

MODELAGEM DO NÚMERO DE TEMPESTADES COMO UMA VARIÁVEL ALEATÓRIA DE POISSON PARA O RECÔNCAVO BAIANO

Lazaro Nonato Vasconcellos de Andrade ⁽¹⁾

Professor Titular, Departamento de Ciência Exatas e da Terra (DCET- I), da Universidade do Estado da Bahia (UNEB): Invandrade@uneb.br

RESUMO

O trabalho procura determinar a existência de uma probabilidade associada com a ocorrência de eventos extremos para os quais um conjunto de respostas espaço-temporais são delineadas. Os procedimentos para coleta de dados e processamento foram estudados a partir de reanálises obtidas do National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmosphere Research (NCEP-NCAR). As respostas finais foram comparadas aos dados obtidos em sistemas de análise de dados das componentes principais: pressão superficial, humidade relativa, temperatura do ar, as componentes u e v do vento, precipitação e radiação de ondas longas, para eventos extremos que tenham ocorrido no período de 1978 a 2014 em termos de faixa de dados climáticos observados.

PALAVRAS-CHAVE: eventos extremos, análise estatística discreta, Recôncavo Baiano.

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo descrever os fenômenos de eventos extremos que ocorreram durante o espaço tempo de observação compreendido entre 1978 e 2014. A caracterização das tempestades durante este tempo permitirá entender evidências sobre mudanças climáticas no presente para compará-las com novos eventos no futuro. O mapa de ocorrências, quantificação e qualificação destas tempestades na costa nordeste da América do Sul representa a oportunidade de entender a magnitude destes eventos extremos na América do Sul. Nas últimas décadas cidades têm sido afetadas com estas tempestades e muitos cidadãos tiveram prejuízos com estes fenômenos. Nossa questão principal sobre estas tempestades é se a magnitude destes eventos aumentaram durante este período e de quanto. Uma outra questão é se a distribuição destas tempestades sofreu modificações e neste caso a questão principal é se o número de tempestades na estação do outono tem sofrido modificações significantes. As amostras de dados para esta análise tiveram foco na costa do estado da Bahia no Brasil, mais precisamente o Recôncavo Baiano (RB) um conjunto de municípios próximos à cidade de Salvador.

Objetivo(s) do Trabalho

Salvador é uma cidade muito antiga do Brasil. A cidade é uma capital cultural do Brasil com muitos grupos de artistas que tiveram e tem relevante importância na arte e na história do país. Hoje todo o RB concentra uma população em torno de 3.5 milhões de habitantes. Em uma formação geográfica peninsular a cidade foi construída e se desenvolve na direção do Oceano Atlântico dentro de uma baía, A Baía de Todos os Santos (BTS). Salvador é um centro cultural no Brasil e teve expressivo desenvolvimento econômico nas últimas cinco décadas com a indústria petroquímica e automobilística. A Figura 1 apresenta uma imagem de satélite Landsat-5 (DSA, 2012) da cidade e da baía obtida no ano de 2005 e tratada com o software SPRING (Câmara et al., 1996). Nesta imagem é possível ver a Baía de Todos os Santos e suas nuvens tipo stratus de baixa altitude que representam uma característica climática no desenvolvimento de nuvens nesta região.

Climaticamente esta região tem típicas condições tropicais com médias de temperatura do ar de 25,2 °C, humidade relativa entre 79 a 83 %, precipitação anual em torno de 2.100 mm, evaporação anual em torno de 1.200 mm, estação chuvosa entre março e junho, precipitações médias mensais de 300 mm/mês, com períodos secos raros e sazonalidade climática complexa. Variações regionais no tempo e no clima da América do Sul reflete a circulação atmosférica sobre o continente e oceanos adjacentes em torno de condições climáticas médias e ciclos regulares, de igual modo a sua variabilidade espacial e temporal apresenta uma variação em torno de poucos meses a longos anos.

Garreaud and Aceituno (2007) listam um conjunto de fenômenos climáticos que caracterizam o tempo na América do Sul e no Oceano Atlântico. Como exemplo estabelecem que "os fenômenos atmosféricos são fortemente afetados pelas feições topográficas e padrões da vegetação sobre o continente, como também por condições moderadas provenientes dos oceanos adjacentes". Cabe salientar que estas condições moderadas influenciam permanentemente nas condições

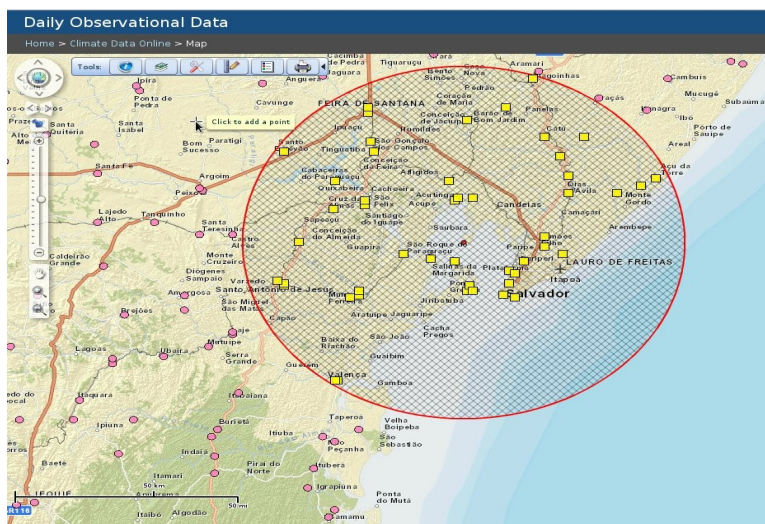
climáticas médias regionais. A Cordilheira dos Andes "apresenta-se como uma formidável barreira ao fluxo troposférico" e o Planalto Central é uma barreira na circulação de baixos níveis sobre a América do Sul subtropical. Em relação às precipitações na costa leste do continente Garreaud e Aceituno (2007) estabelecem como principal componente a intensa atividade convectiva que sustenta a floresta chuvosa na bacia Amazônica, o fenômeno ENSO (El Niño-Southern Oscillation) e a temperaturas anômalas de superfície sobre o Oceano Atlântico.

Figura 1: Composição colorida da BTS em Vermelho(Banda-3), Verde (Banda-2) e Azul (Banda-1) de imagens de satélite Landsat-5 obtidas com o software SPRING.



Para estudar o fenômeno da variabilidade das taxas de precipitação dados diários de precipitações foram "baixados" do National Climatic Data Center – NOAA (2014)¹. A Figura 2 resume as mais importantes estações meteorológicas no RB que foram estudadas neste trabalhos a partir dos dados obtidos no NOAA Data Center.

Figura 2: Mapa de estações meteorológicas do RB. Fonte: (NOAA 2014).



Outras importantes variáveis para o estudo da precipitação em termos regionais são o calor latente de superfície, a atividade convectiva que contribui para o desenvolvimento dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM's), a atividade das brisas marinhas em termos de transporte de umidade para o interior induzindo a formação de sistemas convectivos, as linhas de instabilidade tropical que atravessam o continente e a devida interação dos ventos alísios com as brisas marinhas. Estes processos foram estudados a partir de dados de reanálises obtidos do NCEP/NCAR (2014)².

1 NOAA. accessed September 26, 2014, <https://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo>.

2 NCEP/NCAR. accessed May 26, 2014, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/index.html>.

Uma importante observação é o típico processo de formação de nuvens nesta região. As esparsas nuvens stratus de baixa altitude na região do RB é uma formação de nuvens responsável por precipitações durante todo o ano com totais sempre menores que 50 mm por dia. Uma outra resposta destas formações são o controle da temperatura no ambiente regional e na humidade relativa com uma dispersão reduzida e médias estáveis em termos de um longo período de análise.

Este trabalho procurou determinar se existem variações no regime de precipitações na cidade de Salvador nos últimos 30 anos. Além disso estabelece alguns questionamento importantes sobre como se comporta a variabilidade da precipitação nos últimos 100 anos? É possível descrever com uma função de probabilidade simples para esta variabilidade da precipitação para o período que compreende esta análise? Uma extrapolação da distribuição aleatória de Poisson é possível para descrever estas variações no futuro? O foco é a cidade de Salvador e seu entorno o RB, com as possíveis extrapolações para a costa leste da América do Sul.

Metodologia ou Métodos Utilizados

Uma distribuição de probabilidade de Poisson foi aplicada aos dados de forma a entender sobre as variações nas três últimas décadas e compará-los com a evolução de todo o conjunto dedados observados. A função densidade de probabilidade da distribuição de Poissoné escrita para um parâmetro λ (lambda) para (λ>0) dada uma variável aleatória x = 0, 1, 2, ...crsecente até o infinito pela seguinte equação

$$\sum_{x=0}^{\infty} p(x; \lambda) = 1 \tag{equação (1)}$$

Geralmente, λ tem um valor dados por unidade de tempo e a letra e na função representa a base dos logarítmos naturais que é de aproximadamente 2,71828. Para todos os valores positivos de λ lambda existe uma probabilidade assciada p(x; λ) > 0 para todos os possíveis valores de x cuja soma de todas as probabilidades possíveis de eventos independentes deve ser igual a

$$\sum_{x=0}^{\infty} p(x; \lambda) = 1 \tag{equação (2)}$$

em que os momentos fatorias são geradores de funções discretas e em alguns casos eles simplificam a determinação do momento gerador da função. Para a distribuição de Poisson uma expansão da série de Maclurin

$$e^{\lambda} = 1 + \lambda + \frac{\lambda^2}{2!} + \frac{\lambda^3}{3!} + \dots = \sum_{x=0}^{\infty} \frac{\lambda^x}{x!} \tag{equação (3)}$$

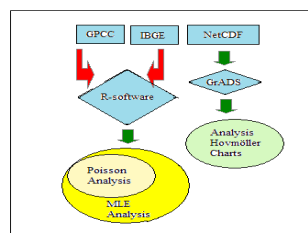
e o produto dos dois termos no lado esquerdo e direito da Equação 3 por e^{-λ} produz

$$1 = \sum_{x=0}^{\infty} e^{-\lambda} \frac{\lambda^x}{x!} \tag{equação (4)}$$

que define a função de densidade de probabilidade para todos os possíveis eventos independentes de forma que a soma de todas elas deverá produzir como resultado a unidade (Devore, 2006).

O esquema conceitual na Figura 3 mostra o fluxo de procedimentos visando a integração de dados, tratamento e análise final.

Figura 3: Esquema conceitual do fluxo de dados para as análises estatísticas.



Conjunto de dados de reanálises do NCEP/NCAR foram tratados no software GrADS (IGES, 2011) para a produção de imagens de pontos matriciais de forma a construir os gráficos de Hovmöller. Como exemplo, gráficos de Hovmöller (Hovmöller, 1949) foram construídos para três eventos extremos observados em Março de 1999, Março de 2005 e Maio de 2010 com o objetivo de entender a atividade contribuinte no desenvolvimento de CCM's tropicais. Estes estudos foram concentrados para o período do outono e as matrizes produzidas no software GrADS foram também estudadas no software R. A utilização de pacotes com a distribuição de Poisson no R-software possibilitou a comparação dos aspectos evolutivos das tempestades em termos dos dados de variáveis pertencentes ao sistema de reanálises do NCEP-NCAR com os dados obtidos de estações meteorológicas e disponibilizados pela NOAA (MEYER-CHRISTOFFER et al., 2014) cuja variável principal observada foi a precipitação diária das estações meteorológicas do RB.

O pacote relativo à distribuição de Poisson para tratamento de dados no software R é denominado *Poisson Binomial Distribution (poibin)* (Hong, 2012). Este pacote implementa métodos na forma exata e aproximada para o cálculo da função de distribuição acumulada, permite cálculos probabilísticos utilizando a função densidade de Poisson e gera número aleatórios para a distribuição de Poisson na forma binomial. Dados mais recentes compreendendo o período de 1978 a 2014 foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014) este dados formaram uma base para o desenvolvimento de uma estatística mais atual do fenômeno sob observação.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra o número de eventos de chuva superiores a 50 mm compreendendo o período entre 1978 a 2014 para dados adquiridos de estações meteorológicas na cidade de Salvador. Nessa tabela é possível observar falhas compreendendo os períodos entre 1981 a 1985, e o ano de 1989. Pode observar ainda 3 anos com precipitações inferiores a 50 mm por dia 1980, 1992 and 2001 cujos valores são estatisticamente nulos.

Tabela 1: Número de eventos superiores a 50 mm para o período entre 1978 a 2014.³

ano	1978	1979	1980	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
eventos	5	2	0	5	1	4	-	2	2	0	1
ano	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
eventos	4	3	6	2	1	6	1	0	2	4	3
ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
eventos	6	7	1	1	8	4	3	1	2	1	11

A Figura 4 mostra uma visão paramétrica dos dados observados para o período de 1978 a 2014 na forma de um histograma de frequências com média e desvio padrão desta amostra e a resposta da utilização da função *poibin* com o software R de forma comparativa. Os dados da amostra para este período permitiram o cálculo da média e do desvio padrão para a distribuição de Poisson. O gráfico do período de análise para a distribuição de Poisson com o ajuste da função *poibin* foi construído em forma a obter um histograma de frequências observadas e estimadas de forma comparativa.

Os diagramas de Hovmöller foram realizados utilizando o software GrADS software (IGES, 2011) para três eventos com características semelhantes de eventos extremos. Estes eventos ocorreram em Março de 1999, Março de 2005 e Maio de 2012. Como característica destes eventos tiveram tempestades severas com mais de 150 mm/dia e concentrado em um número pequeno de dias observados. Uma diferença encontrada neste eventos extremos é de que os eventos ocorridos em Março de 1999 e 2005 foram caracterizados por chuvas de moderada intensidade durante todo o outono com intensidades de até 50 mm/dia em toda a estação, enquanto que o evento de Maio de 2012, mais intenso que os dois primeiros, teve escassez de chuvas de moderada intensidade durante toda a estação do outono.

A Figura 5 mostra o diagrama de Hovmöller para o evento de Maio de 2012. Em azul nos temos um cavado e em amarelo e vermelho cristas. No centro do diagrama está Salvador latitude 12.5° aproximadamente. Na figura pode se ver uma onda progressiva em azul na direção da cota leste da América do Sul proveniente do Sul da África. Esta mesma formação pode ser observada em outros eventos de extrema magnitude para esta latitude a partir de dados de reanálises do NCEP/NCAR (2014) para o Atlântico Sul.

3. Dados obtidos do INMET (2014).

Figura 4 : Valores estimados de ocorrência de chuvas superiores a 50 mm por dia para o outono (MAM) no Recôncavo Baiano.

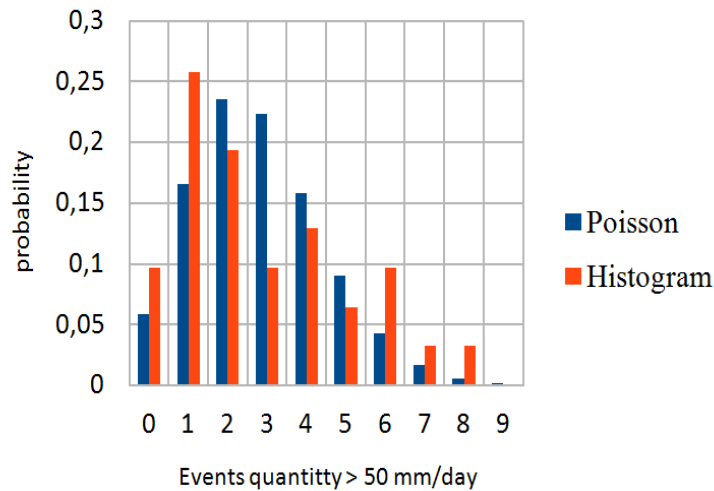
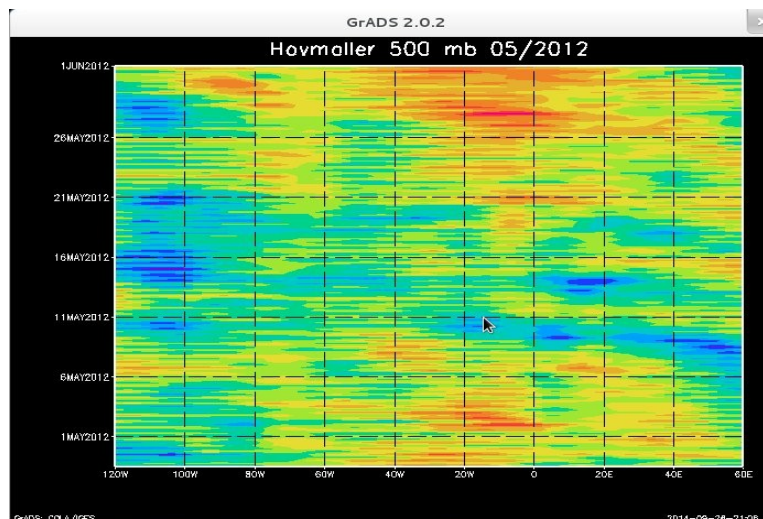


Figura 5: Diagrama de Hovmöller de evento extremo em maio de 2012 no RB.



Para os três eventos estudados foi observada a mesma característica no diagrama de Hovmöller uma linha contínua (azul) sobre a atmosfera oceânica proveniente da costa sudoeste do continente africano em direção à costa leste da América do Sul e na forma de um cavado crescente formando uma frente entre as longitudes de 60° E e 40° W. Esta frente pode ser vista no diagrama como uma longa onda na cor azul e o gradiente de dispersão desta onda no tempo durante o evento extremo é visto na variação de cor entre o azul para o vermelho em relação à progressão temporal. Este fenômeno tem duração de aproximadamente 5 dias entre o seu início na África e o seu fim no Recôncavo Baiano. Se as condições atmosféricas no Recôncavo Baiano são favoráveis à presença de efeito estufa, os vórtices associados com pressões na formação de cavados e cristas em níveis elevados de 500 mb de pressão produzirão uma forte convecção e formação de nuvens com eventos extremos de chuva.

Conclusão

Uma análise dos dados observados para o período de 1978 a 2014 com média e desvio padrão mostra um aumento à tendência de tempestades com precipitação superior a 50 mm/dia. Esta amostra, em comparação a todos os dados observados para o período de 1912 a 2014, mostra que ocorreu uma modificação na forma e no número de tempestades. No passado existiram um número muito maior de chuvas de baixa e moderada intensidade distribuídas na estação mais chuvosa que nas últimas duas décadas. Uma outra observação é um aumento no número de dias sem chuvas no outono, ou uma associação de poucos dias chuvosos em curtos períodos com eventos extremos de tempestades principalmente nas duas últimas décadas.

A formação de ondas frontais de mais elevada magnitude estão associadas com níveis mais elevados de pressão cuja extensão do fenômeno compreende desde a costa oeste da África à costa leste da América do Sul. Os diagramas de Hovmöller construídos para associar as pressões em altos níveis a 500 mb de altura geopotenciais mostrou que os eventos extremos no Recôncavo Baiano e na costa nordeste da América do Sul são influenciados e podem ser intensificados pela associação de vórtices ciclones em altos níveis e efeito estufa em baixos níveis na atmosfera produzindo fortes tempestades de curta duração e alta intensidade.

Uma estimativa do fator λ como de máxima verossimilhança de uma distribuição de Poisson utilizando o pacote *fitdistrplus* no software R permitiu entender que tempestades de elevada magnitude com fortes chuvas teve um aumento e a esperança associada a estes eventos em termos numéricos deve ser igual a 4 a 5 na estação de outono em termos aproximados. Esta tendência pode ser observada pela análise do histograma que mostra a formação de um pequeno segmento bimodal para os dados observados para as últimas décadas.

Referências

- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling" *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun, 1996.
- DEVORE, J.L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências / Jay L. Devore; [tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva]. São Paulo: Thomson Learning, 2006.
- DSA. 2012 . Divisão de Satélites Ambientais. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. [on line] http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/ Acesso: 30 mai. 2012.
- GARREAU, R.D.; ACEITUNO, P. "Atmospheric Circulation and Climatic Variability." In *The Physical Geography of South America*, edited by Thomas T. Veblen, Kenneth R. Young, Antony R. Orme, 45-59. New York: Oxford University Press, 2007.
- HONG, Y. On computing the distribution function for the Poisson binomial distribution. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2012. Available online, <http://dx.doi.org/10.1016/j.csda.2012.10.006>.
- HOVMÖLLER, E. The Trough-and-Ridge diagram *Tellus* 1(2):62--66 ,1949.
- IGES. "The Grid Analysis and Display System (GrADS) Version 2.0." Copyright (C) 1988-2011 by Brian Doty and the Institute of Global Environment and Society (IGES). Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies (COLA). Calverton: COLA/IGES, 2011.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Brasil. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf. Acesso em: 14 set. 2014.
- MEYER-CHRISTOFFER, A.; BECKER, A.; FINGER, P.; RUDOFF, B.; SCHNEIDER, U.; ZIESE, M. GPCC Climatology Version 2011 (at 0.25°, 0.5°, 1.0°, 2.5°): Monthly Land-Surface Precipitation Climatology for Every Month and the Total Year from Rain-Gauges built on GTS- based and Historic Data. Disponível em: <http://gpcc.dwd.de>. Acesso: 14 set. 2014.
- NCEP/NCAR. U.S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. Earth System Research Laboratory Physical Sciences Division Disponível em: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/index.html>. Acesso: 02 mai. 2014.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Climatic Data Center (NCDC). Daily observation data. Disponível em: <https://gis.ncdc.noaa.gov/map/viewer/#app=cdo>. Acesso em: 26 set. 2014.