitação, Temperatura, Pressão Atmosférica, Umidade relativa do ar,
Velocidade do vento e Radiação de onda curta incidente**

2.7 AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS POR CONJUNTO

Validação das Variáveis
Hidroclimáticas

Dados de Reanálises
Dados observados

MERGE e GLEAM: Precipitação, Evapotranspiração;
ANA e SO-HYBAM – Vazão e Níveis de Água;

- **Erro Médio Relativo (EMR)** fornece um viés geral da previsão por conjunto;

$$EMR = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{prev(t)} - Q_{obs(t)})}{\sum_{t=1}^N Q_{obs(t)}}$$

- **Erro Médio Absoluto (EMA)** avalia a diferença absoluta entre previsões e observações correspondentes;

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |Q_{prev(t)} - Q_{obs(t)}|$$

Quanto mais próximo de zero for o EMA, melhor é a previsão, pois menores são as diferenças entre previstas e observadas.

2.7 AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS POR CONJUNTO

- **Raiz do erro médio quadrático (RMSE)** é uma medida de destreza que mede o desempenho de uma previsão principal em relação a uma outra previsão definida como referência;

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{prev(t)} - Q_{obs(t)})^2 \right]^{1/2}$$

- **Coefficiente de Correlação (r)** mede o grau de associação linear ente os valores observados e os valores previstos;

$$r = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{prev(t)} - \bar{Q}_{prev(t)}) (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs(t)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_{prev(t)} - \bar{Q}_{prev(t)})^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_{obs(t)} - \bar{Q}_{obs(t)})^2}}$$

O valor de r para uma perfeita associação linear é 1. Zero indica que não existe associação linear e valores negativos indicam que existe uma associação linear inversamente proporcional.

2.7 AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS POR CONJUNTO

- **continuous_ranked_probability_skill_score (CRPSS)** este índice mede a qualidade de uma previsão probabilística contínua, resumindo esta a um valor singular (único).

$$CRPSS = \int_{-\infty}^{\infty} [F_p(Q_{prev(t)}) - F_o(Q_{prev(t)})]^2 d(Q_{prev(t)})$$

$$F_o(Q_{prev(t)}) = \begin{cases} 0, & Q_{prev(t)} < \text{valor observado} \\ 1, & Q_{prev(t)} \geq \text{valor observado} \end{cases}$$

$F_o(Q_{prev(t)})$ é a função cumulativa de probabilidades observadas e $F_p(Q_{prev(t)})$ é a função cumulativa de probabilidades da previsão por conjunto;

- **Brier Score (BS) e Brier Skill Score (BSS)** são medidas de destreza que mede o desempenho de uma previsão principal em relação a uma outra previsão definida como referência.

$$BS(L) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (pp_t - po_t)^2$$

$$BSS = \frac{BS_{prev} - BS_{ref}}{BS_{perf} - BS_{ref}} = 1 - \frac{BS_{prev}}{BS_{ref}}$$

2.7 AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS POR CONJUNTO

- **Relative Operating Characteristics (Diagrama ROC)** mede a habilidade de um sistema de previsão em discriminar entre eventos ocorridos e não ocorridos, como, por exemplo, a ocorrência ou não de inundações.

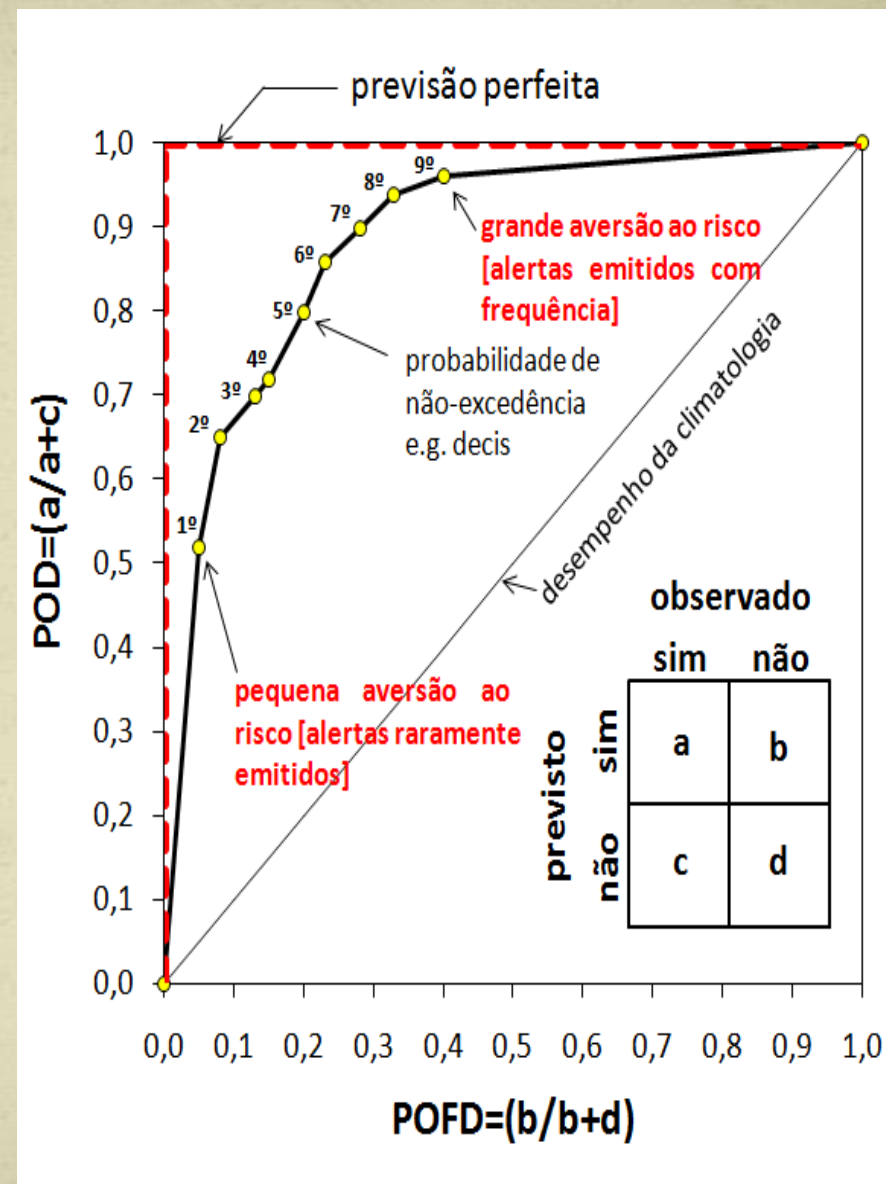
Probabilidade de Detecção

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad (\text{melhor} = 1)$$

Probabilidade de Falsa Detecção

$$POFD = \frac{b}{b + d} \quad (\text{melhor} = 0)$$

Quanto mais a linha que conecta os pontos se aproxima do canto esquerdo superior, maior é a proporção de eventos corretamente previstos (POD) e menor é a taxa de alarmes falsos (POFD), o que significa um melhor desempenho da previsão.



2.7 AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES HIDROCLIMÁTICAS POR CONJUNTO

- Performance diagram summarizing the SR, POD, BIAS, and CSI mede a qualidade de um sistema de previsão em discriminar entre eventos ocorridos e não ocorridos, como, por exemplo, a ocorrência ou não de inundações.

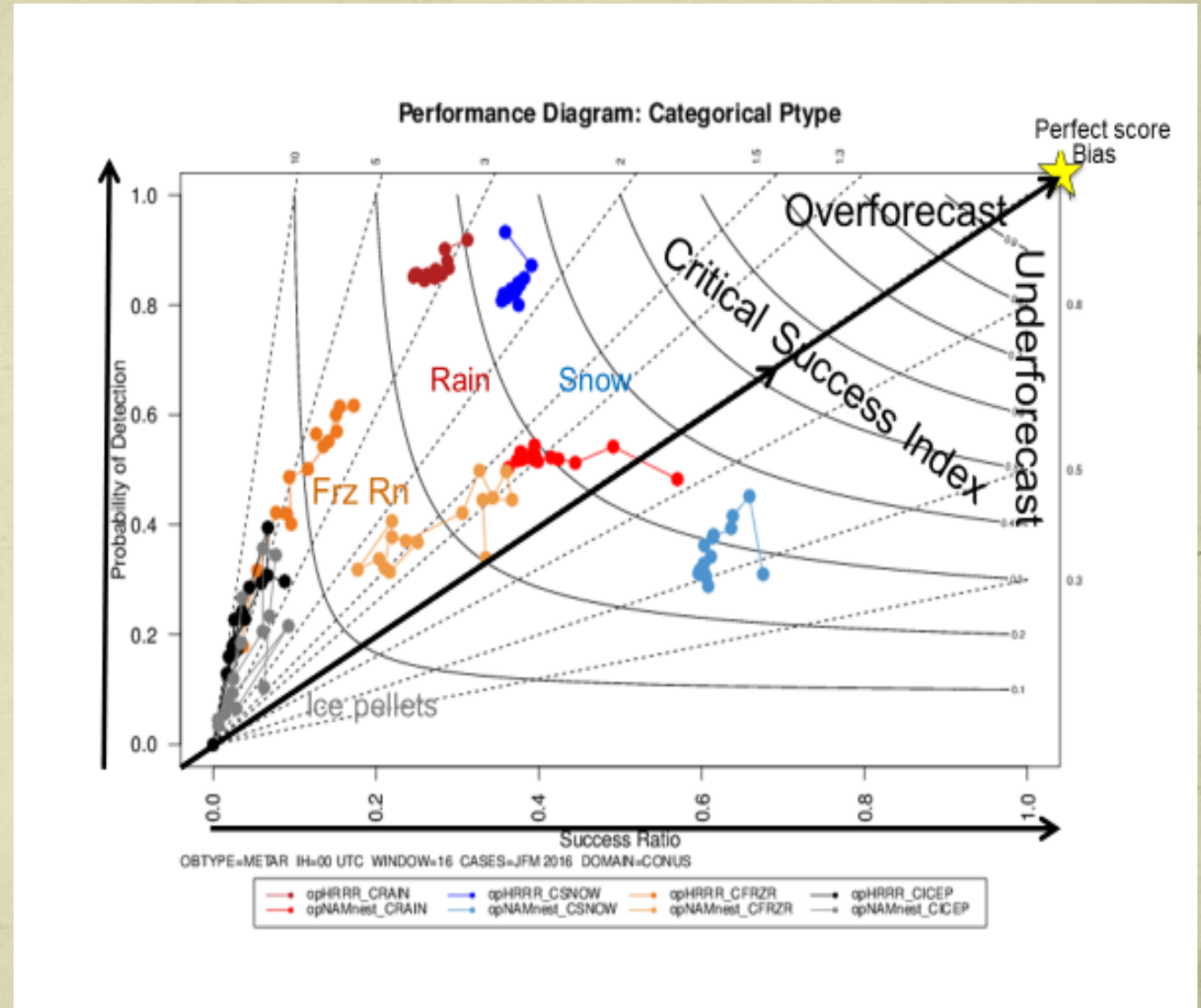
$$\text{POD} = \frac{a}{a + c} \quad (\text{melhor} = 1)$$

$$\text{SR} = 1 - \text{FAR} \quad (\text{melhor} = 1)$$

$$\text{FAR} = \frac{b}{b + d} \quad (\text{melhor} = 0)$$

$$\text{BIAS} = \frac{a + b}{a + c} \quad (\text{melhor} = 1)$$

$$\text{CSI} = \frac{a}{a + b + c} \quad (\text{melhor} = 1)$$



3. RESULTADOS - Precipitação

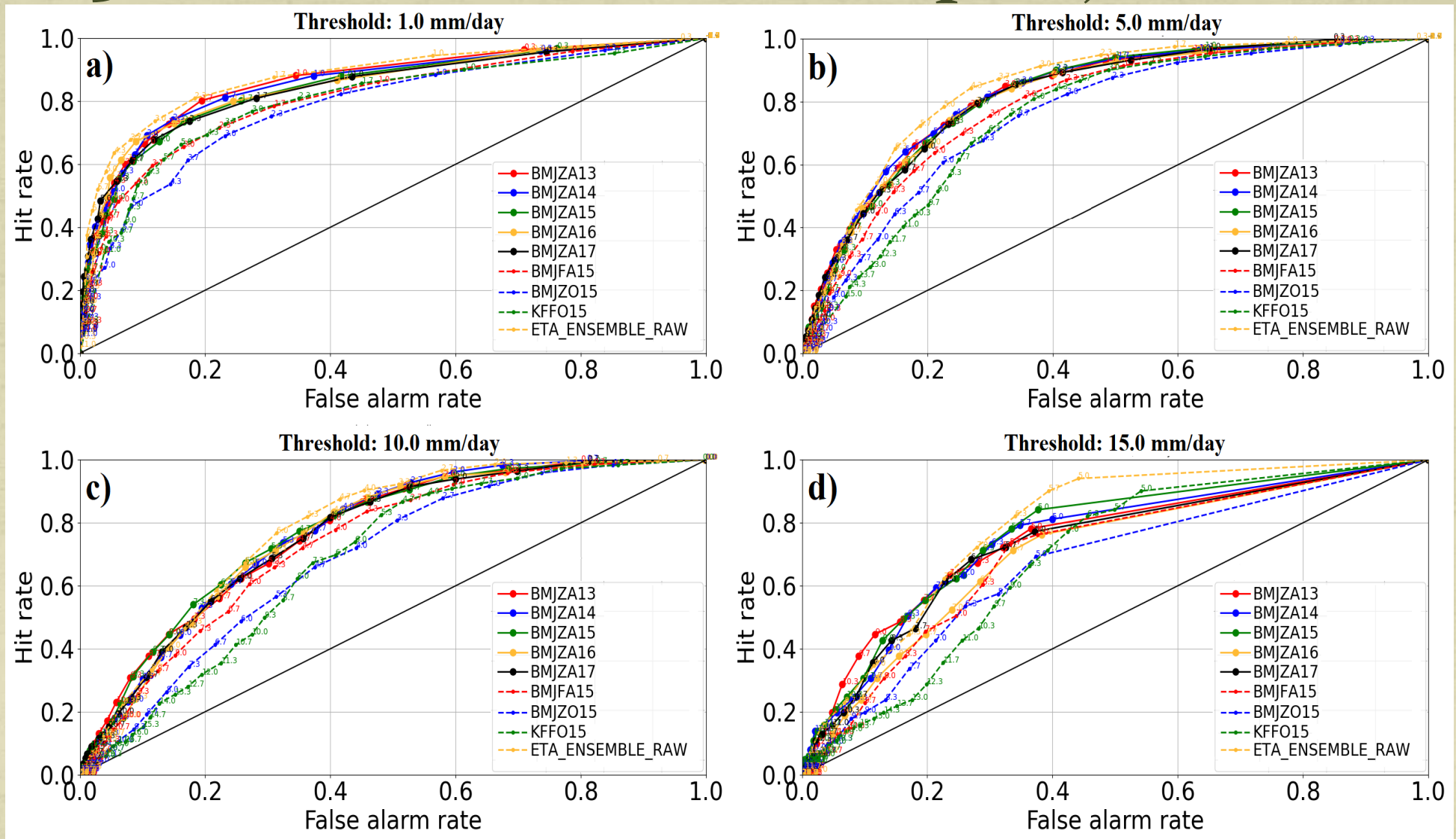


Figure 3.1: Relative Operational Characteristics (ROC) curves for forecasts in different thresholds of precipitation. Colors indicate different members. Curve for the ensemble mean is also presented.

3. RESULTADOS - Precipitação

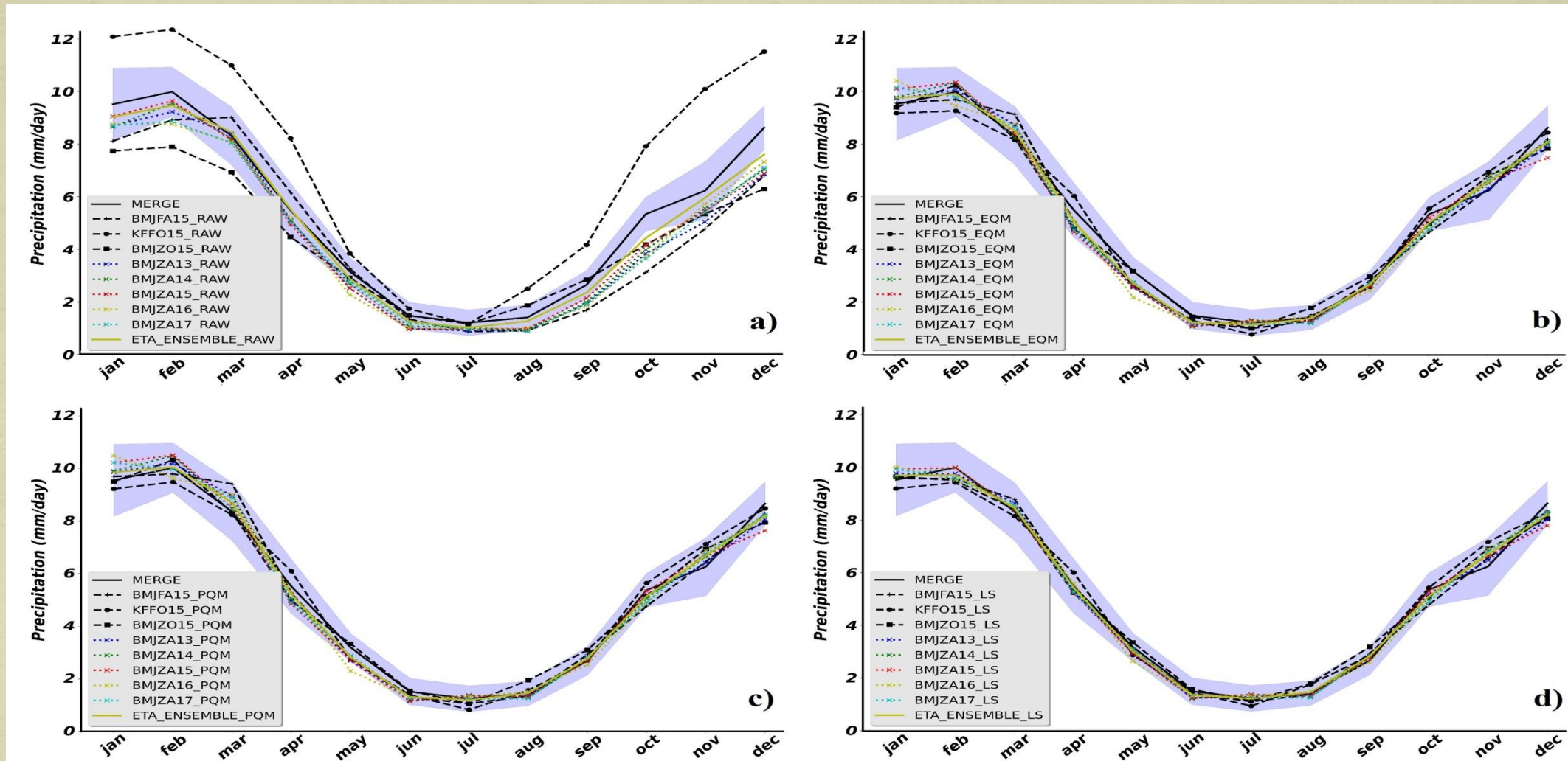


Figure 3.2: Seasonal cycles of 10-year mean precipitation obtained from MERGE, the ensemble mean and the individual members: (a) before bias correction, (b) after EQM, (c) after PQM, (d) after LS. The blue shading represents the standard deviation.

3. RESULTADOS - Precipitação

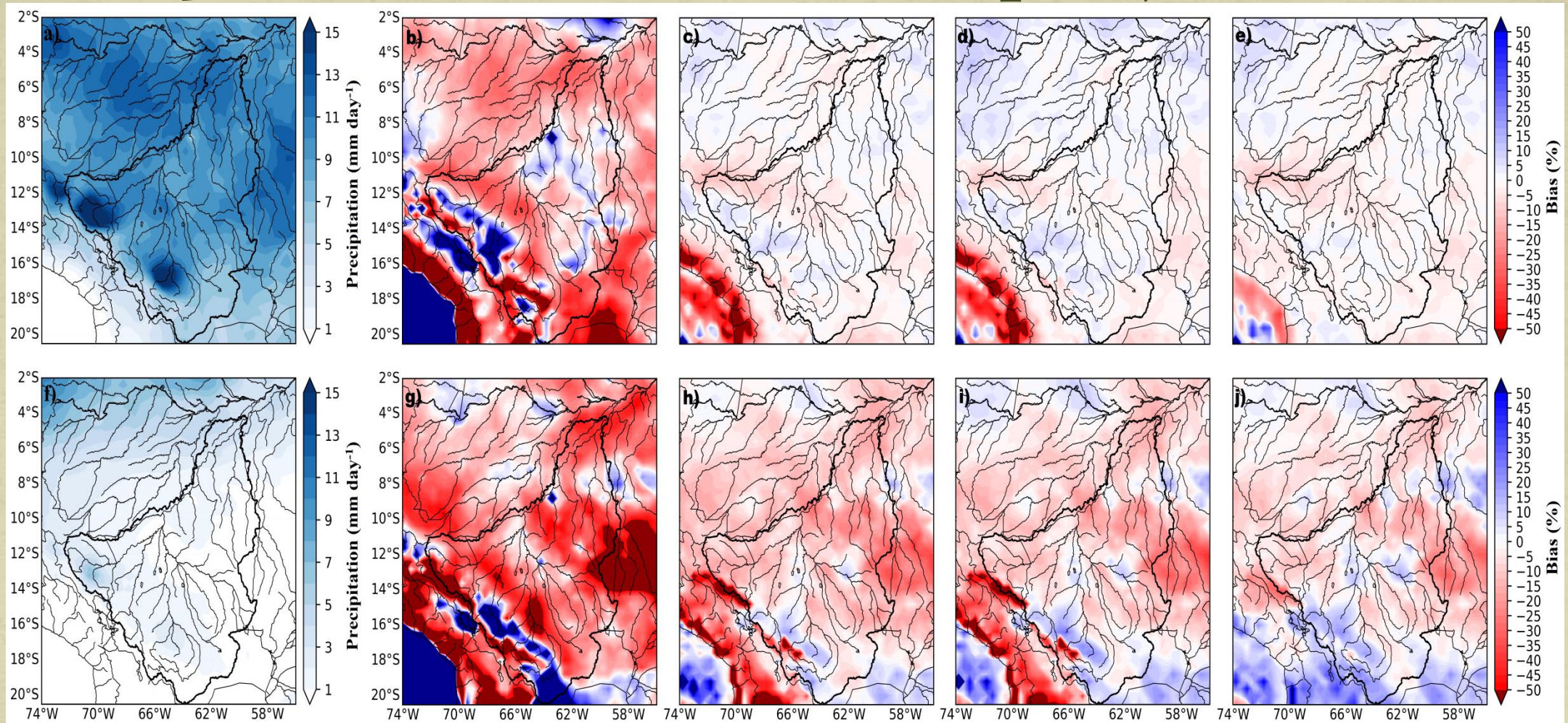


Figure 3.3: Spatial distribution of mean precipitation (mm day⁻¹) (2002 - 2012) for the wet (a) and dry (f) periods obtained from MERGE. Bias (%) in the ensemble mean obtained by RCM-Eta, without correction (raw) for wet (b) and dry (g) periods. Bias after correction: (c) wet and (h) dry for EQM; (d) wet and (i) dry for PQM; (e) wet and (j) dry for LS.

3. RESULTADOS - Precipitação

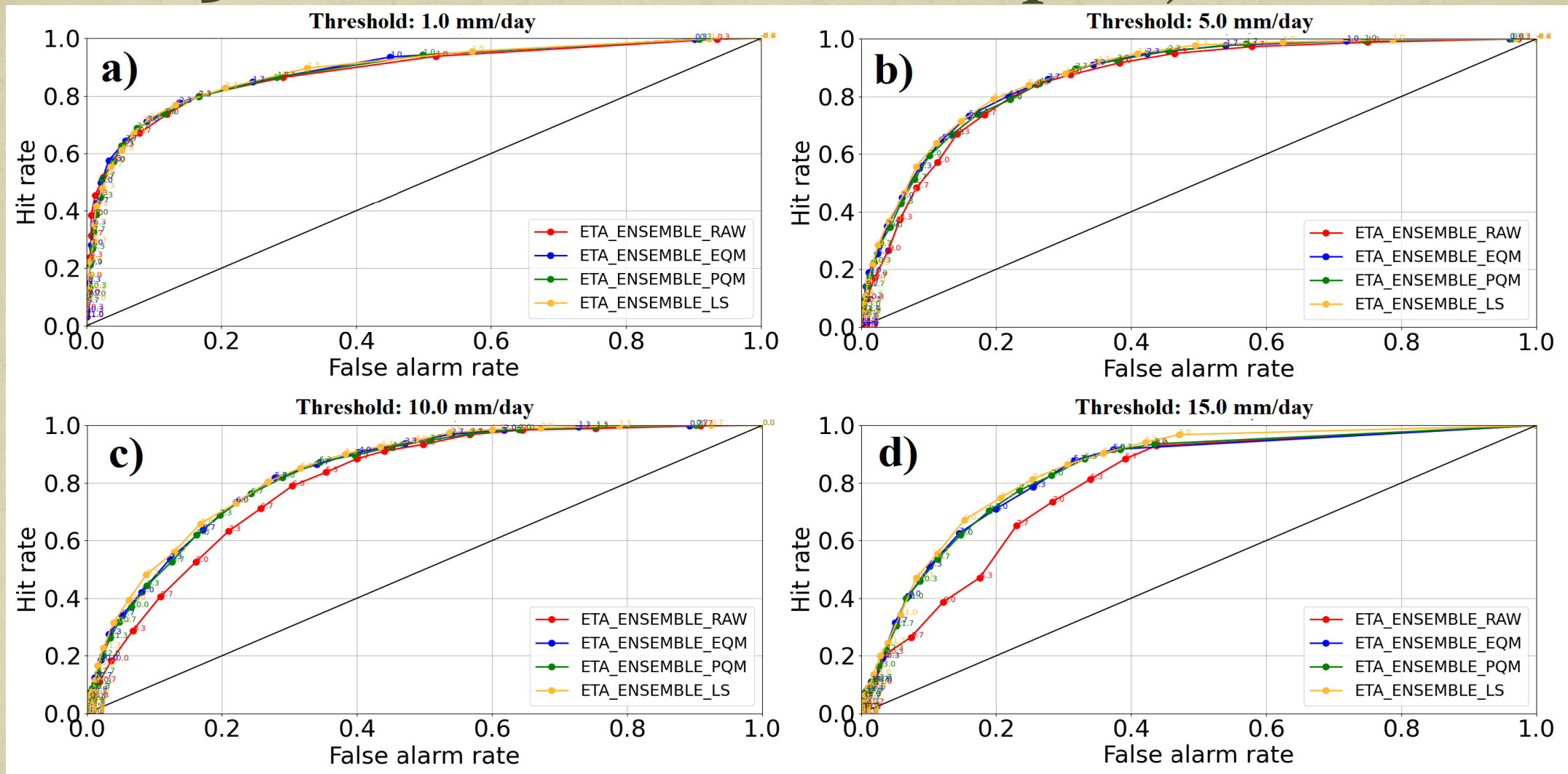


Figure 3.4: Relative Operational Characteristics curves (ROC) for the ensemble mean forecast from RCM-Eta without bias correction and after bias correction by the three methods, EQM, PQM and LS.

3. RESULTADOS - Precipitação

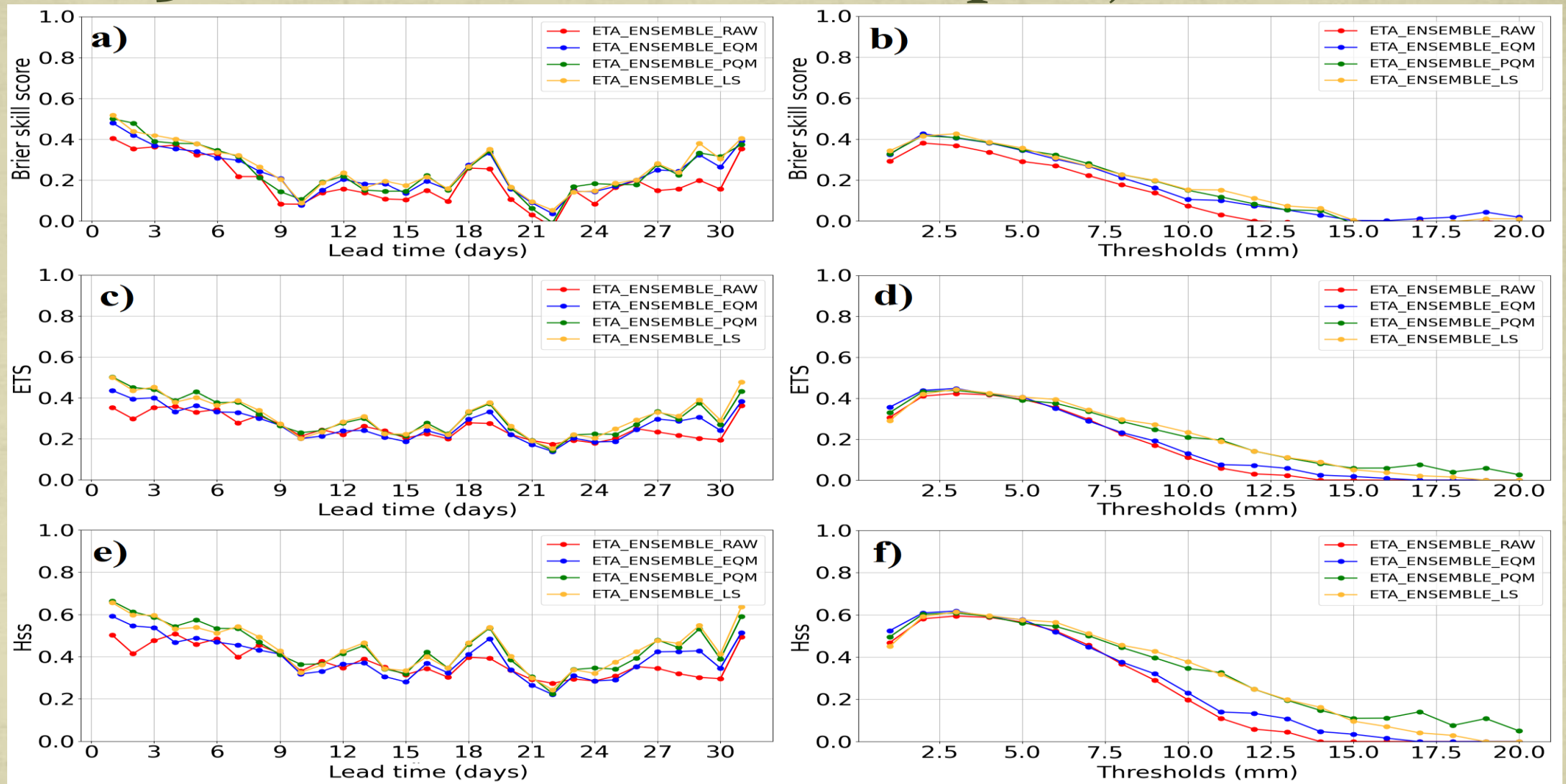
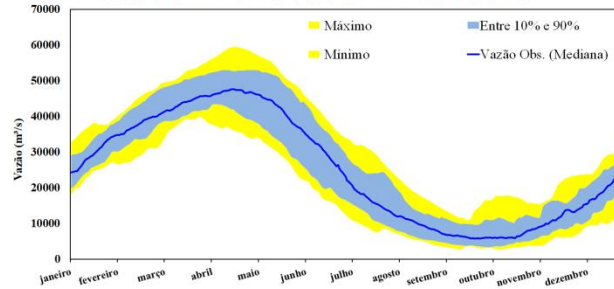


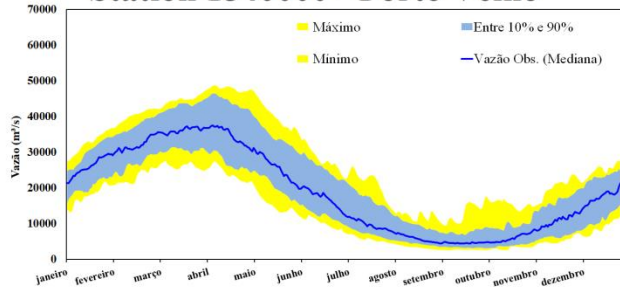
Figure 3.5: BSS, ETS and HSS for the ensemble mean precipitation forecast by the RCM-Eta, without and with bias correction by EQM, PQM and LS. Left column: scores as functions of forecast lead time. Right column: scores as functions of rainfall. 21

3. RESULTADOS - Vazão

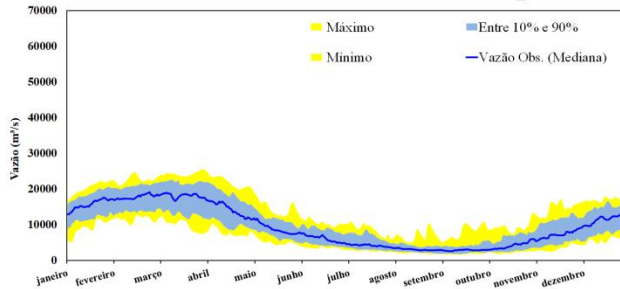
Station 15700000 - Manicoré



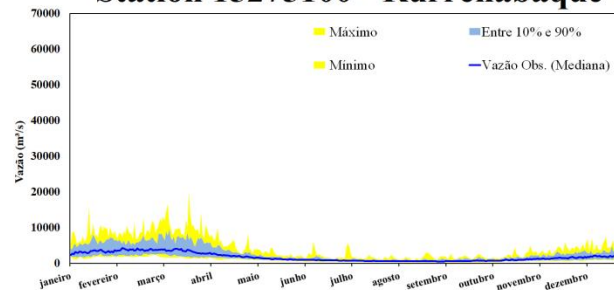
Station 1540000 - Porto Velho



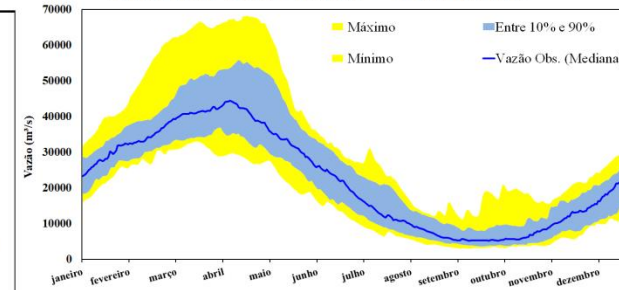
Station 15295500 - Cachuela Esperanza



Station 15275100 - Rurrenabaque



Station 15630000 - Humaitá



Station 15320002 - Abunã

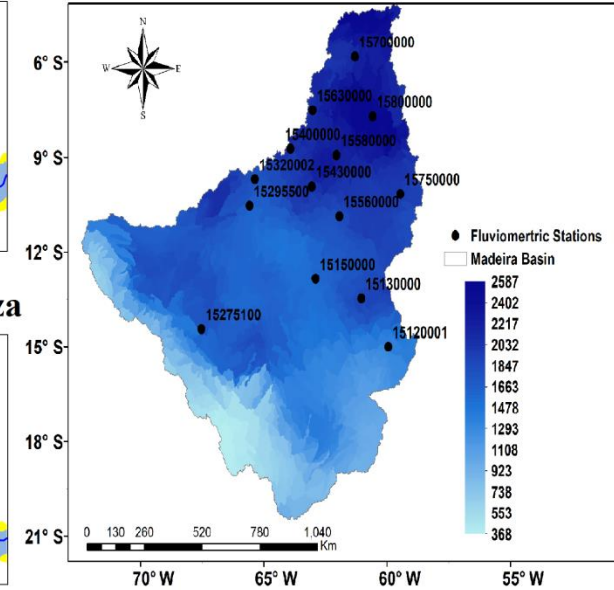
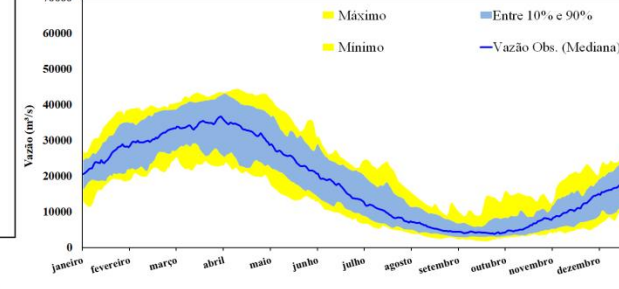
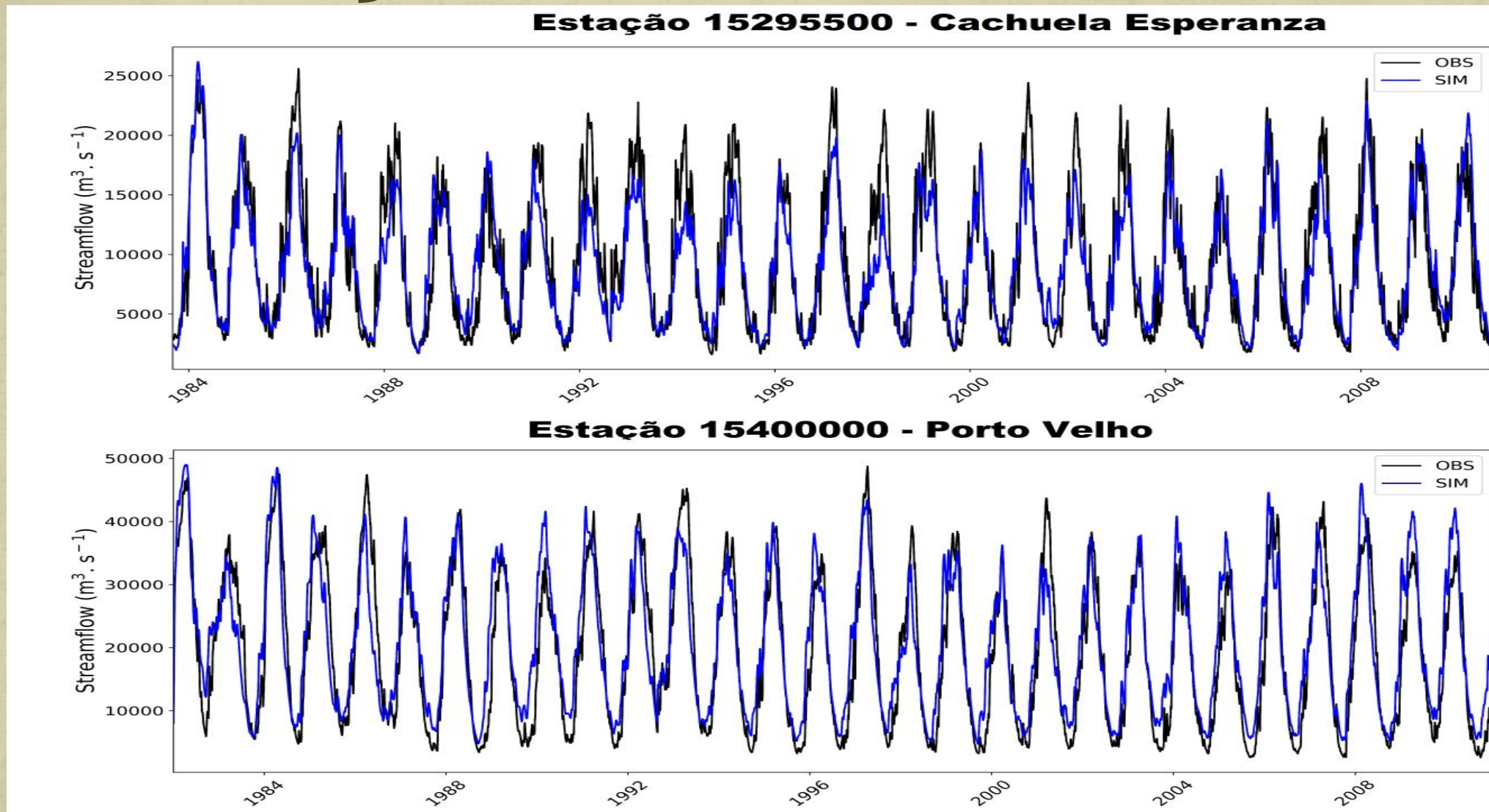


Figure 3.6: Precipitação acumulada anual (mm/ano) do Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation (CPC) e ciclo sazonal de vazões observadas (in situ) das estações fluviométricas, a área azul sombreada representa o intervalos de confiança entre os percentis de 10-90%, e a área amarela sombreada representa os máximos e mínimos das descargas climatológicas diárias da Agencia Nacional das Aguas (ANA).

3. RESULTADOS - Vazão



BIAS = -5.58
ACC = 0.91
NSE = 0.81
NSElog = 0.84
KGE = 0.81

BIAS = -11.69
ACC = 0.91
NSE = 0.77
NSElog = 0.62
KGE = 0.79

Figure 3.7: Vazões simuladas (azul) e observadas (apreito) usando o modelo MGB-IPH em Cachuela esperanza, Porto velho e Manicoré para o período de calibração (1982-2001) e validação (2002-2010).

3. RESULTADOS - Vazão

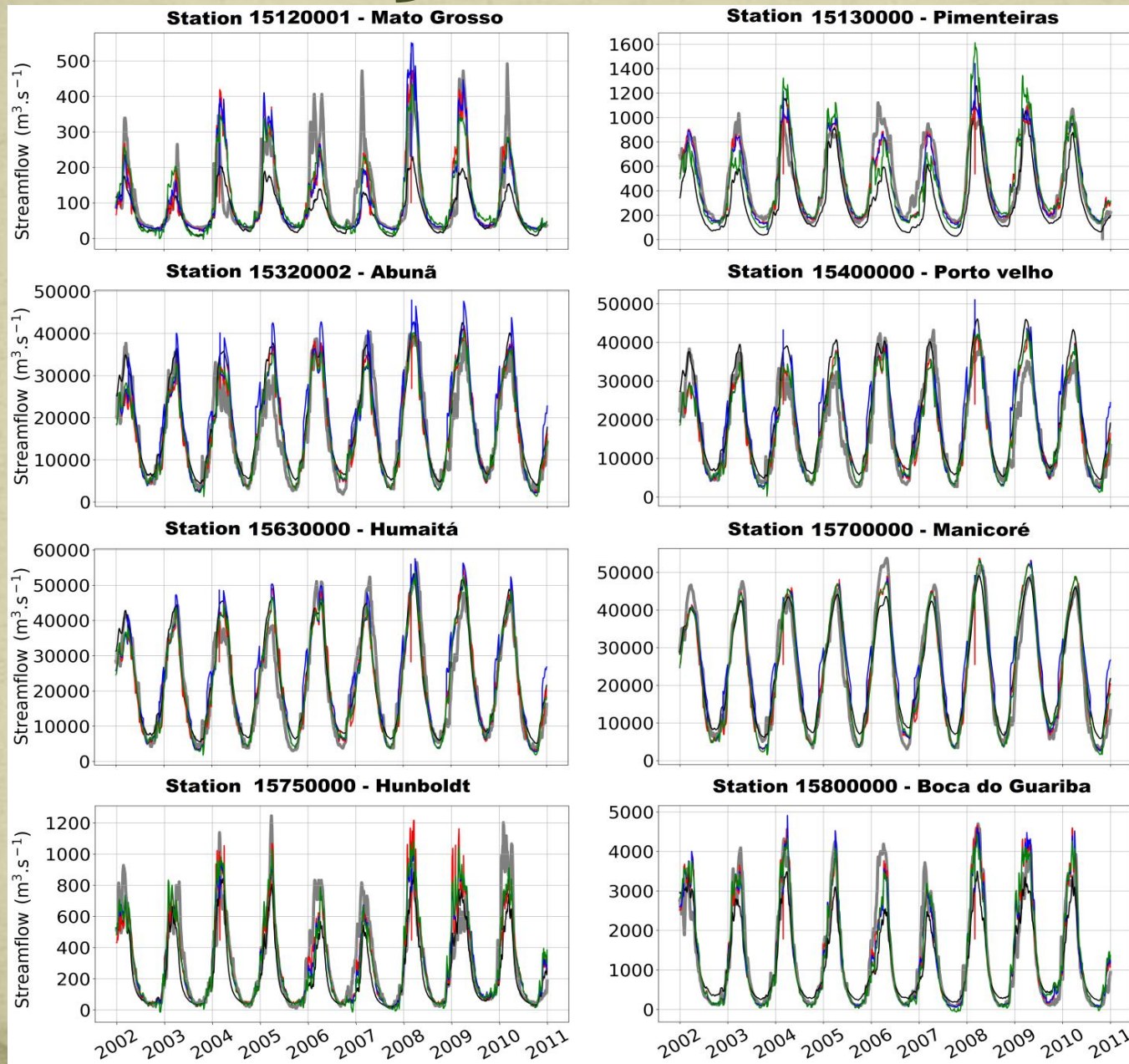


Figure 3.8: Hidrogramas de vazões diárias usando observações (linha cinza), Ensemble do RCM-Eta simulado sem correção de viés - Eta-MGB-RAW (linha preta) e corrigidas por três métodos de correção de viés: Eta-MGB-EQM (linha vermelha), Eta-MGB-EQM (linha azul) e Eta-MGB-EQM (linha verde) para algumas estações.

3. RESULTADOS - Vazão

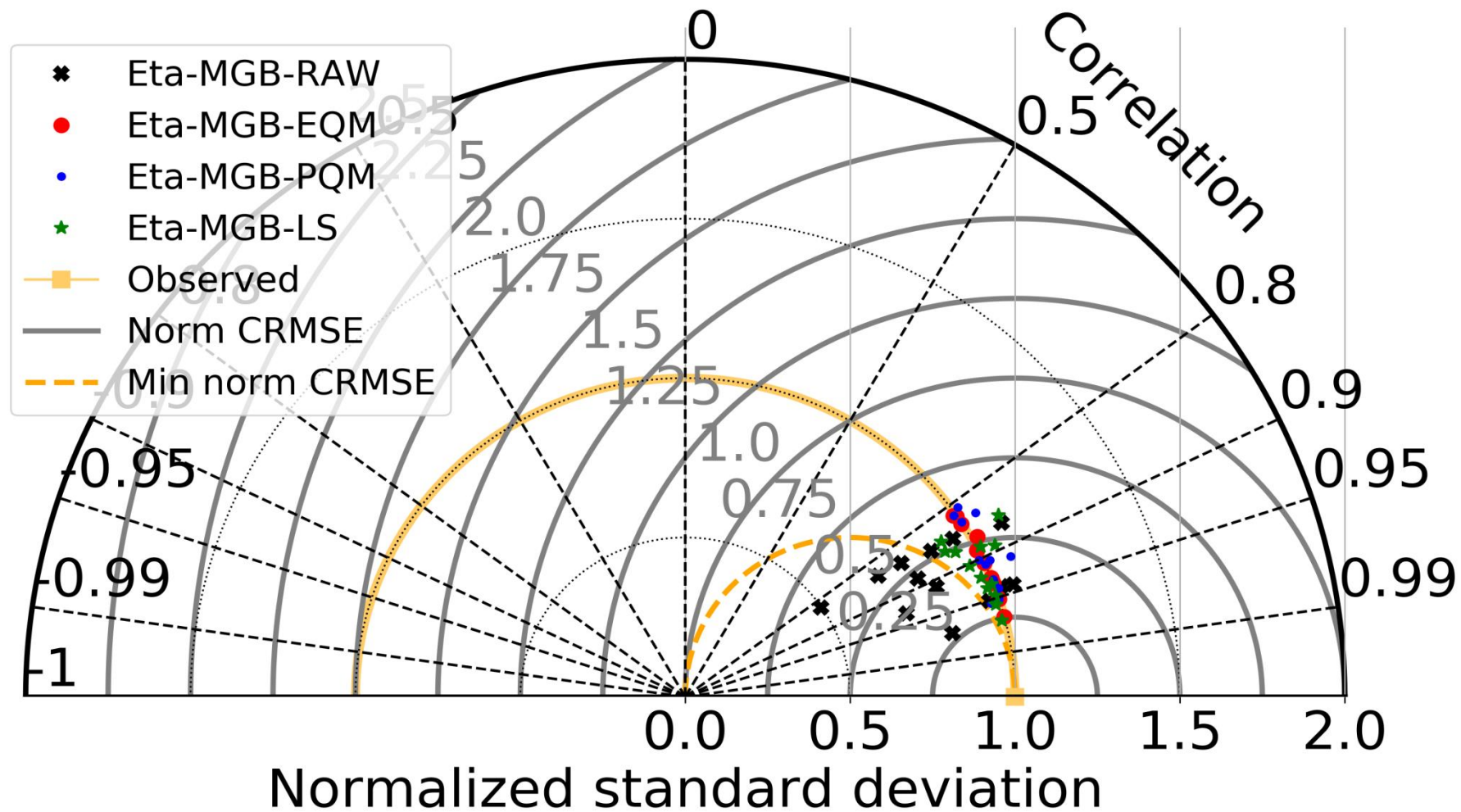
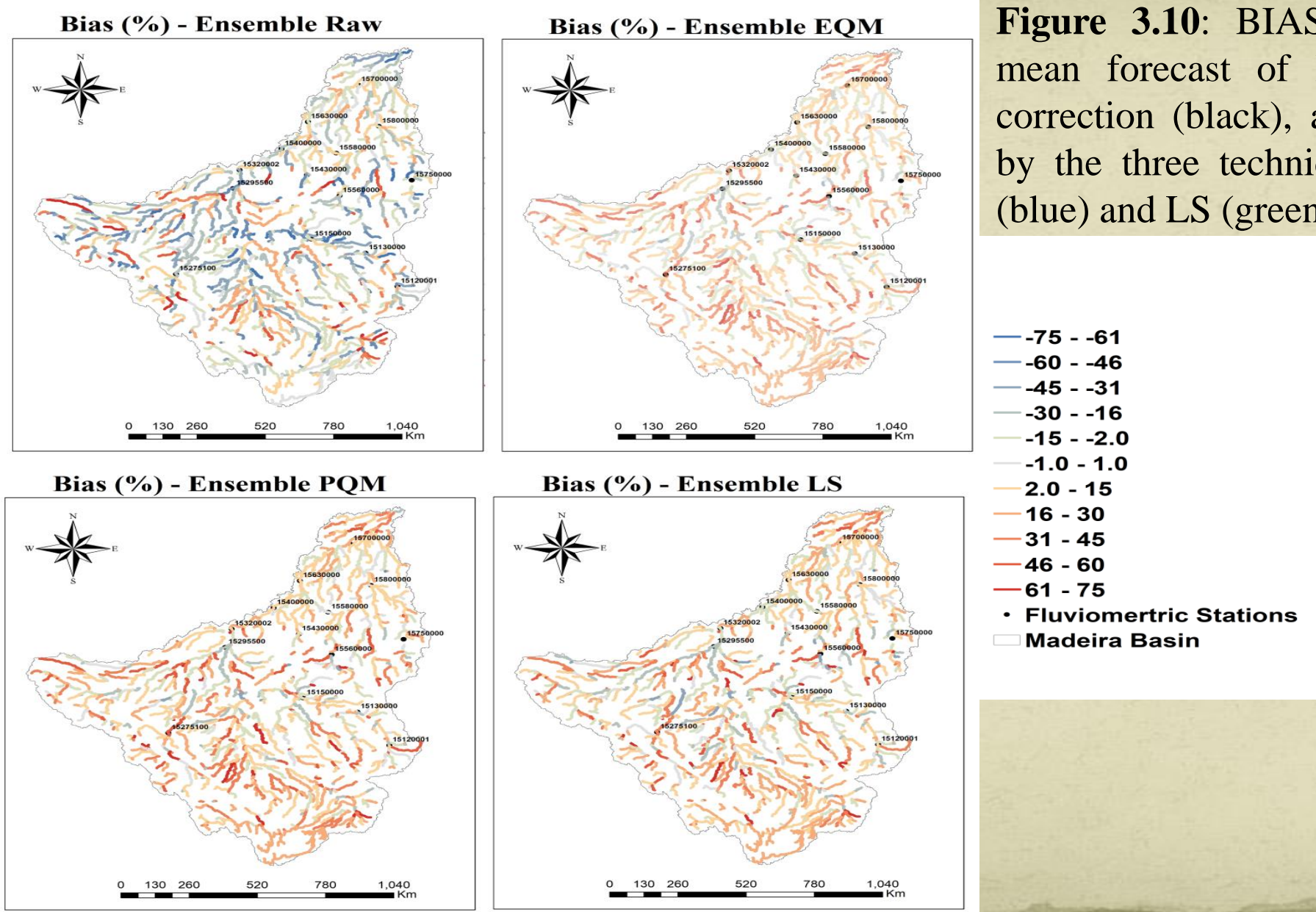


Figure 3.9: Diagrama de Taylor mostrando a correlação, o erro quadrático médio centrado (CRMSE) e a razão de desvio padrão entre a vazão simulada e observada em 14 estações de medição em toda a bacia do rio Madeira.

3. RESULTADOS - Vazão

Figure 3.10: BIAS (%) of the ensemble mean forecast of RCM-Eta, without bias correction (black), and after bias correction by the three techniques, EQM (red), PQM (blue) and LS (green).



3. RESULTADOS - Vazão

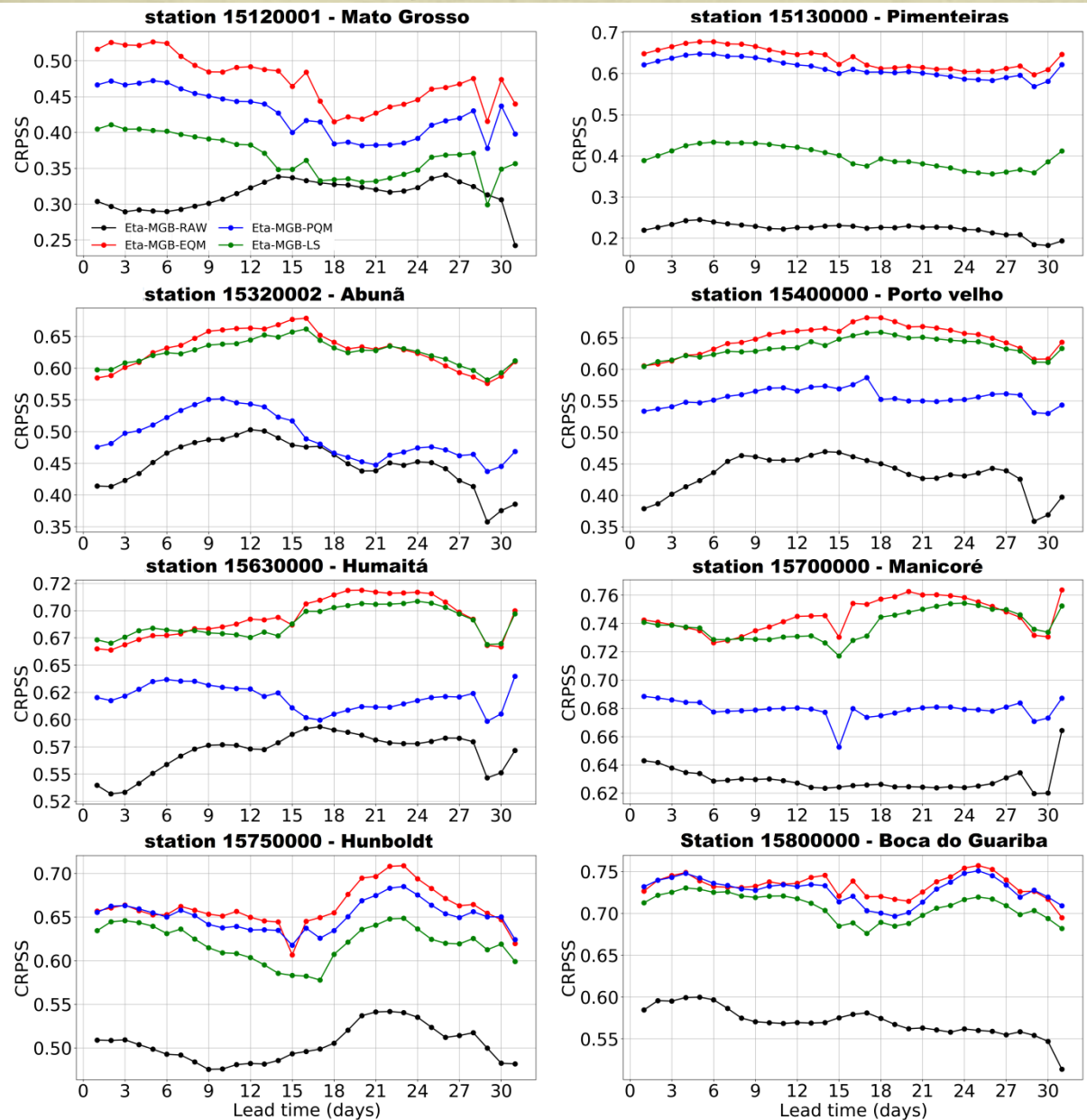
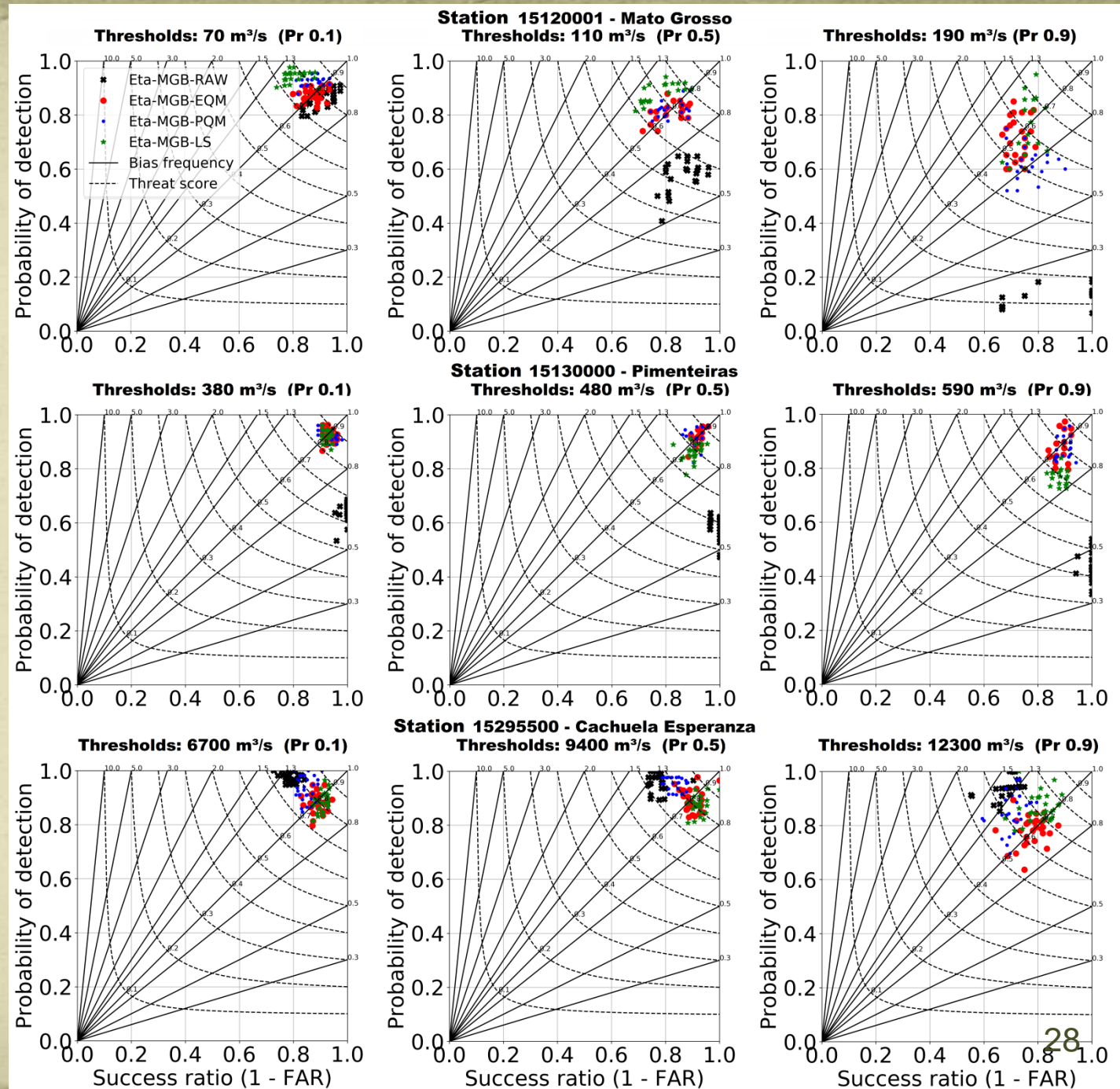


Figure 3.11: CRPSS ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) of the ensemble mean forecast of RCM-Eta, without bias correction (black), and after bias correction by the three techniques, EQM (red), PQM (blue) and LS (green).

Alto Madeira

Figure 3.12: Performance diagram summarizing the SR, POD, BIAS, and CSI for the ensemble mean forecast from RCM-Eta without bias correction and after bias correction by the three methods, EQM, PQM and LS. The X axis shows the success ratio (SR), i.e., one minus the false alarm ratio (1-FAR). The Y axis is the probability of detection (POD). The solid lines indicate the frequency bias (FBIAS), while dashed curves show the Critical Success Index (CSI).



Alto Madeira

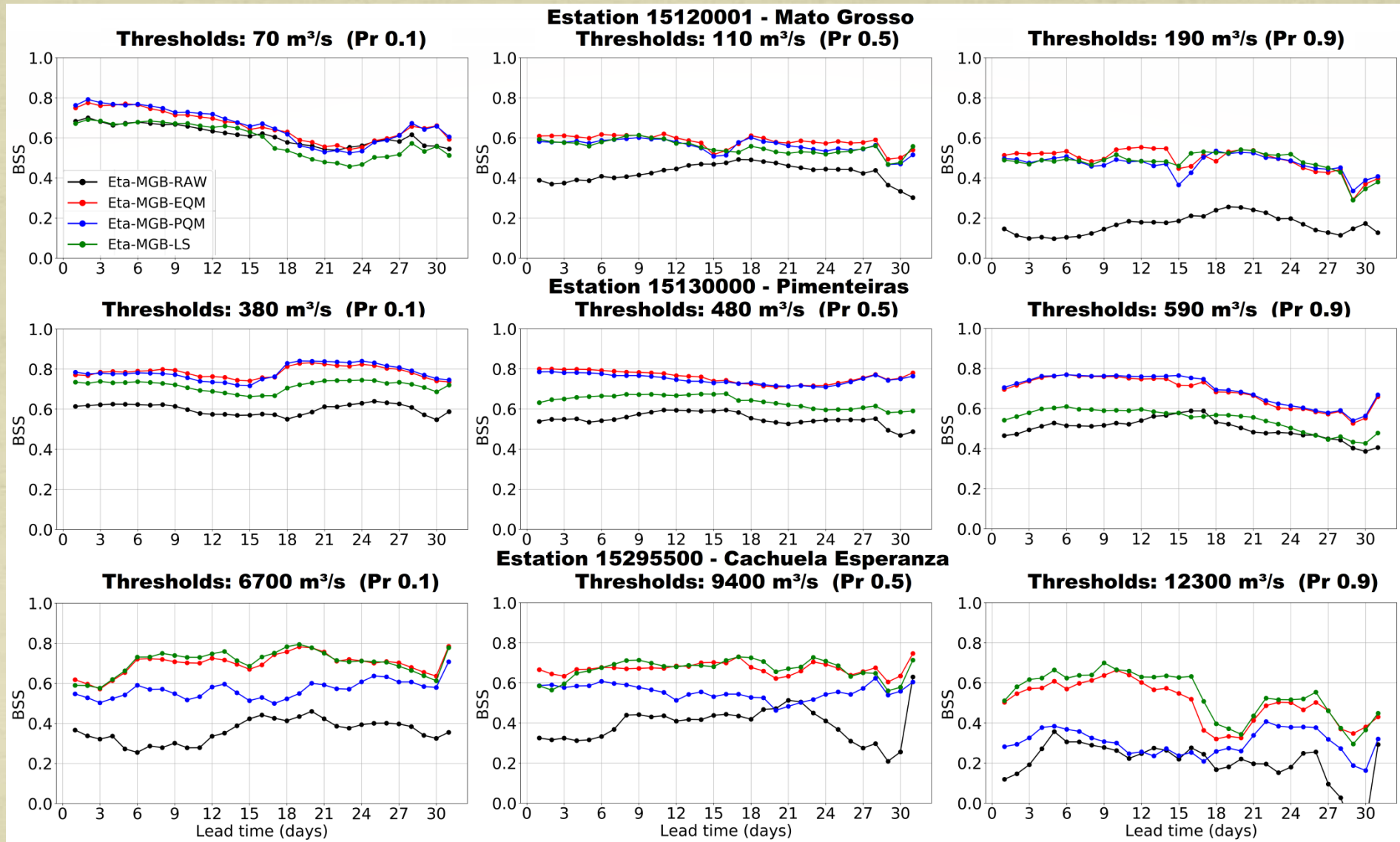


Figure 3.13: BSS for the ensemble mean forecast from RCM-Eta without bias correction and after bias correction by the three methods, EQM, PQM and LS.

4. Conclusões

- Em geral, o *Downscaling Dinâmico* com o modelo regional, juntamente com a correção do viés, trouxe melhorias nas previsões da distribuição espacial da precipitação, o que mostra que as características orográficas e superficiais locais influenciam a precipitação e a evaporação. No entanto, em encostas íngremes dos Andes persistiram alguns vieses significativos mesmo após as correções.
- Os resultados revelaram que os modelos hidrológicos forçados por correção de viés do RCM-Eta com EQM capturaram bem os picos de vazões máximas e mínimos em relação aos dados observados (in situ).
- Em geral, as previsões por ensemble do MCR-Eta após correção do viés para horizonte de previsão intrasazonal melhoraram muito a qualidade das previsões de precipitação e conseqüentemente as previsões de vazão para a bacia do Madeira.
- Em conclusão, os sistemas de previsão hidrometeorológico têm o potencial de melhorar a tomada de decisões para prevenção e preparação contra desastres de inundação e secas. O desempenho do modelo e a qualidade da previsão variam ao longo do horizonte de previsão definido pela respectiva capacidade do sistema de modelagem. No entanto, as previsões utilizáveis ainda têm um tempo de espera adequado para alertar os grupos de impacto sobre inundações iminentes e tomar as medidas apropriadas.



Muito obrigado!



wbg.mcl16@uea.edu.br

