

MODELAGEM ESTOCÁSTICA E ANÁLISE TEMPORAL DA DURAÇÃO E DOS DIAS DE INÍCIO E FIM DA ESTAÇÃO CHUVOSA NO NORDESTE

Carlos Henrique Ribeiro Lima¹ & Upmanu Lall²

RESUMO --- A modelagem e capacidade de prever o início e fim da estação chuvosa é extremamente importante em regiões com forte presença de agricultura não-irrigada, como o Nordeste. Sabendo antecipadamente o período mais provável de chuva, é possível minimizar perdas e melhor gerir os recursos hídricos. Propõe-se aqui uma nova metodologia para determinar os dias de início e fim do período chuvoso. O modelo estocástico é desenvolvido a partir de regressão logística e séries de Fourier para determinar a probabilidade e a sazonalidade da chuva diária para cada ano da série histórica. Os resultados obtidos com 504 estações pluviométricas nordestinas indicam três regiões com diferentes padrões sazonais: sudoeste, norte e ao longo da costa. A quadra chuvosa identificada para essas regiões é coerente com a literatura e compreende os períodos: NOV-MAR, FEV-MAI e MAR-AGO. Uma análise da variabilidade interanual desses períodos mostrou uma tendência de antecipação do dia de início e um aumento na duração da quadra chuvosa nessas três regiões, provavelmente resultante do aumento da temperatura do mar no Atlântico tropical sul. Finalmente, a modelagem proposta serve como base para o desenvolvimento de um modelo operacional de previsão dos dias de início, pico e fim da quadra chuvosa no Nordeste.

ABSTRACT --- The modeling and ability to predict the onset and end of the rainy season is extremely important in regions of rain-fed agriculture, such as Northeast Brazil. Knowing in advance the most likely period of rainfall, one can minimize losses and better manage the water resources. Here we propose a new methodology to determine the rainy season onset and end. The stochastic model is developed using logistic regression and Fourier series in order to address the probability and seasonality of the daily rainfall for each year of the historical record. The results obtained using 504 rainfall gauges in Northeast show three regions with different seasonal patterns: southwest, north and along the coast. The rainy season identified for those regions is coherent with the literature and covers the periods: Nov-Mar, Feb-May and Mar-Aug. An analysis of the inter-annual variability of those periods shows a trend of earlier onsets and an increase in the rainy season duration for the three regions, probably resulting from an increase in the sea temperature of the tropical south Atlantic. Finally, the proposed methodology is a basis for the development of an operational forecast model for the onset, peak and end of the rainy season across Northeast.

Palavras-chave: previsão da estação chuvosa, teleconecções climáticas, modelos estatísticos.

1) Pos-Doc. Earth Institute. Columbia University. New York – NY. EUA. e-mail: chr2107@columbia.edu.

2) Professor. Department of Earth and Environmental Engineering. Columbia University. New York – NY. EUA. e-mail: ula2@columbia.edu

1 - INTRODUÇÃO

O Nordeste brasileiro caracteriza-se por uma estação chuvosa bem definida, mas com grande variabilidade espaço-temporal. Dada a importância da estação chuvosa para a economia e o desenvolvimento regional, em particular para a agricultura irrigada e não-irrigada (de sequeiro), um grande número de trabalhos vem sendo desenvolvidos desde a década de 1970 (veja por exemplo Kousky, 1979; Moural e Shukla, 1981; Uvo *et al.*, 1998; Giannini *et al.*, 2004; Kayano e Andreoli, 2006) para melhor compreender a variabilidade e os padrões de chuva na região e prover modelos matemáticos que sejam capazes de prever precisamente a chuva sazonal sobre o Nordeste. Entretanto, em regiões caracterizadas por agricultura de sequeiro, como é o caso de grande parte do Nordeste, a previsão do início e fim da estação chuvosa torna-se mais importante do que a previsão dos totais sazonais (Ingram *et al.*, 2002; Sultan *et al.*, 2005; Baethgen *et al.*, 2009). Por exemplo, sabendo o período mais provável e a duração da quadra chuvosa, agricultores podem antecipar ou postergar o plantio ou até mesmo mudar o tipo de plantação, minimizando assim as perdas e maximizando eventuais usos de água para irrigação. Infelizmente, como esse tipo de informação não existe, isto é, nenhum modelo climático atualmente em uso no Nordeste é capaz de prever com precisão o período correspondente a quadra chuvosa, o plantio se dá muitas vezes em períodos fora da estação principal de chuva e perdas de safras inteiras são reportadas todos os anos.

O primeiro desafio em construir tal modelo passa a ser em como definir o início e o fim da estação chuvosa. Dado os diferentes mecanismos de precipitação (frentes, convecção local, monsoon, etc), não existe um método padrão utilizado na literatura que possa ser aplicado universalmente. Lima e Lall (2009) apresentam uma revisão dos principais métodos propostos na literatura. Num segundo passo, busca-se identificar padrões temporais (interanual, interdecadal, etc) e espaciais de variabilidade associados à estação chuvosa e então identificar forçantes climáticas de larga escala que respondem direta ou indiretamente por essa variabilidade. Normalmente essa etapa é feita por meio de análises de eventos climáticos extremos ou por análise de compósitos. Entretanto, não é de conhecimento destes autores nenhum trabalho ou modelo operacional que se proponha a prever o início e o fim da estação chuvosa.

Neste artigo busca-se estender o trabalho de Lima e Lall (2009) e melhor caracterizar os padrões espaço-temporais da estação chuvosa no Nordeste brasileiro. Numa primeira análise, é proposto um método para identificar o início e fim da quadra chuvosa a partir da curva sazonal de probabilidade de chuva diária. Em seguida, são identificadas regiões homogêneas caracterizadas por períodos chuvosos com padrões similares. Uma vez identificadas essas regiões, são analisadas tendências temporais no início e duração da estação chuvosa, buscando-se associá-las com forçantes climáticas de larga escala, em particular a temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos

Atlântico e Pacífico tropical. Finalmente, discute-se como um modelo operacional de previsão do início e duração da estação chuvosa para o Nordeste brasileiro poderia ser construído a partir da modelagem proposta neste trabalho.

2 – METODOLOGIA

2.1 – Dados Climatológicos

São utilizados neste trabalho dados de chuva diária de 504 estações pluviométricas obtidos durante o período 1950-2000. A distribuição espacial das estações é mostrada na Figura 1. A maior parte das estações apresenta um período completo de dados entre 1960-1980. O número médio de anos com dados disponíveis é 45. Todas as estações apresentam ao menos 20 anos de dados. Um ano de dado é considerado completo quando ao menos 200 dias apresentam dados de chuva, que são classificados em estado chuvoso ($y=1$), quando a chuva diária excede 0.254 mm, e seco ($y=0$), para valores de chuva abaixo dessa quantidade. As séries temporais de chuva foram obtidas a partir da rede NOAA NCDC de dados climatológicos diários e são disponibilizados pelo International Research Institute for Climate and Society (IRI) no sítio <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.GDCN/>.

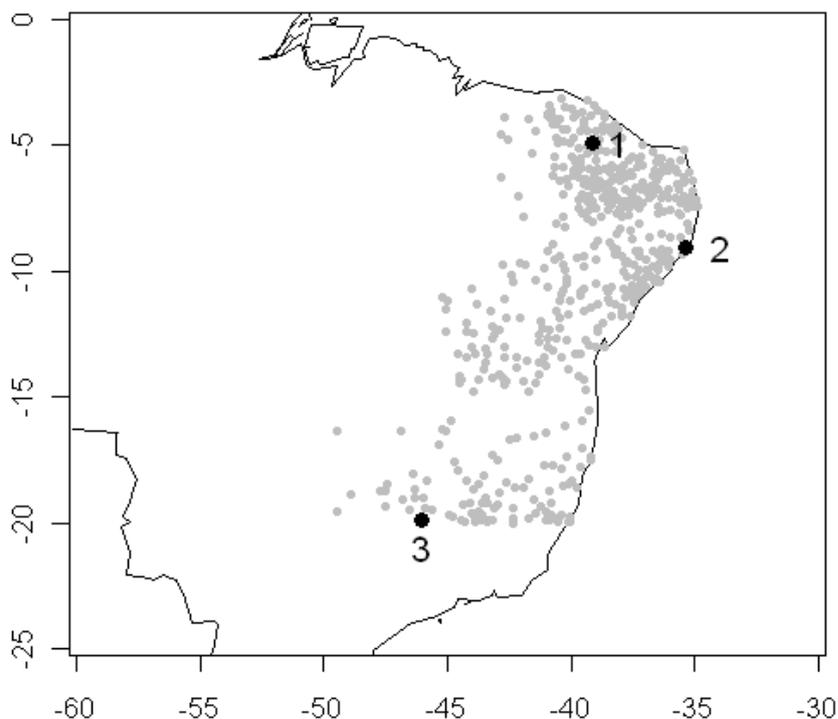


Figura 1 – Localização das estações de chuva utilizadas neste trabalho. Os números indicam estações representativas do norte (1), da costa (2) e do sul (3) do Nordeste.

2.2 – Modelo matemático

O modelo apresentado neste artigo baseia-se na metodologia descrita em Lima e Lall (2009), mas com algumas simplificações. Seja então $y_{st}(n)$ uma variável aleatória de Bernoulli para a estação s , recebendo o valor 1 para estado chuvoso no dia n do ano t e 0 no caso de estado seco. Matematicamente, $y_{st}(n)$ pode ser representada como:

$$y_{st}(n) \sim \text{Bin}(1, p_{st}(n)), \quad (1)$$

onde $p_{st}(n)$ é a probabilidade de chuva para a estação s e dia n do ano t . Como a estação chuvosa no Nordeste apresenta um ciclo sazonal bem definido, assume-se que $p_{st}(n)$ segue um ciclo anual, sendo modelado a partir de um harmônico de Fourier:

$$p_{st}(n) = \text{logit}^{-1}(a_{st} + b_{st} \sin(\omega n) + c_{st} \cos(\omega n)) \quad , \quad (2)$$

onde $\omega = \frac{2\pi}{365} = 0.0172$ é a frequência angular do ciclo anual. Implicitamente, assume-se independência espacial e temporal para a distribuição representada em (1).

Enquanto Lima e Lall (2009) apresentam um modelo hierárquico Bayesiano para estimativa dos parâmetros descritos em (1) e (2), utiliza-se aqui uma modelagem mais simples, com parâmetros estimados a partir do método da máxima verosimilhança num contexto de Modelos Lineares Generalizados (McCullagh e Nelder, 1989). Utilizou-se o software R para estimativa dos parâmetros e análise dos resultados.

A título ilustrativo, mostra-se (Figura 2), para uma estação pluviométrica aleatória, como se dá o ajuste do modelo proposto a partir de dados binários (1=chuva, 0 = seco) de chuva. O início e fim da estação chuvosa, representada pelas duas linhas verticais tracejadas na Fig. 2, é definido como sendo os dois pontos de inflexão da curva de probabilidade de chuva ajustada pelo modelo (linha contínua na Fig. 2). Outras definições podem ser usadas, como aquelas baseadas na probabilidade de chuva (Sultan *et al.*, 2005; Lima e Lall, 2009). Adicionalmente, podem ser obtidos a partir deste modelo o dia do pico da estação chuvosa e a probabilidade máxima associada a este dia. Maiores detalhes desta formulação matemática podem ser vistos em Lima e Lall (2009).

Observe que os parâmetros apresentados em (2) variam de acordo com i) estação analisada e ii) ano histórico. Assim, é possível identificar tendências temporais e padrões espaciais associados à estação chuvosa da região em estudo, como mostrado na seção seguinte.

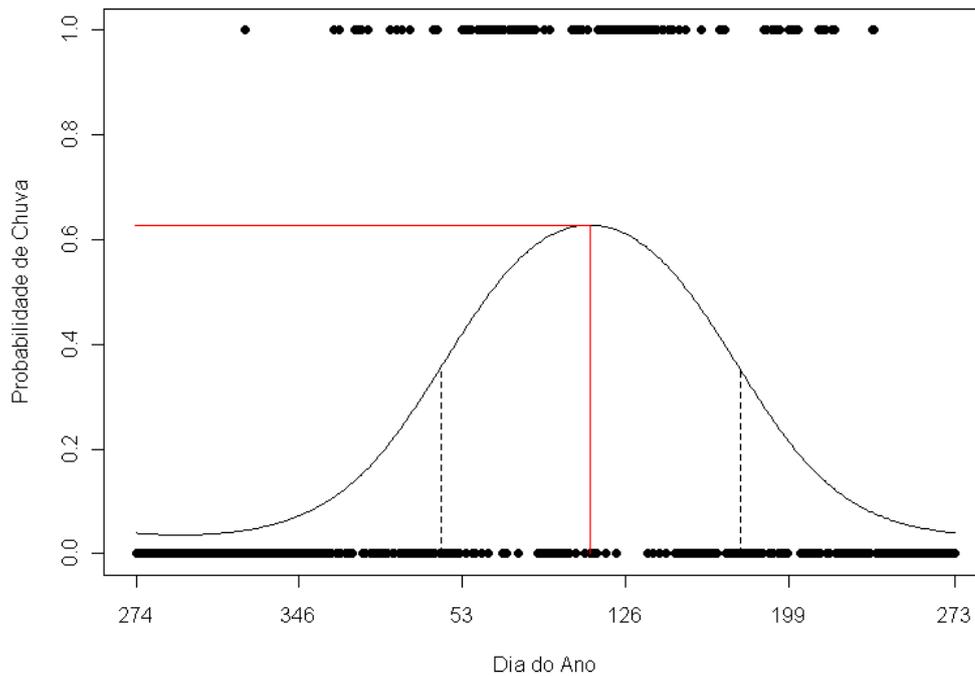


Figura 2 – Exemplo de ajuste do modelo proposto. Os pontos indicam ocorrência ($y=1$) e ausência ($y=0$) de chuva. A curva contínua mostra o ajuste do modelo e as duas linhas tracejadas verticais indicam os pontos de inflexão desta curva utilizados para definir o início e fim da estação chuvosa. A linha vermelha indica a probabilidade máxima de chuva e o dia do ano em que ela ocorre.

3 – RESULTADOS

3.1 - Sazonalidade

A Figura 3 apresenta o ajuste do modelo para 3 estações representativas dos três regimes de chuva no Nordeste (localização na Fig. 1) e para os anos 1968, 1972 e 1980, estes representando, respectivamente, períodos chuvosos, secos e normais, de acordo com a definição adotada em BRASIL (2000). Mudanças no início, pico e final da estação chuvosa podem ser facilmente observadas na Fig. 3. Anomalias positivas no total sazonal precipitado podem também ser identificados por este método, que mostra um aumento na probabilidade máxima de chuva devido ao aumento no número de dias chuvosos. Da mesma forma, é possível identificar estações chuvosas abaixo da média. Por exemplo, o pico mais cedo na estação norte em 1980 e a pouca chuva para esse período pode ser visto na Fig. 3b. Já a estação chuvosa de 1968 é caracterizada por altas probabilidades de chuva. O pico tardio em 1972 também é ilustrado. De forma similar, a Figura 3 mostra um ano de 1968 seco e um pico mais cedo em 1980 para a estação costeira.

De posse dos coeficientes temporais apresentados em (2), é possível obter a média temporal dos mesmos:

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T a_{st} \\
 B_s &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T b_{st} \\
 C_s &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T c_{st}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

e conseqüentemente uma estimativa do ciclo sazonal médio da probabilidade de chuva diária:

$$P_s(n) = \text{logit}^{-1}(A_s + B_s \sin(\omega n) + C_s \cos(\omega n))
 \tag{4}$$

onde T é o total de anos com dados disponíveis para a estação s .

A Figura 4 apresenta $P_s(n)$ (linha preta, ajuste do modelo) para as três estações selecionadas juntamente com a proporção de dias de chuva (linha vermelha, dados observados), isto é, para cada dia do ano calcula-se o número de dias de chuva no período analisado (por exemplo, de 1960-2000) e divide-se pelo total de dias neste período. Observa-se um excelente ajuste do modelo aos dados observados para as três estações. A tabela 1 apresenta os dias médios de início, pico e fim do período chuvoso para essas três estações.

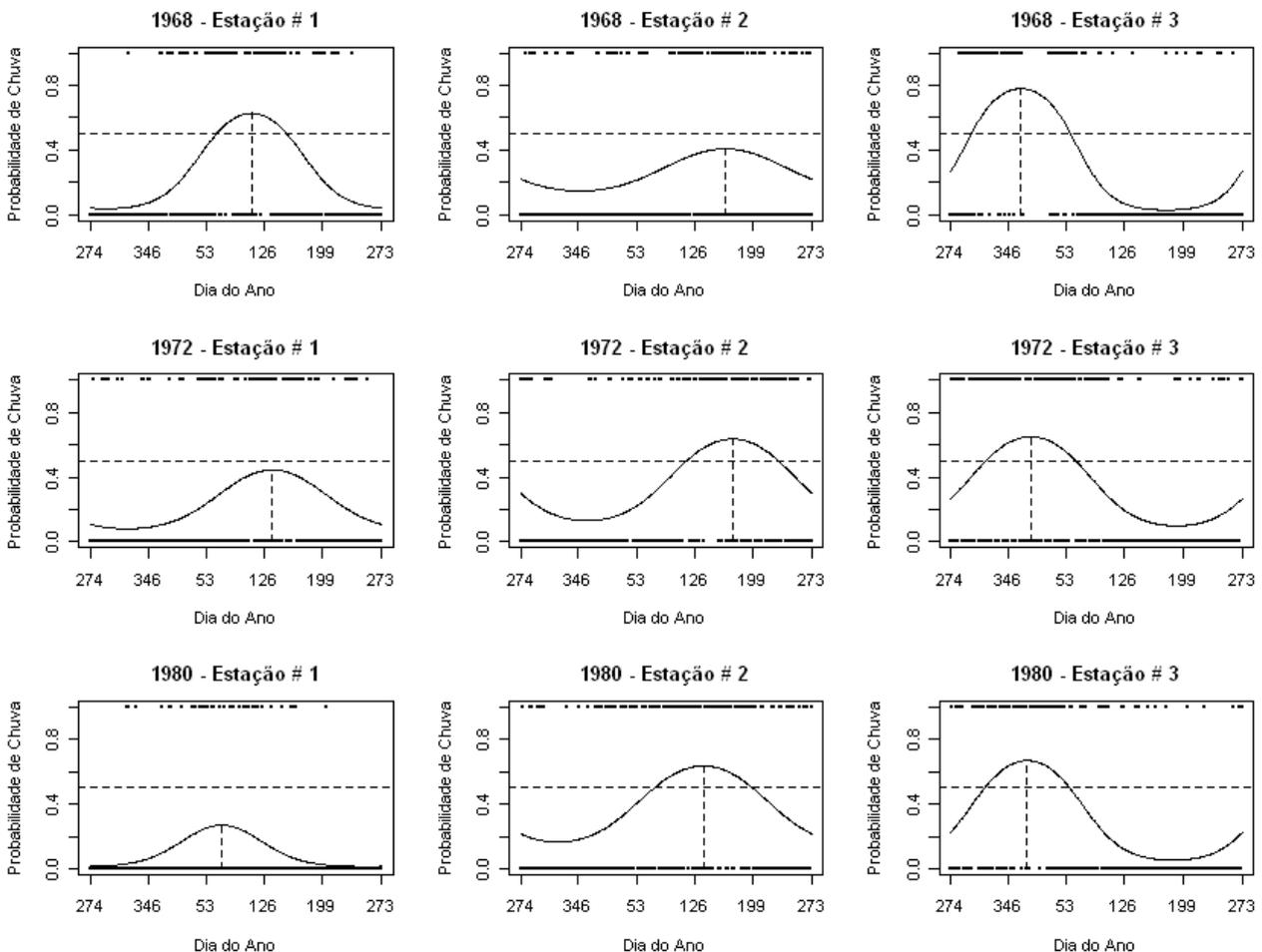


Figura 3 – Ajuste do modelo para três estações representativas do regime de chuva no Nordeste (vide Fig. 1) e três anos representativos de períodos chuvosos, secos e normais.

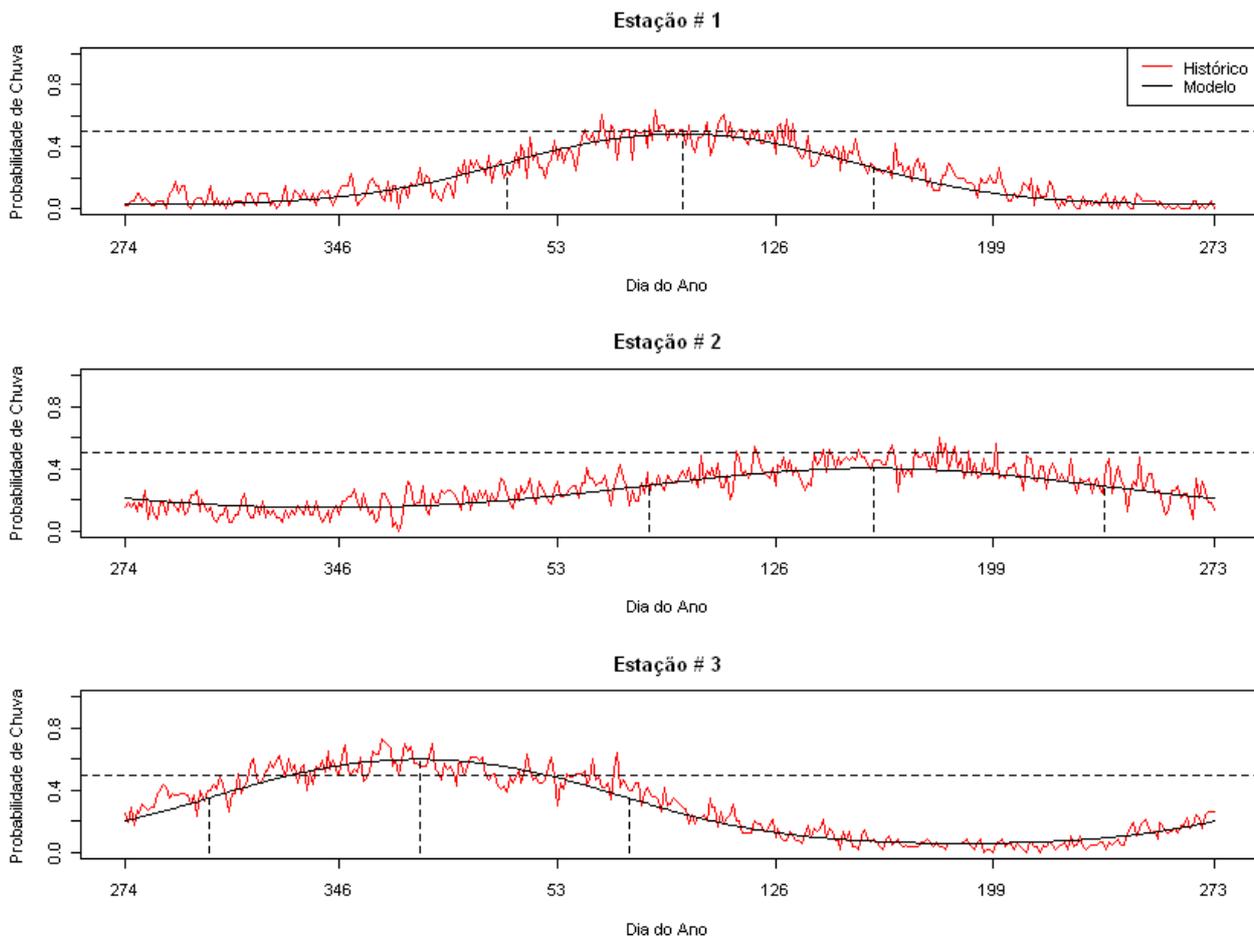


Figura 4 – Proporção de dias chuvosos (linha vermelha) e ajuste do modelo (linha preta) de acordo com a equação (4) para três estações representativas do Nordeste. As linhas tracejadas verticais mostram os dias de início, pico e fim do período chuvoso. A linha tracejada horizontal indica a probabilidade de 50% chuva.

Tabela 1 – Características do período chuvoso das três estações representativas do Nordeste

Variável	Estação 1	Estação 2	Estação 3
Localização	Norte do Nordeste	Costa norte do Nordeste	Sul do Nordeste
Início do período chuvoso	6 de Fevereiro	25 de Março	29 de Outubro
Pico do período chuvoso	5 de Abril	8 de Junho	8 de Janeiro
Fim do período chuvoso	8 de Junho	24 de Agosto	18 de Março
Duração (dias)	123	152	140

3.2 – Probabilidade máxima de chuva e dia de pico

A distribuição espacial da probabilidade máxima média de chuva, dada por

$$P_s^{mas} = \text{logit}^{-1}\left(A_s + \sqrt{B_s^2 + C_s^2}\right), \quad (5)$$

é mostrada na Figura 5. A região central do Nordeste, usualmente referida como polígono das secas é claramente identificada na figura 5 como uma região de baixa probabilidade de chuva, com valores entre 15% e 25%. Uma região intermediária, com probabilidades mais elevadas, é observada na costa Nordestina, no Piauí e ao norte do Ceará. Finalmente, a região mais chuvosa é localizada no sul do Nordeste.

O dia de pico do período chuvoso (associado à probabilidade máxima de chuva) é mostrado na Figura 6. Da mesma forma, três regiões podem ser identificadas: i) sul do Nordeste, com pico em janeiro; ii) norte do Nordeste, com pico em torno de março e iii) costa do Nordeste, com pico da estação chuvosa em junho. Esses três diferentes regimes estão associados a diferentes mecanismos de precipitação, como apontados em Lima e Lall (2009) e discutidos na próxima seção.

Probabilidade Máxima de Chuva Diária

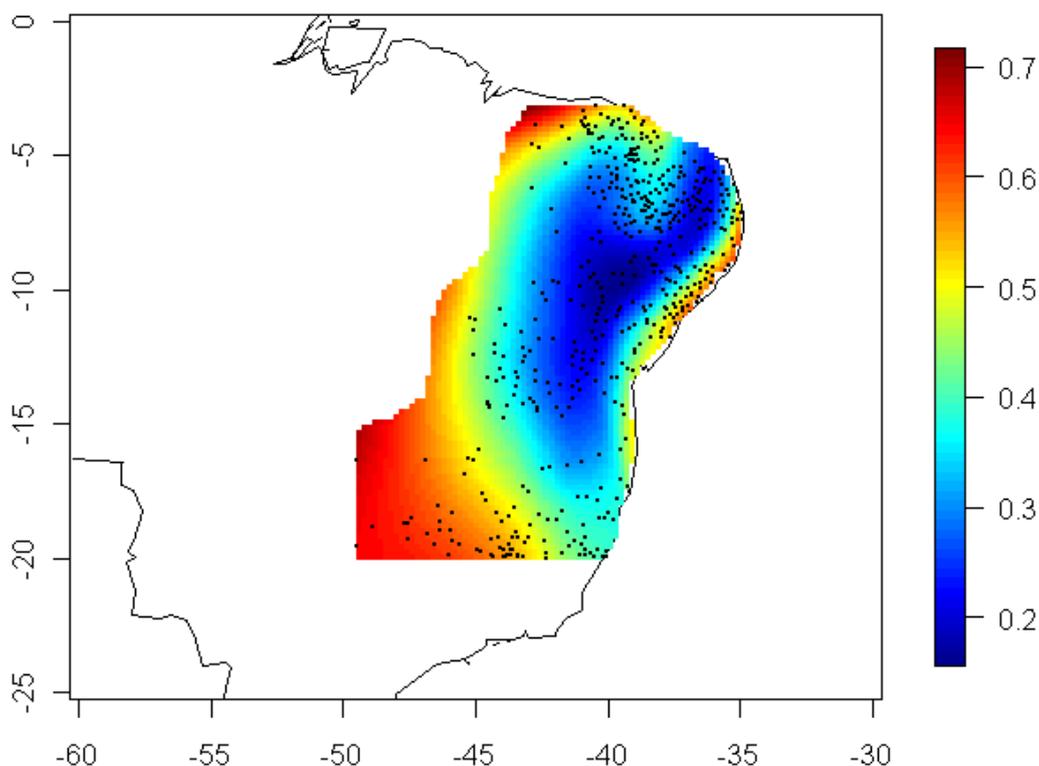


Figura 5 – Probabilidade máxima de chuva. Os pontos indicam as estações pluviométricas utilizadas.

Dia do Ano de Probabilidade Máxima de Chuva

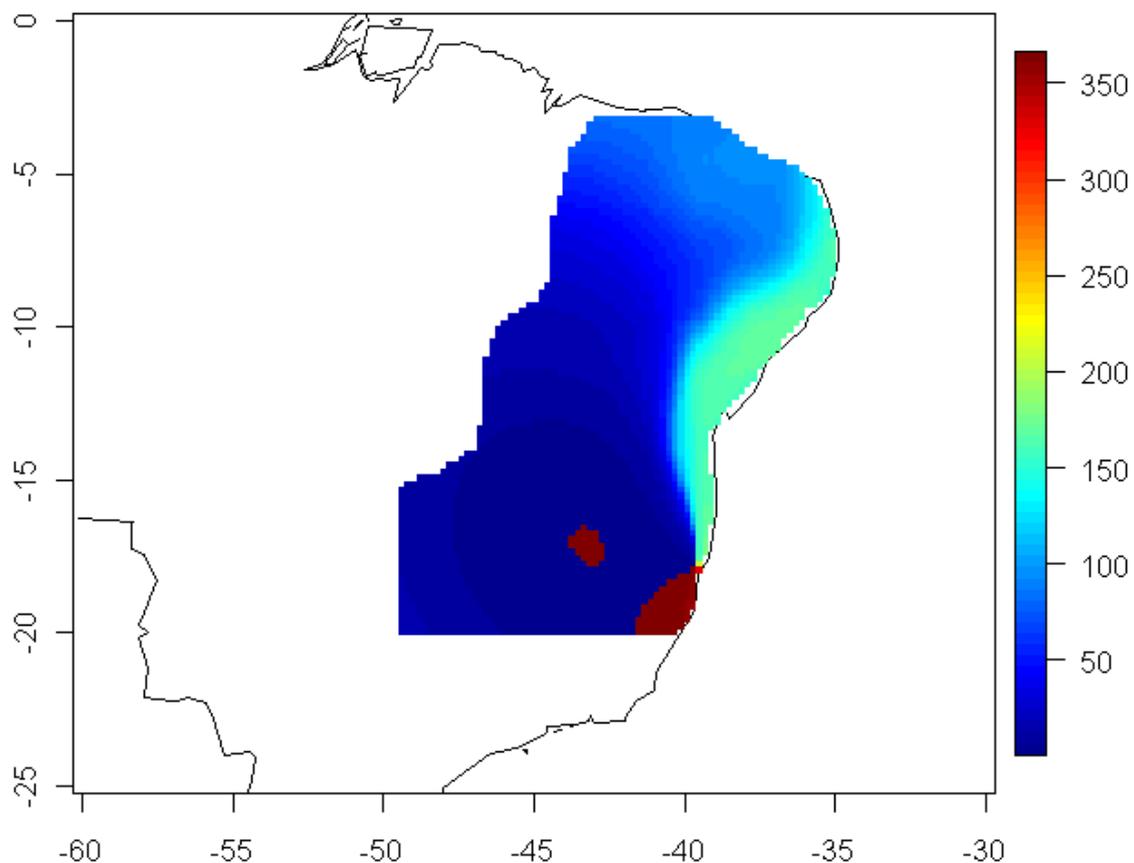


Figura 6 – Dia de pico associado com a probabilidade máxima de chuva.

3.3 – Análise regional: agrupamento e tendência temporais

3.3.1 – *K-means* e o agrupamento das estações

Com o objetivo de identificar regiões homogêneas, sujeitas a padrões similares no que diz respeito a estação chuvosa (início, pico, fim e proporção de dias chuvosos), e tendências temporais monotônicas, optou-se neste trabalho em aplicar a técnica *K-means* (veja, por exemplo, Bishop, 2006) para determinar os diferentes padrões de sazonalidade das estações aqui utilizadas a partir dos coeficientes de Fourier médio apresentados na equação (3). Apesar da simplicidade dessa técnica, os resultados produzidos são bastante satisfatórios, a julgar pelo grande número de aplicações presente na literatura.

Seja então $\{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N\}$ o conjunto de N observações de uma variável aleatória \mathbf{X} (coeficientes de Fourier neste caso e $N = 504$ número de estações pluviométricas) de dimensão Euclidiana D (aqui $D = 3$ coeficientes harmônicos). O objetivo aqui é dividir o conjunto de dados em K agrupamentos. Seja agora μ_k o centro do agrupamento k . Para cada ponto \mathbf{X}_n , defini-se um

conjunto correspondente de variáveis indicadores binárias $r_{nk} \in \{0,1\}$, onde $k=1,\dots,K$ descreve em qual agrupamento K está alocada a variável \mathbf{X}_n , tal que se a variável \mathbf{X}_n está designada para o agrupamento k , então $r_{nk} = 1$, e $r_{nj} = 0$ para $j \neq k$. O objetivo agora é encontrar r_{nk} tal que a soma dos quadrados da distância de cada ponto ao mais próximo vetor μ_k é mínima. Assim, busca-se o mínimo da função objetivo J :

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_{nk} \|\mathbf{x}_n - \mu_k\|^2 . \quad (6)$$

Bishop (2006) apresenta detalhes adicionais de como minimizar J .

Tendo-se obtido o grupo a que pertence cada estação pluviométrica, é possível distinguir regiões com padrões de sazonalidade similares ou diferentes. Dados os três padrões sazonais associados à estação chuvosa no Nordeste comumente identificados na literatura (Lima e Lall, 2009), decidiu-se que $K = 3$.

A Figura 7 apresenta os agrupamentos obtidos a partir da aplicação de *K-means* aos coeficientes de Fourier mostrados em (3). Três agrupamentos espaciais na região Nordeste são facilmente identificados: i) grupo 1, localizado no sudoeste e com estação chuvosa modulada pela entrada de frentes frias provenientes do hemisfério sul (Strang, 1972; Kousky, 1980; Chu, 1983; Hastenrath, 1994); ii) grupo 2, na região norte, com o período chuvoso definido pelo deslocamento da zona de convergência inter-tropical (ITCZ) (Moura e Shukla, 1981; Hastenrath, 1994) e iii) grupo 3, com estações ao longo da costa Nordestina e período chuvoso caracterizado pela propagação de ondas do Atlântico sul e pelo sistema de brisa marítima (Kousky, 1980; Rao *et al.*, 1993).

A partir do centro de cada agrupamento, isto é, a média espacial dos coeficientes de Fourier (3) para as estações pertencentes a cada grupo, é possível determinar os padrões da estação chuvosa de cada agrupamento através da substituição dos mesmos na equação (4). A Figura 8 mostra a probabilidade média de chuva para cada grupo em função do dia do ano. Note que o período chuvoso e dia de pico de cada grupo são similares aos identificados na Figura 6. A Tabela 2 apresenta em detalhes os dias de início, pico e fim da estação chuvosa de cada agrupamento.

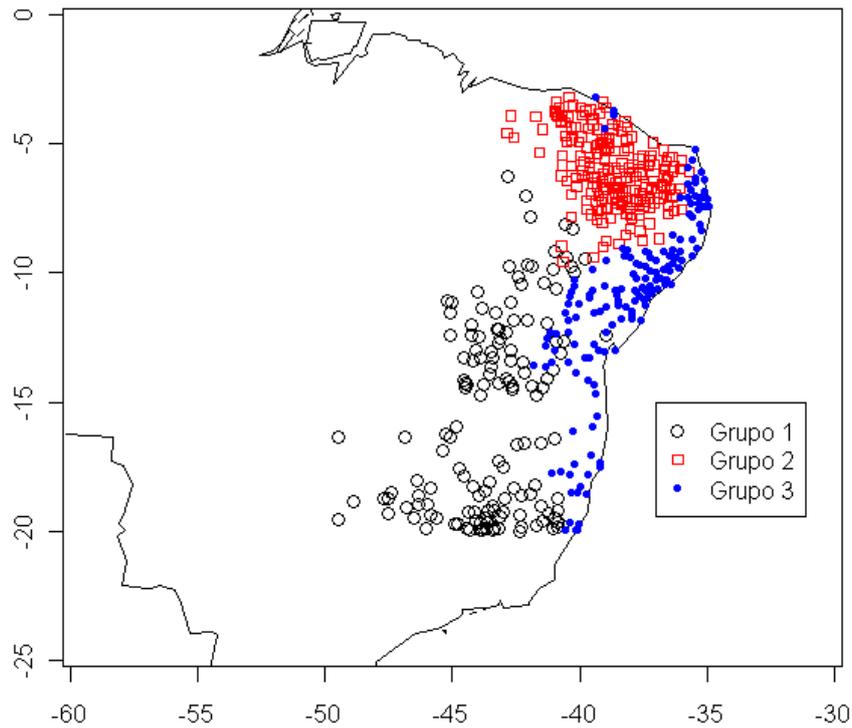


Figura 7 – Agrupamento das estações pluviométricas utilizadas de acordo com os padrões sazonais

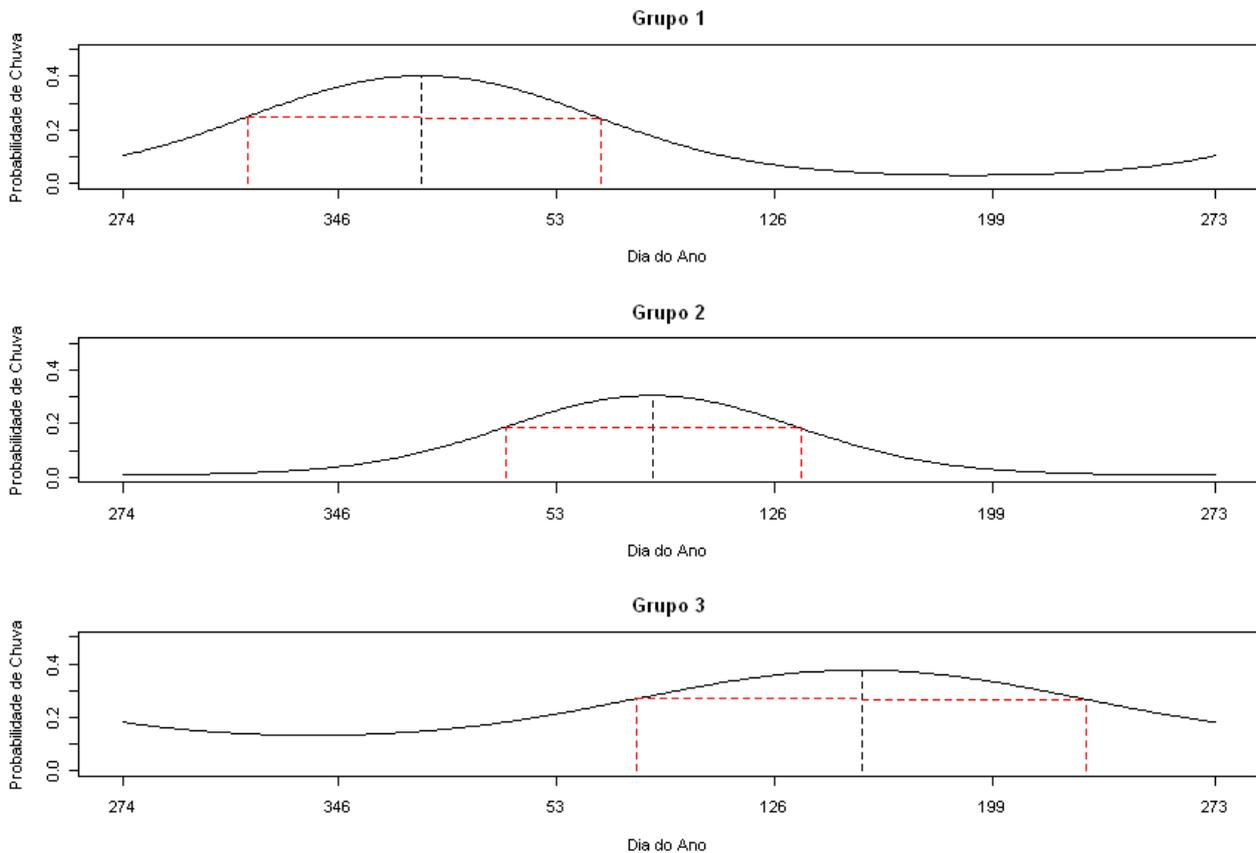


Figura 8 – Probabilidade média de chuva para cada grupo identificado na Fig. 7. As linhas tracejadas vermelhas mostram o início e fim da estação chuvosa com base no ponto de inflexão da curva sazonal de probabilidade de chuva. A linha tracejada preta mostra o dia de pico.

Tabela 2 – Detalhes do período chuvoso dos três agrupamentos mostrados na Figura 7

Variável	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Localização no Nordeste	Sudoeste	Norte	Costa
Início da estação	12 de Novembro	6 de Fevereiro	21 de Março
Pico da estação	9 de Janeiro	26 de Março	4 de Junho
Fim da estação	9 de Março	15 de Maio	18 de Agosto
Duração (dias)	118	99	150

3.3.2 – Tendências Temporais

Com o cálculo da série temporal de dia de início e duração do período chuvoso de cada estação pluviométrica, é possível determinar o dia médio e a duração média do período chuvoso de cada grupo a partir da mediana espacial dessas variáveis ao longo dos agrupamentos. A Figura 9 mostra essas séries para cada um dos três grupos. Em todos os grupos observa-se claramente uma tendência temporal de inícios mais cedo e durações maiores da estação chuvosa. A aplicação do teste não-paramétrico Sen-slope (Sen, 1968) mostra que a tendência monotônica do dia de início da estação chuvosa para o grupo 1 e as tendências de duração do período chuvoso para os grupos 1 e 3 são estatisticamente significantes ao nível de confiança de 95%.

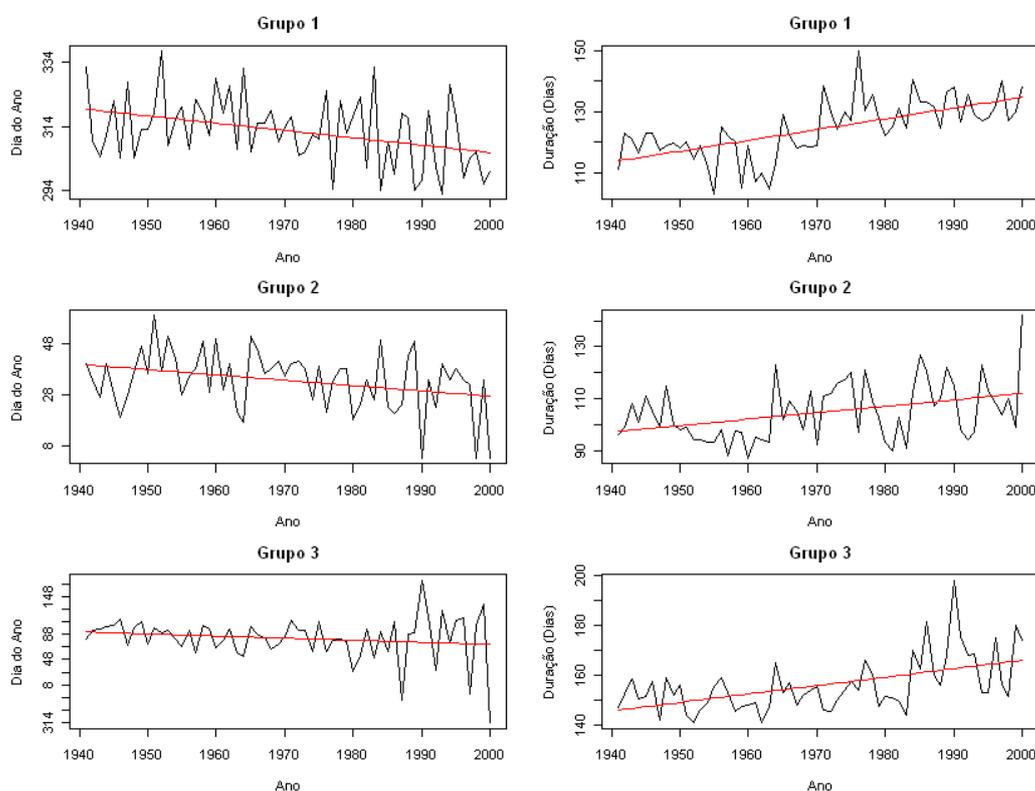


Figura 9 – Séries temporais (linha preta) do dia de início (painel esquerdo) e da duração (painel direito) da estação chuvosa para os três agrupamentos. A linha vermelha mostra a tendência linear.

3.4 Teleconecções climáticas

De posse das séries temporais de início e duração do período chuvoso para cada grupo (mostradas na Figura 9) é possível determinar correlações estatísticas com variáveis climáticas de larga escala com intuito de melhor entender os mecanismos climáticos responsáveis pela variabilidade interanual nos padrões chuvosos da região e por fim: i) estabelecer possíveis causas das tendências temporais observadas e ii) desenvolver modelos que possam prever com uma certa antecedência e acurácia o início e a duração do período chuvoso no Nordeste.

Vários trabalhos indicam a grande influência de anomalias na temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos tropicais Atlântico e Pacífico no regime de chuva do Nordeste. Neste artigo são analisadas teleconecções climáticas a partir das correlações temporais entre o dia do ano e a duração do período chuvoso com quatro índices da TSM: NINO3, representativo do El Niño, indicador do Atlântico norte (IAN) e sul (IAS) e a diferença IAN-IAS, que em conjunto indicam a posição meridional da ITCZ. Os dados de TSM utilizados data (Kaplan *et al*, 1998; Reynolds and Smith, 1994) são disponibilizados pelo IRI no sítio <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.KAPLAN/.EXTENDED/.v2/>.

As figuras 10 e 11 mostram a correlação entre os quatro índices climáticos e a série temporal de início e duração da estação chuvosa do grupo 1, respectivamente. No período anterior à estação chuvosa (região em cinza), correlações estatisticamente significativas com os indicadores do oceano Atlântico tropical aparecem apenas para atrasos de 9 e 10 meses e indicam que anomalias positivas no Atlântico sul ou negativas no Atlântico norte tendem a antecipar o início da estação chuvosa no grupo 1. Uma pequena influência do El Niño aparece próximo ao período da estação chuvosa, com anomalias positivas de El Niño tendendo a atrasar o início da estação chuvosa. A influência positiva do Atlântico sul tropical sobre a precipitação no Nordeste é confirmada pela Fig. 11, que sugere que anomalias positivas no IAS tendem a aumentar a duração da estação chuvosa nas estações pluviométricas do grupo 1.

De forma similar, a correlação (Figura 12) entre os indicadores climáticos e a série de início da estação chuvosa do grupo 2 sugere que anomalias positivas do IAS em outubro tendem a antecipar o início período chuvoso neste grupo, que em média ocorre em fevereiro do ano seguinte (Tabela 2). Um padrão de correlação similar aparece para a série de início do grupo 3 (não mostrada aqui), com pico de correlação com o indicador IAS ocorrendo em julho do ano anterior ao período chuvoso. A influência do NINO3 não aparece significativa em nenhum desses grupos. Finalmente, a correlação entre a série de duração da estação chuvosa dos grupos 2 e 3 e os indicadores climáticos reflete o padrão mostrado na Figura 11, com uma tendência de aumento na duração do período chuvoso durante anomalias do IAS no meses que antecedem a estação chuvosa.

As correlações significativas entre o IAS e as séries de início e duração da estação chuvosa para todos os grupos sugerem que as tendências temporais identificadas na Figura 9 podem ser de alguma forma resultado de tendências temporais no IAS. De fato, a série temporal do IAS para os meses de janeiro e outubro (Figura 13), meses esses que apresentam as maiores correlações com o dia de início da estação chuvosa dos grupos 1 e 2 (Figuras 10 e 12), mostra igualmente uma tendência monotônica durante o período 1940-2000, resultado este também reportado em Rao *et al.* (2006).

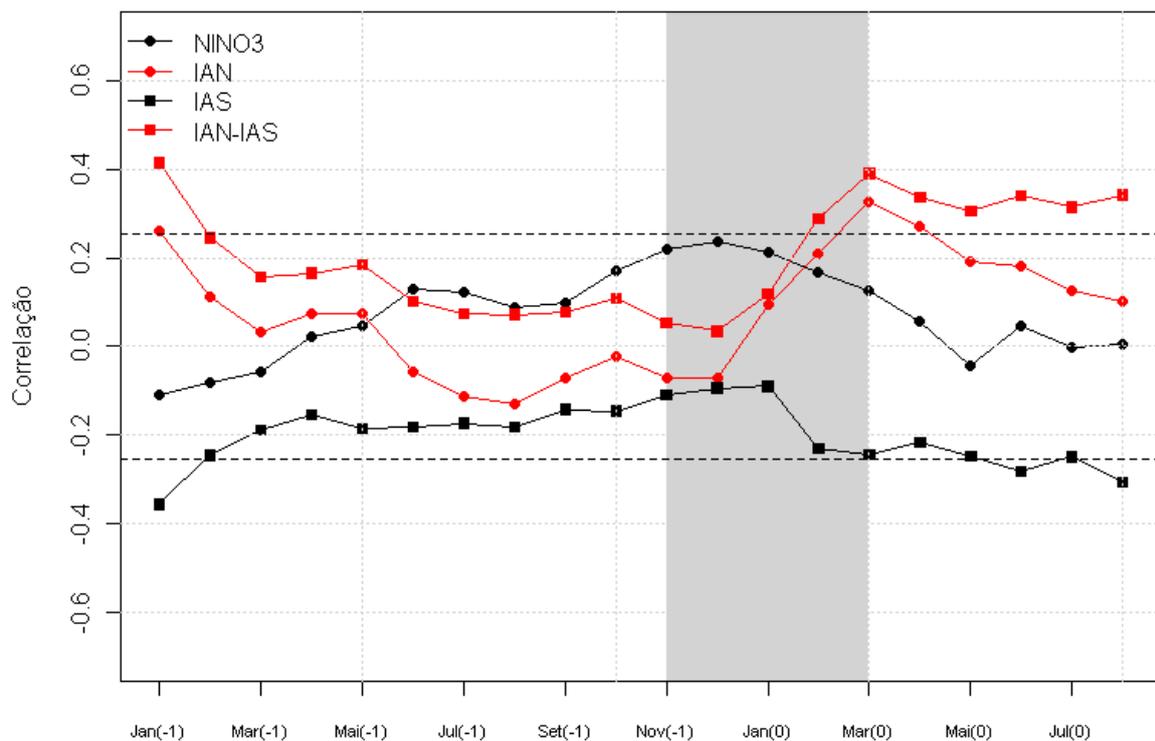


Figura 10 – Correlação entre o início da estação chuvosa do grupo 1 e indicadores climáticos. A região em cinza indica o período chuvoso como definido na Fig. 8. Correlações abaixo ou acima da linha horizontal tracejada são estatisticamente significantes ao nível de confiança de 95%.

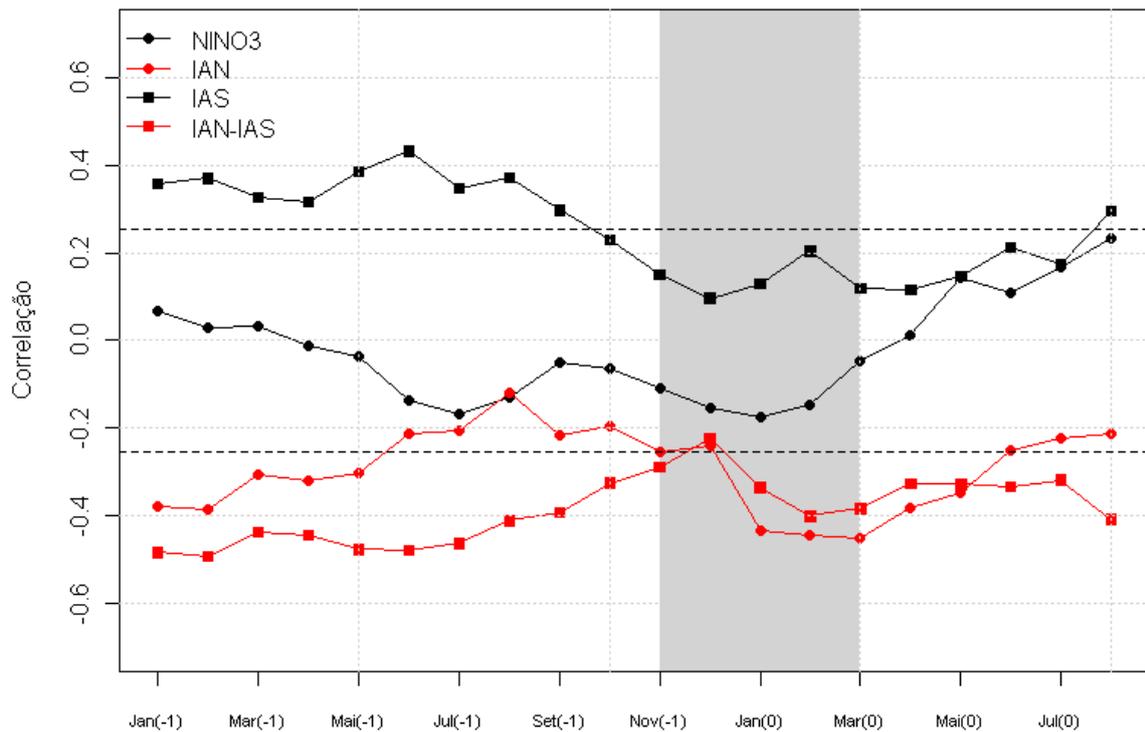


Figura 11 – Como na Fig. 10, mas para a série de duração da estação chuvosa do grupo 1.

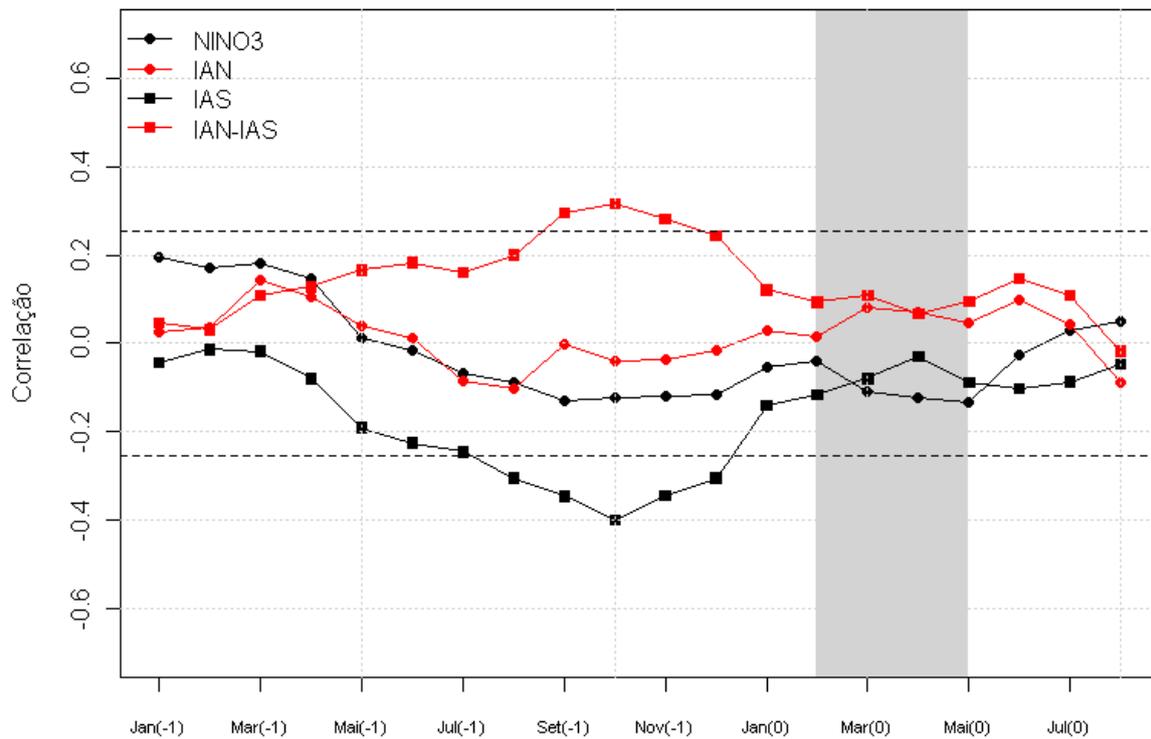


Figura 12 – Como na Fig. 10, mas para a série de início da estação chuvosa do grupo 2.

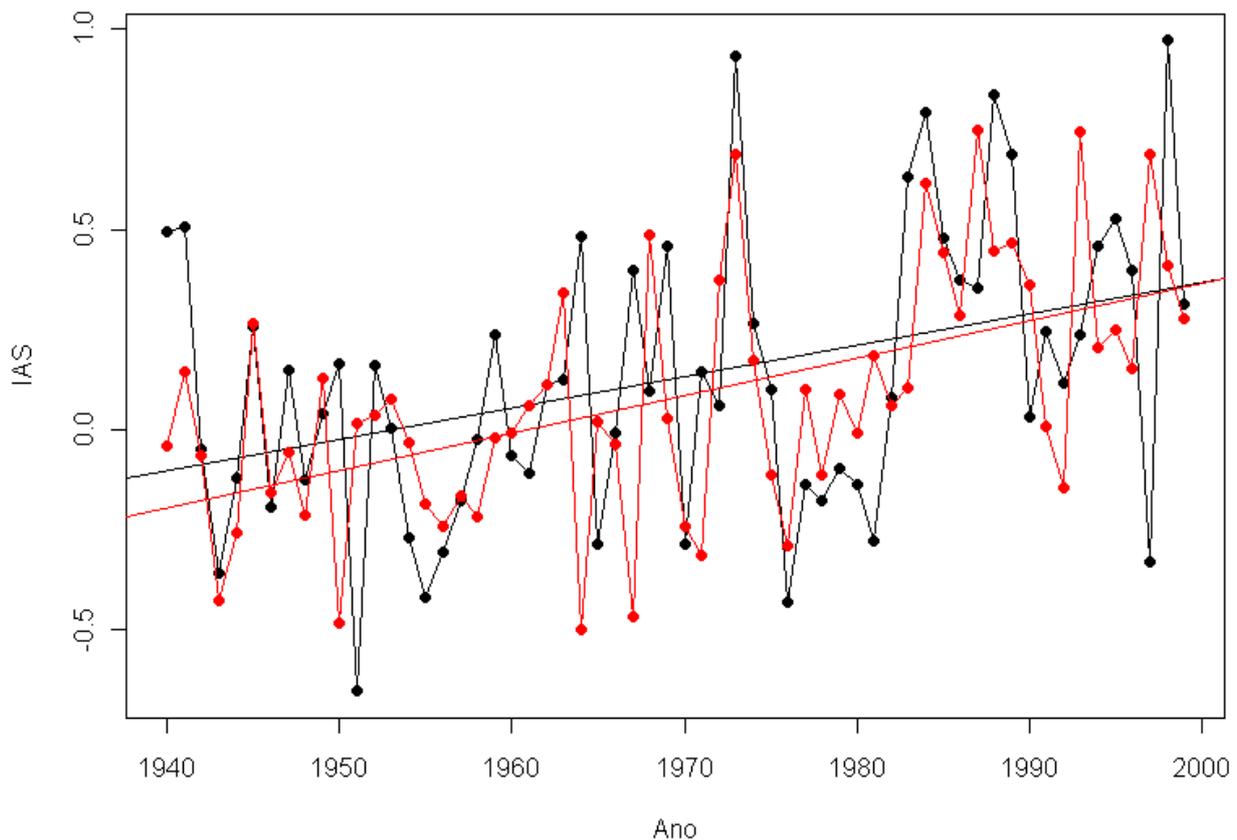


Figura 13 – Série temporal do IAS para os meses de janeiro (linha preta) e outubro (linha vermelha). As linhas contínuas mostram a tendência linear

4 – DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Um modelo estocástico, baseado em regressão logística e séries de Fourier, foi proposto para modelar a ocorrência de chuva ao longo do ano. O modelo foi testado utilizando 504 estações pluviométricas localizadas no Nordeste brasileiro. Baseado nos pontos de inflexão da curva sazonal de probabilidade de chuva obtida com o modelo, propôs-se identificar os dias de início e fim da estação chuvosa. O dia de pico e a duração da mesma são também facilmente identificados a partir da curva de ajuste do modelo.

Inicialmente foi verificado o ajuste do modelo em três estações pluviométricas localizadas nas extremidades do Nordeste e representativas dos três principais padrões de chuva na região usualmente reportados na literatura. Em três anos caracterizados como chuvoso, seco e normal, o uso do modelo proposto permitiu a identificação de mudanças nos padrões sazonais (início, pico, fim e duração) de chuvas para as três estações. A média temporal dos coeficientes de Fourier levou a uma curva sazonal média de probabilidade de chuva que se ajustou de forma excelente à curva de proporção de dias de chuva. As datas obtidas para o período chuvoso coincidem com o apresentado na literatura.

A partir da média temporal dos coeficientes de Fourier, foram calculadas para todas estações analisadas a probabilidade máxima média de chuva e o dia do ano associado com essa probabilidade. A distribuição espacial mostra uma clara região com baixas probabilidades de chuva, localizada no polígono das secas e um aumento da probabilidade ao longo do norte do Ceará e Piauí e ao longo da costa Nordeste. Os maiores valores encontrados são para as estações no sul do Nordeste. Associado com estas regiões está o dia de pico do período chuvoso: janeiro para as regiões sul e central, março para o norte e junho ao longo da costa.

Três regiões estatisticamente homogêneas com relação ao padrão sazonal de chuva foram identificadas a partir da técnica *K-Means*. Datas de início, pico e fim e a duração da estação chuvosa foram reportadas. Tais regiões correspondem aos três principais mecanismos de precipitação associados à estação chuvosa no Nordeste. Devido ao grande número de estações pluviométricas utilizadas, obteve-se uma excelente resolução espacial das delimitações dessas regiões, fato até então não obtido na literatura.

Tendências temporais monotônicas foram observadas no dia de início e na duração da estação chuvosa em todas as três regiões, porém mais acentuadamente nas estações localizadas na região sudoeste. Notou-se durante o período 1940-2000 uma tendência de antecipação do início assim como um aumento na duração da quadra chuvosa. Correlações com indicadores representativos das forçantes climáticas de larga escala que dominam a região mostrou fortes evidências de que esse comportamento está associado com uma tendência de temperaturas do mar mais elevadas na região do Atlântico sul tropical observada na série do IAS utilizada aqui e também reportada na literatura (Rao *et al.*, 2006). Modelos globais climáticos podem ser utilizados para verificar se tal tendência no Atlântico está ou não associada com mudanças climáticas globais. A persistência dessas tendências nos padrões de chuva a partir do ano 2000 não pode ser verificada devido à indisponibilidade de dados para as estações utilizadas aqui.

Finalmente, as teleconexões climáticas associadas com o dia de início e a duração da estação chuvosa no Nordeste e identificadas neste artigo abrem caminho para o desenvolvimento de um modelo operacional que possa prever com semanas ou meses de antecedência essas variáveis. As altas correlações encontradas entre o IAS e o dia de início e a duração da estação chuvosa (Figs. 10-12) indicam claramente que esse indicador pode ser usado como preditor climático. Tal feito é de extrema importância para a agricultura de sequeiro da região, pois sabendo o melhor tempo para plantar, agricultores podem minimizar as perdas e elevar a produção. Da mesma forma, a agricultura irrigada pode fazer uso desse período ótimo de plantio para minimizar a irrigação e melhor gerir os recursos hídricos regionais.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a CAPES/Fulbright pela concessão de bolsa de Doutorado. Os autores agradecem também a ONS e IRI por disponibilizarem os dados hidroclimatológicos.

BIBLIOGRAFIA

- BAETHGEN, W.E.; CARRIQUIRY, W.; ROPELEWSKI, C. (2009). “*Tilting the Odds in Maize Yields*”, Bulletin of the American Meteorological Society, 90 (2), pp. 179-183.
- BISHOP, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. 738p.
- BRASIL (2000). “*Transposição das Águas do São Francisco*”, Secretaria de Infraestrutura Hídrica, Ministério da Integração Nacional.
- CHU, P.-S. (1983). “*Diagnostic studies of rainfall anomalies in Northeast Brazil*”, Monthly Weather Review, 111, pp. 1655–1664.
- GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. (2004). “*The preconditioning role of tropical Atlantic variability in the development of the ENSO teleconnection: Implications for the prediction of Nordeste rainfall*”, Clim. Dynam., 22, pp. 839–855.
- HASTENRATH, S. (1994). *Climate Dynamics of the Tropics*. Kluwer Academic Publisher.
- INGRAM, K. T.; RONCOLI, M.C.; KIRSHEN, P.H. (2002). “*Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study*”, Agr. Syst., 74, pp. 331–349.
- KAPLAN, A.; CANE, M.; KUSHNIR, Y.; CLEMENT, A.; BLUMENTHAL, M.; RAJAGOPALAN, B. (1998). “*Analyses of global sea surface temperature 1856-1991*”, J. Geophys. Res., 103, pp.18,567–18,589.
- KAYANO, M.R.; ANDREOLI, R.V. (2006). “*Relationship between rainfall anomalies over northeastern Brazil and the El Niño-Southern Oscillation*”, J. Geophys. Res., 111, D13,101.
- KOUSKY, V.E. (1979). “*Frontal Influences on Northeast Brazil*”, Monthly Weather Review, 107, pp. 1140–1153.
- LIMA, C.H.R.; LALL, U. (2009). “*Hierarchical Bayesian Modeling of Multise Daily Rainfall Occurrence: rainy season onset, peak and end*”, Water Resources Research, in press.
- MCCULLAGH, P; NELDER, J. A. (1989). *Generalized Linear Models*. Chapman and Hall, London.
- MOURA, A.D.; SHUKLA, L. (1981). “*On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory and numerical experiments with a general circulation model*”, J. Atmos. Sci., 38, pp. 2653–2675.

- RAO, V. B.; GIAROLLA, E.; KAYANO, M.T.; FRANCHITO, S.H. (2006). “*In the Recent Increasing Trend of Rainfall over Northeast Brazil Related Sub-Saharan Drought?*”, J. Climate, 19, pp. 4448–4453.
- RAO, V. B.; LIMA, M.C.D.; FRANCHITO, S.H. 1993. “*Seasonal and Interannual Variations of Rainfall over Eastern Northeast Brazil*”, J. Climate, 6, pp. 1754–1763.
- REYNOLDS, R. W.; SMITH, T.M. (1994). “*Improved global sea surface temperature analyses*”, J. Climate, 7, pp. 929-948.
- SEN, P.K. (1968). “*Estimates of the regression coefficient based on Kendall’s tau*”, J. of the American Statistical Association, 63, pp. 1379-1389.
- STRANG, D. M. G. D. (1972). “*Climatological analysis of rainfall normals in northeast Brazil*”, Relatório Técnico, Centro Tecnológico Aeroespacial, artigo número IAE-M 02/72.
- SULTAN, B.; BARON, C.; DINGKUHN, M.; SARR, B.; JANICOT, S. (2005). “*Agricultural impacts of large-scale variability of the West African monsoon*”, Agr. Forest. Meteorol., 128, pp. 93–110.
- UVO, C. B.; REPELLI, C.A.; ZEBIAK, S.E.; KUSHNIR Y. (1998). “*The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil monthly precipitation*”, J. Climate, 11, pp. 551–561.