



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## **Padrão Mensal de Anomalias de Precipitação: Uma Análise Estatística de Eventos Hidrológicos Extremos nas Sub-Bacias do Rio São Francisco**

Edvânia Pereira dos Santos<sup>1</sup>, Magaly de Fátima Correia<sup>2</sup>, Maria Regina da Silva Aragão<sup>3</sup>, Lincoln Eloi de Araújo<sup>4</sup>, Fabrício Daniel dos Santos Silva<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doutoranda em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, CTRN/DCA, Campina Grande, Paraíba, Brasil. [edvaniadossantos@gmail.com](mailto:edvaniadossantos@gmail.com); <sup>2</sup> Prof. Doutora Efetiva, Universidade Federal de Campina Grande, CTRN/DCA, Campina Grande, Paraíba, Brasil. [magaly@dca.ufcg.edu.br](mailto:magaly@dca.ufcg.edu.br); <sup>3</sup> Prof. Doutora Efetiva, Universidade Federal de Campina Grande, CTRN/DCA, Campina Grande, Paraíba, Brasil. [regina@dca.ufcg.edu.br](mailto:regina@dca.ufcg.edu.br); <sup>4</sup> Prof. Doutor Efetivo, Universidade Federal da Paraíba, CCAE/DEMA, Rio Tinto, Paraíba, Brasil. [lincolneloi@yahoo.com.br](mailto:lincolneloi@yahoo.com.br); <sup>5</sup> Meteorologista do Instituto Nacional de Meteorologia, CDP/INMET, Brasília, Distrito Federal, Brasil, Coordenador de Desenvolvimento e Pesquisa. [fabricao.silva@inmet.gov.br](mailto:fabricao.silva@inmet.gov.br)

Artigo recebido em 16/07/2013 e aceito em 09/09/2013

### **RESUMO**

Neste trabalho foi investigada a influência da variabilidade climática na ocorrência de enchentes no Médio e Submédio da bacia hidrográfica do São Francisco (BHSF). A cheia registrada em 1985 foi selecionada para análise por representar um evento hidrológico extremo com características ambientais pouco documentadas. A utilização do índice RAI ("Rainfall Anomaly Index") na escala mensal como método de análise permitiu detectar a intensidade, duração e extensão das áreas atingidas pelo fenômeno. Uma análise estatística complementar através de Análise Fatorial por Componentes Principais (ACP), aplicada ao conjunto de valores mensais do RAI, permitiu identificar vínculos entre configurações espaciais de anomalias de precipitação na BHSF e padrões atmosféricos que influenciaram a intensidade e distribuição das chuvas. Os resultados mostraram que a atuação conjunta de sistemas meteorológicos transientes de diferentes escalas é responsável pela organização da convecção, precipitação intensa e formação de cheias com inundações no Submédio da BHSF.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, enchentes, índice RAI, análise fatorial por componentes principais.

## **Standard Monthly Precipitation Anomalies: A Statistical Analysis of Extreme Hydrological Events in Sub-Basins from San Francisco**

### **ABSTRACT**

In this work the influence of the climatic variability upon the occurrence of floods in the São Francisco River Basin (SFRB) is investigated. The major flood of 1985 was selected for analysis since it represents an extreme hydrological event whose environmental characteristics are poorly documented. The Rainfall Anomaly Index (RAI) obtained on a monthly scale allowed detection of the intensity, duration and extent of the areas affected by the phenomenon. A complementary statistical analysis by means of the factorial analysis by principal components (PCA) applied to the monthly RAI values allowed to identify links between spatial configurations of the rainfall anomalies in the SFRB and atmospheric patterns that influenced rainfall intensity and distribution. The results showed that the joint action of transient meteorological systems of various scales is responsible for convection organization, heavy precipitation and formation of floods with inundations in the Lower Basin of the SFRB.

Key-Words: Hydrographic Basin of the São Francisco River, inundations, RAI index, factorial analysis by principal components.

\* E-mail para correspondência:  
[edvaniadossantos@gmail.com](mailto:edvaniadossantos@gmail.com) (Santos, E. P.).

## **Introdução**

Em regiões povoadas o grau de severidade dos eventos hidrológicos extremos tem forte relação com atividades antrópicas, como o desmatamento e crescimento urbano que afetam o escoamento superficial, e favorece a formação de cheias e alagamentos (Gonçalves *et al.*, 2006).

Neste contexto, o conhecimento da frequência e durabilidade de chuvas intensas, é importante no dimensionamento de estruturas de drenagem contra a erosão do solo e em obras hidráulicas que contribuam para minimizar prejuízos severos (Silva & Clarke, 2004). Além disso, medidas preventivas tornam-se imprescindíveis quando consideradas de bacias hidrográficas de grande extensão, a exemplo da bacia hidrográfica do São Francisco (BHSF) que abastece populações ribeirinha se explora intensamente o potencial hídrico na geração de energia elétrica e irrigação de áreas agrícolas.

No Vale do São Francisco encontra-se um dos maiores polos de produção e exportação de frutas no país vulnerável a ocorrência de inundações associadas com a atuação de sistemas meteorológicos intensos. Estes sistemas podem ocasionar o desenvolvimento de cheias e inundações e a prejuízos as atividades econômicas da região. (DINIZ *et al.* 2011)

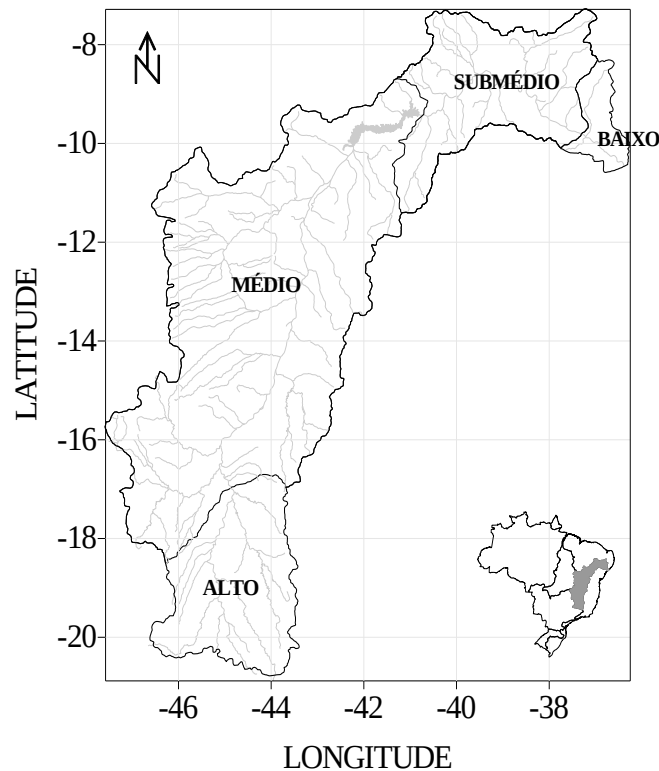
Neste trabalho as análises são concentradas em eventos extremos de chuva, e ocorrência de cheias em parte do Médio e

Submédio da BHSF no ano de 1985. O índice Rainfall Anomaly Index (RAI) em conjunto com a técnica estatística da Análise Fatorial por Componentes Principais (ACP) foram utilizados para identificar vínculos entre configurações espaciais de anomalias de precipitação na BHSF e padrões atmosféricos que influenciaram a intensidade e distribuição das chuvas.

## **Região de Estudo – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**

A BHSF possui uma área de 639.000 km<sup>2</sup> e seu curso principal tem uma extensão de 2.700 km. Essa área corresponde a aproximadamente 8% do território nacional. Ela está compreendida entre as latitudes de 7°00'S e 21°00'S, e as longitudes de 35°00'W e 47°40'W, inserida nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004). A BHSF abrange parte de seis estados e do Distrito Federal, sendo dividida nas seguintes sub-bacias: Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco (Figura 1).

O Alto e parte do Médio da BHSF estão na região Sudeste do Brasil (SEB), no estado de Minas Gerais (MG), onde se localiza a sua nascente na Serra da Canastra. Todas as demais subdivisões da BHSF estão no Nordeste do Brasil (NEB). Em virtude dessa grande abrangência territorial, as características sazonais da BHSF são bastante variáveis, com regime pluviométrico influenciado por vários sistemas atmosféricos.



**Figura 1.** Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) evidenciando a localização e divisão das sub-bacias ALTO, MÉDIO, SUBMÉDIO e BAIXO SÃO FRANCISCO. A localização da BHSF no território brasileiro é vista em destaque (cinza) no canto inferior direito.

A intensidade e a distribuição espacial da precipitação na região semiárida da BHSF são influenciadas por, pelo menos, dois sistemas meteorológicos importantes: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que atua no período de fevereiro a maio, e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) que ocorrem na primavera, verão e outono, no período de outubro a abril, com máxima frequência nos meses de janeiro (Mello *et al.*, 1996).

Os VCAN's atuam entre os meses de novembro e abril. Eles são conhecidos como sistemas produtores de chuva, principalmente no interior do NEB, porém estudos recentes mostram que os VCAN's também podem inibir o desenvolvimento de nuvens profundas

e precipitação na área influenciada pela circulação do seu centro, local de ocorrência de movimentos subsidentes (Silva, 2007). Nela normalmente há movimentos descendentes e, conseqüentemente, inibição do desenvolvimento vertical das nuvens. Ramirez (1996) observou que em anos de El Niño os vórtices apresentam maior extensão vertical do que em anos de La Niña.

Os Distúrbios de Leste (DL), que atuam entre o Rio Grande do Norte e o norte da Bahia, no período de maio a agosto (Araújo, 2006), são responsáveis pela precipitação na área do Baixo São Francisco. Santos *et al.* (2010) observaram através da Análise de Componentes Principais que existe uma forte correlação entre a chuva e a atuação

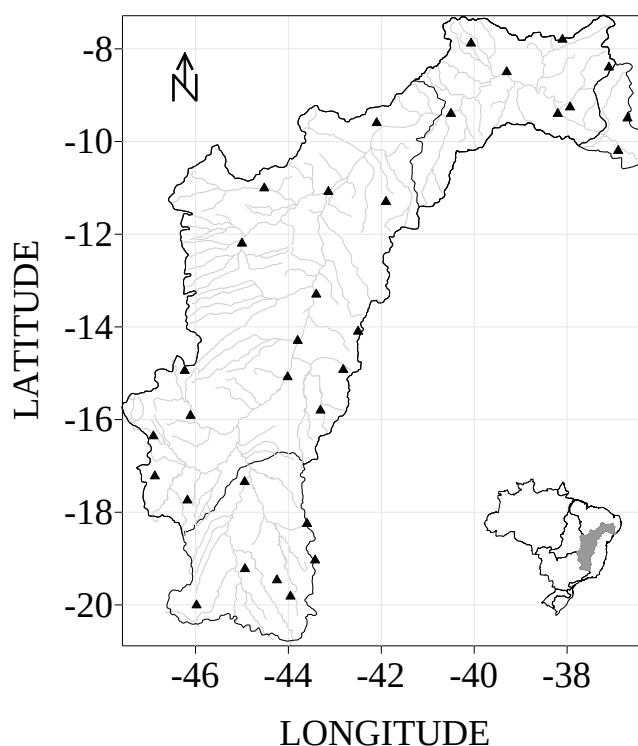
dos DL's no Baixo São Francisco (BSF) nos meses de fevereiro, março e abril.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atua de novembro a fevereiro. É um sistema produtor de chuvas muito importante na região do Alto São Francisco por garantir o abastecimento ao longo do rio. Da Silva *et al.* (2001), ao estudar a influência da ZCAS na distribuição espaço-temporal das precipitações na BHSF, verificaram que ela é o principal mecanismo dinâmico produtor de precipitações (ZCAS) de novembro a março nas sub-bacias do Alto São Francisco (ASF) e Médio São Francisco (MSF).

## Material e Métodos

### Dados

Na obtenção dos valores do RAI (Rainfall Anomaly Index) apresentados neste trabalho foram usados totais mensais de precipitação, do período de 1961 a 2008, de 32 estações pluviométricas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na área da BHSF. A localização das estações é ilustrada na Figura 2.



**Figura 2.** Localização geográfica das estações pluviométricas (triângulos) utilizadas. O mapa no canto inferior direito ilustra as principais bacias hidrográficas em território brasileiro, com destaque para a BHSF (cinza).

## Metodologia

### Utilização do Rainfall Anomaly Index (RAI)

A aplicação de técnicas simples de estatística com base no cálculo de anomalias de precipitação permite analisar o grau de variabilidade da chuva na região de estudo. A avaliação da intensidade e duração dos períodos secos e úmidos foi realizada com base no Índice de Anomalia de Precipitação RAI desenvolvido por Rooy (1965). Os valores do RAI foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$RAI = 3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{M} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias positivas}$$

$$(N > \bar{N}); \quad (1)$$

$$RAI = -3 \left[ \frac{(N - \bar{N})}{(\bar{X} - \bar{N})} \right], \text{ para anomalias}$$

$$\text{negativas } (N < \bar{N}), \quad (2)$$

Em que:

$N$  = precipitação total medida (anual, mensal, semanal, diária);

$\bar{N}$  = precipitação total média da série histórica (anual, mensal, semanal, diária);

$\bar{M}$  = média dos **dez maiores** totais de precipitação da série histórica;

$\bar{X}$  = média dos **dez menores** totais de precipitação da série histórica.

### Análise Estatística – O Método de Componentes Principais

Nas análises de padrões atmosféricos que utilizam dados ambientais é comum a existência de variáveis redundantes. Há casos em que as séries de dados utilizadas são longas. Nesse contexto, a Análise Fatorial (AF) permite detectar a existência de redundância, de maneira que possibilita o reagrupamento das variáveis em um conjunto menor de dimensões ou fatores.

A utilização da AF neste trabalho foi realizada através do método de extração de fatores com base na Análise de Componentes Principais (ACP). A técnica transforma um grupo de  $n$  elementos em um conjunto menor de variáveis não correlacionadas ordenadas de acordo com o grau de importância. Essas variáveis explicam uma parcela substancial das informações contidas no conjunto original. As novas variáveis  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  são denominadas componentes principais, que são funções lineares.

O procedimento utilizado na aplicação da ACP inicia-se a partir de um conjunto de  $n$  indivíduos e  $p$  variáveis originais correlacionadas, na forma de uma matriz  $X$ .

Obtêm-se a matriz das variâncias ( $S$ ) através da equação (3):

$$S = \frac{1}{n} X \cdot X^t \quad (3)$$

Em que:

$$X = x - \bar{x} \quad (4)$$

$X^t$  é a transposta de  $X$ .

Fazendo  $R = S$ , com  $R$  simétrica e positiva de dimensão  $(p \times p)$ , e sendo  $R$

diagonalizável por uma matriz ortogonal  $A$ , de mudança de base, denominada de autovetores. Então, a matriz diagonal ( $D$ ) é obtida através da equação (5):

$$D = A^{-1} \cdot R \cdot A \quad (5)$$

Em que:

$$A = |R - \lambda I| = 0 \quad (6)$$

A partir dessas equações, encontram-se os autovetores associados aos autovalores de  $A$ . Sendo  $A$  uma matriz ortogonal, tem-se:

$$A^{-1} = A^t \quad (7)$$

As componentes principais são obtidas a partir das combinações lineares entre a transposta dos autovetores normalizados ( $A^t$ ) e a matriz de observações ( $X$ ), como descrito na equação (8).

$$C = A^t \cdot X \quad (8)$$

As variâncias ( $Z_i$ ), positivas ou nulas, e as constantes  $a_{ij}$ , que definem a combinação linear das Componentes Principais (CP) são os elementos dos correspondentes autovetores escalonados (Equação 9).

$$a_{i1}^2 + a_{i2}^2 + \dots + a_{ip}^2 = 1 \quad (9)$$

A primeira CP é dada através da equação (10):

$$Z_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p \quad (10)$$

Sob a condição:

$$a_{11}^2 + a_{12}^2 + \dots + a_{1p}^2 = 1 \quad (11)$$

E considerando  $\text{Var}(Z_1)$  como a máxima variância possível dada a restrição em  $a_{1j}$ . A segunda CP é dada através da equação (12):

$$Z_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p \quad (12)$$

Sob a condição:

$$a_{21}^2 + a_{22}^2 + \dots + a_{2p}^2 = 1 \quad (13)$$

Com a máxima  $\text{Var}(Z_2)$ , sob a condição que a correlação entre  $Z_1$  e  $Z_2$  seja nula, e a correlação nula entre todas as componentes observadas. O número de  $p$  variáveis terá o mesmo número de componentes principais. Para que essas componentes possam ser traduzidas da melhor forma, é necessário buscar soluções que expliquem com o mesmo grau de variância total gerando resultados melhores em relação à interpretação.

No desenvolvimento deste trabalho foi escolhido para análise um evento considerado de grande importância sob o ponto de vista hidrológico e meteorológico na BHSF. Tendo em vista a importância da influência do ENOS na variabilidade do regime hidrológico da BHSF foi selecionado para análise o episódio de 1984/1985, sob a influência do La Niña. Alguns episódios de chuvas intensas associadas com a organização, desenvolvimento ou intensificação de sistemas convectivos de mesoescala foram analisados e documentados na literatura (Silva *et al.*, 2008; Silva Aragão *et al.*, 2007; Barbosa & Correia, 2005; Diniz *et al.*, 2011).

O evento de La Niña de 1984/1985, apesar de classificado na literatura como de intensidade fraca, foi escolhido em função da ocorrência de enchentes e inundações no Submédio da Bacia Hidrográfica, devido à forte atividade convectiva organizada pela atuação de sistemas atmosféricos como VCAN, ZCIT e Sistemas Frontais que atingiram a região em meses

climatologicamente secos. Assim, a técnica de Análise Fatorial por Componentes Principais foi usada para analisar os padrões temporais e espaciais de cheias ocorridas no ano de 1985. A ACP foi aplicada a conjuntos de dados constituídos por valores mensais do RAI, utilizando o programa computacional SPSS (Statistical Package for the Social Sciences). Os autovalores encontrados na ACP foram submetidos à rotação VARIMAX com o objetivo de melhorar a interpretação física dos fatores responsáveis pelos padrões analisados.

## Resultados e Discussão

### RAI como Método de Análise

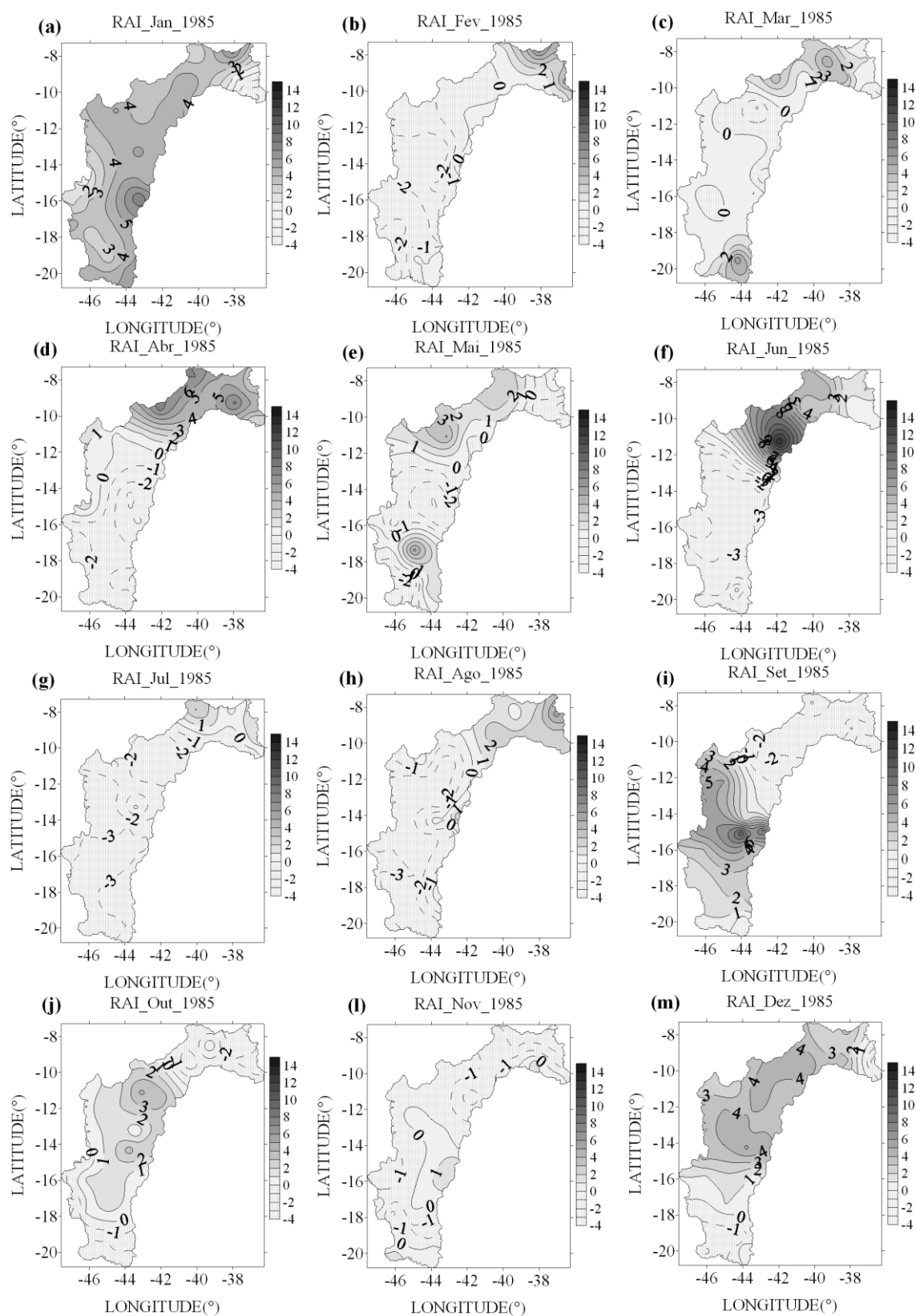
O ano de 1985 foi marcado pela atuação do fenômeno La Niña de intensidade fraca. Normalmente, sob o impacto desse fenômeno as chuvas registradas no Alto São Francisco são abaixo da média climatológica. No NEB, o efeito esperado em anos de La Niña é o oposto, ou seja, chuvas acima da média.

Na configuração espacial do RAI correspondente ao ano de 1985 (Figura 3), anomalias negativas são evidentes no ASF e MSF nos meses de fevereiro e abril, indicando que as chuvas foram abaixo da normal climatológica em várias localidades da região. Esse comportamento em anos de LN provoca diminuição na vazão dos afluentes no ASF e MSF, e pode afetar de forma significativa os recursos hídricos em toda a extensão da BHSF. No entanto, apesar desse

resultado o impacto não foi tão evidente no entorno do reservatório de Sobradinho (Médio e Submédio da BHSF). Houve um aumento significativo no volume de chuva nessa área da bacia hidrográfica, ocasionando cheias e inundações no período de 11 a 17 de abril de 1985, entre as hidrelétricas de Sobradinho e Paulo Afonso (Santos *et al.*, 2010).

Segundo dados da CHESF, o fenômeno foi causado pela intensificação de sistemas precipitantes que são comumente observados nesse período do ano. O principal sistema de circulação atmosférica gerador de chuvas na região nos meses de março e abril é a ZCIT (Zona de Convergência Intertropical). Xavier *et al.* (2003), estudando a variabilidade das chuvas no Ceará e a influência da ZCIT, afirmam que a variabilidade da precipitação no NEB está sujeita à forte influência do ENOS e à posição da ZCIT. Nos de LN, a ZCIT tende a ficar posicionada mais ao Sul no Hemisfério Sul.

A distribuição espacial do RAI para os quatro primeiros meses de 1985 (Figura 3a-d) mostra anomalias positivas em toda a área do Submédio da bacia hidrográfica e parte do MSF (inserida na região semiárida). No mês de abril, os valores do RAI no SSF atingem valores maiores do que 6 (seis), indicando que o período foi extremamente úmido. Valores positivos do RAI nos meses de janeiro e abril indicam ocorrência de chuvas intensas e estão coerentes com resultados de estudos



**Figura 3:** Distribuição espacial do RAI na BHSF para os doze meses do ano de 1985.



anteriores que mostram, através de imagens de radar meteorológico, a formação e evolução de sistemas convectivos profundos sob a influência de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e da ZCIT (Correia, 1989; Araújo, 1996; Silva Aragão *et al.*, 2000; Correia, 2001; Barbosa & Correia, 2005; Silva Aragão *et al.*, 2007; Diniz *et al.*, 2011).

Nos meses de maio a agosto há valores positivos do índice RAI na região semiárida. Valores extremos ( $RAI > 14$ ) podem ser observados no mês de junho cuja normal climatológica é de aproximadamente 10 mm. Esse resultado não indica necessariamente chuvas muito acima da normal. Nas áreas com alta frequência de valores de precipitação igual a zero (precipitação mínima) há uma tendência para superestimar o RAI. Por outro lado, segundo Barbosa & Correia (2005), entre os dias 04 e 10 de junho de 1985, sistemas frontais provocaram aumento de nebulosidade e precipitação na região. No dia 05 de junho foi registrado um total de 10,3 mm na estação meteorológica de Petrolina, cuja média climatológica é de 10 mm. Esse fato corrobora os valores elevados do RAI obtidos na região em questão.

O evento de La Niña 84/85 prolongou-se até o mês de outubro de 1985, de acordo com os índices de TSM do NCEP. Os valores do RAI mostram-se negativos no ASF e MSF nos meses de abril a agosto, alcançando valores menores que -3 em várias localidades (Figura 3d-h).

Os meses de setembro, outubro e dezembro apresentam valores positivos do RAI acima de 5 no MSF. Anomalias negativas ( $RAI < 0$ ) indicam chuvas abaixo da média climatológica no Submédio nos meses de setembro e outubro. O mês de novembro apresenta chuvas abaixo da média ( $RAI < 0$ ) em praticamente toda a BHSF.

### **Análise Fatorial para a cheia de 1985**

Conforme descrito na metodologia, o conjunto de elementos formado pelos valores mensais do RAI calculados a partir dos dados das 32 localidades distribuídas na bacia hidrográfica foi analisado estatisticamente através da aplicação da ACP, no modo S. O propósito fundamental foi detectar possíveis vínculos entre padrões espaciais de anomalias de precipitação e a predominância de mecanismos atmosféricos que influenciam a intensidade e distribuição das chuvas visando explicar parte da relação entre precipitação acima da média na BHSF. A relação entre padrões atmosféricos específicos e anomalias negativas também foi avaliada.

Os valores do teste de KAISER (GARAYALDE *et al.*, 1986) foi obtido com o objetivo de comprovar a adequação do conjunto de dados à aplicação da técnica da análise fatorial. Para o ano de 1985 o valor do KMO foi de 0,673. Valores do KMO acima de 0,5 significam que os dados são adequados para utilização da técnica.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da AF por ACP para o evento de

1985. Observa-se que os quatro primeiros componentes explicam aproximadamente 73% da variância total dos dados.

**Tabela 1:** Autovalores e porcentagem da variância Explicada e Acumulada para os quatro fatores retidos da ACP para o ano de 1985.

| CP | Cargas Não Rotacionadas |                |                     | Cargas Rotacionadas |                |                     |
|----|-------------------------|----------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|
|    | Autovalores             | % da Variância | Variância Acumulada | Autovalores         | % da Variância | Variância Acumulada |
| 1  | 4,447                   | 37,055         | 37,055              | 3,892               | 32,431         | 32,431              |
| 2  | 2,069                   | 17,244         | 54,298              | 1,832               | 15,27          | 47,701              |
| 3  | 1,243                   | 10,356         | 64,654              | 1,772               | 14,77          | 62,471              |
| 4  | 1,016                   | 8,467          | 73,121              | 1,278               | 10,65          | 73,121              |

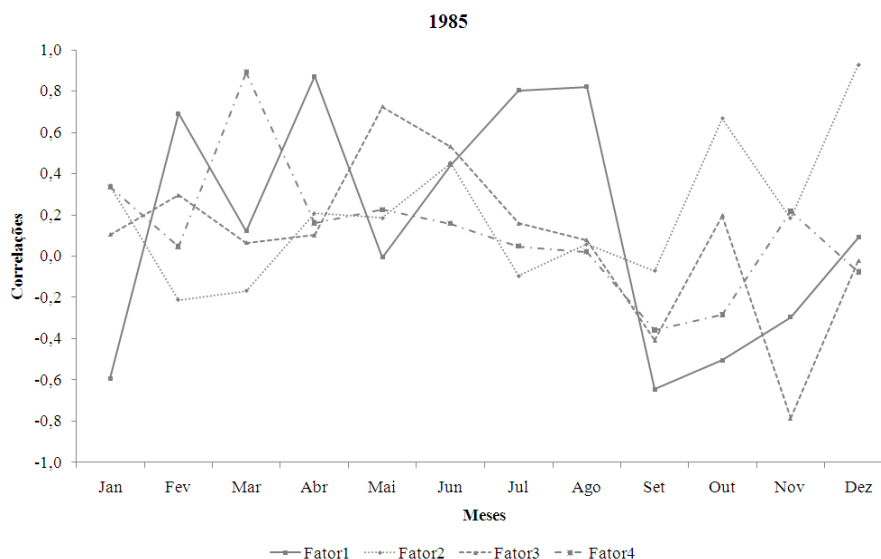
A configuração espacial dos quatro primeiros fatores retidos para o ano de 1985 é apresentada na Figura 5. O primeiro fator (Figura 5a) apresenta contribuição positiva no Submédio e Baixo São Francisco, com valores acima de 1,5 no último. Esse primeiro componente (fator) explica 32,43% da variância total dos dados e é positivamente correlacionado com os meses de fevereiro, abril, julho e agosto (Figura 4). Por outro lado, é negativamente correlacionado com os meses de janeiro e setembro.

Na configuração espacial do RAI verificam-se anomalias positivas de chuva ( $RAI > 0$ ) na região do BSF, indicando chuvas acima da média, nos meses de fevereiro, abril, julho e agosto (Figura 3b, d, g, h). Valores negativos do índice RAI, indicando chuvas abaixo da média, são observados no BSF em janeiro (Figura 3a), e em praticamente todo o Submédio em setembro (Figura 3i).

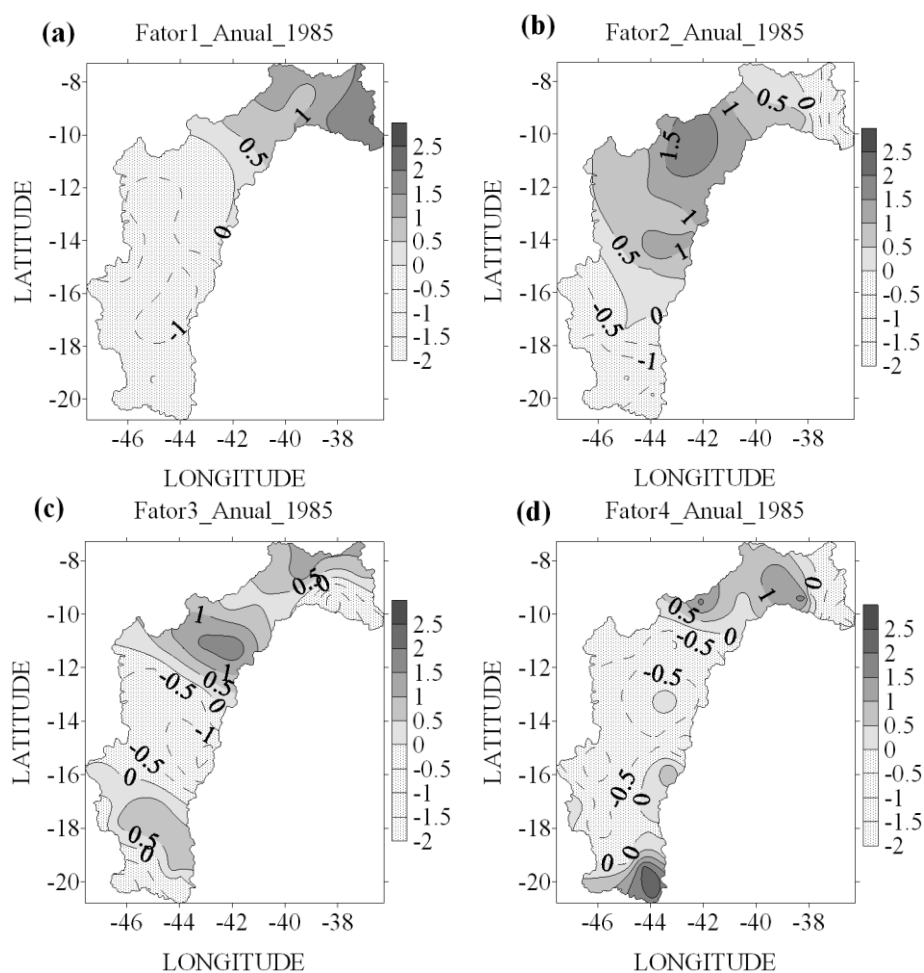
No mês de fevereiro e março a atuação conjunta de VCAN e da ZCIT, situada ao sul da sua posição climatológica, foi responsável

pela organização e intensificação da convecção no Submédio e Baixo São Francisco.

No mês de abril a intensa atividade convectiva, organização da nebulosidade e precipitação foram praticamente determinadas pela atuação da ZCIT que atingiu a latitude de 6°S, aproximadamente, ao sul da posição climatológica. Na distribuição espacial do RAI para abril de 1985 (Figura 3d) é possível observar núcleos com valores acima de 9, indicando chuvas de grande volume e intensidade que ocasionaram cheias e inundações. Esses resultados corroboram com o estudo feito por Diniz *et al.*, (2011), em que aplicaram ACP à variáveis meteorológicas buscando encontrar fatores dominantes nas chuvas intensas e inundações ocorridas no mês de abril, no Submédio do São Francisco, particularmente no período de 9 a 12.



**Figura 4:** Cargas fatoriais rotacionadas para os quatro primeiros fatores do ano de 1985, que correspondem a aproximadamente 73% da variância total explicada.



**Figura 5:** Padrão espacial dos fatores (escores) na BHSF para o ano de 1985.

A configuração espacial do RAI no mês de janeiro mostra precipitação acima da

média climatológica em praticamente toda a extensão da bacia hidrográfica (Figura 3a).

No entanto, anomalias negativas são observadas no BSF. Esse resultado corrobora a carga fatorial negativa encontrada com a aplicação da ACP (Figura 5). O mês de janeiro se caracterizou pela presença do cavado do Nordeste e a atuação de VCAN (Silva Aragão *et al.*, 2007).

Na configuração espacial do segundo fator (Figura 5b) é possível observar contribuições significativas (valores acima de 1,5) na região do Médio e parte do Submédio São Francisco. Esse fator mostra correlações positivas com os meses de outubro e dezembro (Figura 4). A configuração espacial do RAI nos meses de outubro e dezembro (Figuras 3j, m) mostra valores positivos do índice, indicando chuvas acima da média na região do MSF e SSF. Os principais sistemas atmosféricos com chuva associada nesses meses são os Sistemas Frontais e a ZCAS, respectivamente.

A configuração espacial do terceiro fator (Figura 5c) mostra contribuições positivas no semiárido, em parte do Médio e Submédio São Francisco. Esse fator é positivamente correlacionado com o mês de maio e negativamente correlacionado com o mês de novembro (Figura 4). Na distribuição espacial do RAI há anomalias positivas em parte do Médio e Submédio no mês de maio, indicando chuvas acima da média na região (Figura 3e). Por outro lado, no mês de novembro há valores negativos do índice, o que indica chuvas abaixo da média na região (Figura 3l).

O quarto fator retido, que explica em torno de 10% da variância total dos dados originais, mostra contribuição significativa com valores acima de 1,5 no sudeste do Alto e no Submédio São Francisco da BHSF (Figura 5d). Esse fator é positivamente correlacionado com o mês de março. Analisando a configuração espacial do RAI para março (Figura 3c) é possível observar anomalias positivas ( $RAI > 0$ ), indicando chuvas acima da média, exatamente no Submédio e Alto São Francisco. Conforme mencionado anteriormente, no mês de março a atuação conjunta de VCAN e da ZCIT situada ao sul da sua posição climatológica foi responsável pela organização e intensificação da convecção no Submédio da bacia hidrográfica (Silva *et al.*, 2008).

## Conclusões

### Utilização do Índice RAI

Os resultados com a aplicação do RAI para o evento de 1985 se mostraram eficientes, evidenciando a duração, a intensidade e a definição da área atingida pelo fenômeno. Também foi possível observar que os valores mínimos do RAI (anomalias negativas) são observados principalmente na região semiárida da BHSF, indicando localidades sujeitas a estiagens mais severas e áreas vulneráveis a eventos meteorológicos extremos. Esse fator mostra que em situações de chuvas intensas a probabilidade de

formação de cheias e inundações é bem maior.

A forte pressão antrópica em torno das represas na zona semiárida da BHSF em consequência da disponibilidade de água é uma das causas mais prováveis do aumento na vulnerabilidade aos eventos extremos de chuva. A obtenção do RAI com cálculos simples representa uma ferramenta de grande utilidade no auxílio do monitoramento e gerenciamento de danos associados com ocorrência de inundações ou estiagens severas.

### **Análise de Componentes Principais Aplicada ao RAI**

A ACP aplicada ao RAI permitiu detectar vínculos entre configurações espaciais de anomalias de precipitação na BHSF e padrões atmosféricos que influenciam a intensidade e distribuição das chuvas, sendo eficiente na identificação de mecanismos dinâmicos que explicam diferentes regimes pluviométricos observados na Bacia Hidrográfica do São Francisco.

A atuação conjunta de sistemas atmosféricos transientes de diferentes escalas é responsável pela organização da convecção, precipitação intensa e formação de cheias e inundações no Submédio da bacia hidrográfica.

### **Referências**

ANA/GEF/PNUMA/OEA. 2004 Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, Sub-projeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013). Controle de cheias. Estudo Técnico de Apoio nº 10. Brasília: SUM/ANA,. 58p.

Araújo, H. A. 1996. Padrões de ecos de radar meteorológico no semi-árido brasileiro e condições atmosféricas associadas. 1996. 130f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB (UFPB CMM TD Nº 4).

Araújo, L. E. 2006. Análise Estatística de Chuvas Intensas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

Barbosa, T. F.; Correia, M. F.; 2005. Sistemas Convectivos Intensos no Semi-Árido Brasileiro: O Controle da Grande Escala. Revista Brasileira de Meteorologia, São Paulo, v.20, p. 395-410, n.3, Dez.

Correia, M. F. 1989. Diagnóstico via radar dos sistemas precipitantes do semi-árido brasileiro:O evento de 1985. 1989. f

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Correia, M. F. 2001. Impacto das Ações Antrópicas no Clima do Submédio do Rio São Francisco: Um Estudo Numérico e Observacional. 2001. 178f Tese de doutorado em Meteorologia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Da Silva, D.F.; Molion, L.C.B.; Lemes, M.A.M., 2001. Variabilidade espacial das chuvas na Bacia do Rio São Francisco, In: Encontro Nordestino De Biogeografia, 2., 2001, Maceió. Anais..., Maceió-AL. out.

Diniz, M. C. S., Correia, M. F., Melo, E. C. S.;Farias, W. R. G.; Aragão, M. R. S., 2011. Episódios de Cheias na Região Semiárida da Bacia do rio São Francisco em abril de 1985: Um Estudo das Escalas Dominantes e Condições Atmosféricas Associadas. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 8, p. 277-298, n. 1, jan. /mar.

Gonçalves, W.A.; Correia, M.F.; Araújo, L.E.; Silva, D.F. Da; Araújo, H.A. 2006. Vulnerabilidade Climática do Nordeste Brasileiro: Uma análise de eventos extremos na Zona Semiárida da bacia hidrográfica do São Francisco. In: Congresso Brasileiro De Meteorologia. 14., 2006, Florianópolis. Anais..., Florianópolis, p. 1-6.

Garayalde, E. J. G.; Silva, M. G. A. Da; Tavares, Sá. A. De. 1996. Classificação meso-

climática da região sul do Brasil pela análise de componentes principais. In: Congresso Interamericano de Meteorologia, 1., Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília.

Mello, N. G. S.; Sakamoto, M. S., Torsani, J. A. 1996. Um Estudo de Caso de Um Sistema Convectivo de Mesoescala Observado no Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro De Meteorologia, 9., 1996, Campos do Jordão. Anais... Campos do Jordão,. p. 940-944.

Ramirez, M. C. V. 1996. Padrões Climáticos e os Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis no Nordeste do Brasil. 1996. 132f. Dissertação de mestrado em meteorologia, INPE São José dos Campos – SP.

Rooy, V.M.P., 1965. A Rainfall Anomaly Index Independent of Time and Space, Notos, 14, 43.

Santos, S. A.; Correia, M. F.; Braga, C. C.; Aragão, M. R. S. 2010. Análise Estatística de Chuvas Intensas e Inundações no Semiárido da Bacia do Rio São Francisco: A Cheia de 1985. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 7, p. 278-290, n. 3.

Silva Aragão, M. R. ; Correia, M. F. ; Araújo, H.A.. 2000. Characteristics of C-band meteorological radar echoes at Petrolina, Northeast Brazil. International Journal of

Climatology, Inglaterra, v. 20, p. 279-298, n. 3.

Silva Aragão, M. R.; Damião Mendes, M. C.; Cavalcanti, I. F. A.; Correia, M. F. . 2007. Observational study of a rainy January day in the Northeast Brazil semi-arid region: synoptic and mesoscale characteristics. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Inglaterra. v. 133, p. 1127-1141.

Silva, B. C.; Clarke, R. T., 2004. Análise Estatística de Chuvas Intensas da Bacia do Rio São Francisco. Revista Brasileira de Meteorologia, v.19, p. 265-272, n.3.

Silva. F. D. S.; Correia. M. F.; Silva Aragão. M. R.; Silva. J. M. 2008. Convecção linearmente organizada na área de Petrolina,

semi-árido do Nordeste do Brasil: aspectos em meso e grande escala. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 23, p. 292- 304, n. 3.

Silva, L. A., 2007. A Influência do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) Sobre a Precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as Características Associadas. 134f Dissertação de mestrado em Meteorologia. INPE – São José dos Campos – SP, 2007.

Xavier, T. M. B.; Xavier, A. F. S.; Silva Dias, M. A. F.; Dias, P. L. S., 2003. Interrelações entre ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico e a Chuvas nas Bacias Hidrográficas do Ceará. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v. 8, p. 111-126.