

TENDÊNCIAS DAS CLASSES DE PRECIPITAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

CLEBSON DO CARMO RAIMUNDO¹; CLÓVIS ANGELI SANSIGOLO²; LUIZ CARLOS BALDICERO MOLION³

¹Universidade Federal do Ceará (UFCE), Fortaleza, CE, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil

³Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, AL, Brasil

cleber.raimundo@yahoo.com.br, clovis.sansigolo@cptec.inpe.br, lcmolion@gmail.com

Recebido Maio de 2013 - Aceito Novembro de 2013

RESUMO

Analisam-se as tendências anuais e de verão das classes de totais de precipitação leve, moderada e intensa em 21 estações pluviométricas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) com séries de dados de comprimentos variáveis no período de 1888 a 2004. Testes de Mann-Kendall são usados para evidenciar as possíveis tendências que, quando significativas, são ajustadas por regressão linear simples. São constatadas tendências positivas nos totais anuais em 9 estações na área central da RMSP, mas somente em 4 delas no verão. Tendência significativa de aumento na frequência de eventos de precipitação leve no período anual (verão) são evidentes em 9 (8) das estações analisadas e 4 (6), dentre essas, apresentam tendência de diminuição desses eventos. Na classe de precipitação moderada, 3 estações apresentam tendências anuais de aumento e uma de decréscimo. Considerado somente o período de verão, 5 apresentam tendências significativas de decréscimo e somente uma de aumento. Em relação aos casos anuais de precipitações severas, 4 estações apresentam tendências significativas de acréscimo e uma de decréscimo mas, no verão, apenas 2 apresentam tendência significativa de decréscimo.

Palavras-chave: tendência, classes de precipitação, Região Metropolitana de São Paulo.

ABSTRACT: TRENDS OF RAINFALL CLASSES IN THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO

Trends of the annual and summer rainfall totals of 21 rain gauges located in the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) are analyzed using three rainfall classes: drizzle, moderate and intense. The rainfall data series are variable in time length within the period 1888 to 2004. Mann-Kendall tests are used to highlight the possible trends that are fitted by simple linear regression when they are statistically significant. Positive trends are found in the annual totals of 9 stations in the MRSP central area, but only 3 of them occurred in the summer period. Significant increasing (decreasing) trends in the frequency of drizzle events in the annual (summer) period are evident in 9 (8) of the gauges analyzed and, in 4 (6) of them, the drizzle frequency decreases. Regarding the moderate annual rainfall class, 3 gauges show increasing trend whereas one presents decreasing trend. However, considering only the summer season, 5 gauges show significant decreasing trend and only in one of them the trend is increasing. With respect to the severe annual rainfall events, 4 stations present significant increasing trend and only in one of them trend appears to be declining. When summer season is considered, only 2 gauges present significant decreasing trend.

Keywords: Trend, rainfall classes, São Paulo Metropolitan Region.

1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos detectaram nos últimos 50 anos um aumento na intensidade e na frequência de dias chuvosos na América do Sul, incluindo as regiões sul e sudeste do Brasil (Liebmann et al., 2004, Alexander et al., 2006, Haylock et al., 2006, Magrin et al., 2007).

Liebmann et al. (2004) mostraram que a região centro-sul do Brasil apresentou entre 1976 e 99, tendências lineares significativas de acréscimo nas precipitações de verão (7,5mm/verão), e também positivas, mas muito menores (2,7mm/verão) entre 1948 e 75. Eles atribuíram este acréscimo nas precipitações a um aumento no número de dias chuvosos, associados a um aumento nas temperaturas da superfície do Atlântico adjacente. Observa-se que estes dois períodos analisados 1976-99 e 1948-75 são, respectivamente, coincidentes com uma fase quente e outra fria da Oscilação Decenal do Pacífico (ODP).

Carvalho et al. (2002, 2004) verificaram que eventos extremos de precipitação no Estado de São Paulo estão associados com a intensidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e com a atividade convectiva ligada à Oscilação de Madden-Julian (OMJ). Eles também observaram que eventos de precipitação extrema no sudeste do Brasil exibem uma variabilidade interanual relacionada à forçantes de grande escala, com mais eventos extremos em condições de El Niño em relação à La Niña.

A frequência e a intensidade das precipitações no sul e sudeste do Brasil, principalmente as severas e extremas, são também influenciadas pelas temperaturas da superfície do oceano Pacífico nas escalas interanual e decenal. O El Niño/Oscilação Sul (ENOS) é o modo dominante de variabilidade climática interanual global, que por sua vez está associado com a ODP. Geralmente, as fases positivas ou quentes da ODP (1925-46 e 1977-98) estão associadas com uma maior frequência de eventos El Niño e precipitações intensas na região, enquanto as negativas ou frias (1889-1924 e 1947-76) com mais ocorrências de La Niñas e precipitações escassas (Molion, 2005). No Estado de São Paulo, a variabilidade interanual das precipitações associadas ao ENSO não apresenta um sinal bem definido (Coelho et al., 2002).

Haylock et al (2006), baseado em dados diários de precipitação de 40 anos (1960-99) constataram um aumento na frequência e na intensidade de dias chuvosos no sudeste da América do Sul. Esta tendência estaria associada com uma mudança para condições dominadas por El Niños .

Dufek e Ambrizzi (2008) analisando dados diários de precipitação em 59 estações no Estado de São Paulo entre 1950 e 99, observaram um aumento significativo nos totais anuais, que estariam associados com um aumento nas ocorrências precipitações superiores a 20mm/dia e nos superiores correspondentes ao percentil 95.

O aumento dos extremos de chuva nas décadas recentes também pode estar ligado ao processo de urbanização e geração de ilha de calor. Pereira et al. (2004) e Xavier et al. (1994) mostraram que as precipitações de verão estão cada vez mais intensas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), devido à efeitos da ilha de calor urbana associada à circulação da brisa marítima. Xavier et al. (1994) constataram no período de 1933 a 86, um aumento nas precipitações mais intensas em fevereiro e maio e uma redução nas precipitações inferiores a 5mm/dia no ano todo.

Numa análise decenal de extremos de chuva para a estação do IAG/USP, entre 1933 e 2010, Nobre et al. (2011) constataram um aumento de 40% nos casos de precipitação superior a 30mm/dia, além de um aumento na frequência decenal de 9 (1933-40) para 40 (2000-2009) nos eventos de precipitação superior a 50mm/dia. Já as precipitações inferiores a 1 mm/dia (garoa) apresentaram uma diminuição, especialmente nos últimos 20 anos, enquanto as superiores um incremento constante.

O acelerado crescimento da população, associado à falta de planejamento urbano e de infraestrutura tem levado os habitantes da maior região metropolitana da América do Sul a uma maior vulnerabilidade às tragédias causadas pelas precipitações. Portanto, é de grande relevância um amplo estudo de tendências das precipitações, principalmente as severas e extremas, para fins de planejamento urbano e implementação de medidas para conter e/ou amenizar seus efeitos.

O objetivo deste trabalho é uma análise detalhada das tendências anuais e de verão das frequências das classes de precipitação: chuva leve (0 - 5 mm/dia), moderada (10 - 30 mm/dia) e severa (> 30 mm/dia) em 21 estações na Região Metropolitana de São Paulo.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 Dados

O trabalho foi realizado sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) mostrada na Figura 1. A RMSP possui um área de 7944 Km² e reúne 39 municípios de São Paulo, sob intenso processo de urbanização.

Foram utilizadas as séries históricas diárias de precipitação de 21 estações pluviométricas distribuídas na RMSP, cujas coordenadas e períodos encontram-se na Tabela 1. Estes dados foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas (ANA), no site <http://hidroweb.ana.gov.br>.

2.2 Metodologia

Para análise do comportamento anual das classes de precipitação, foi considerado o ano hidrológico (agosto a julho),

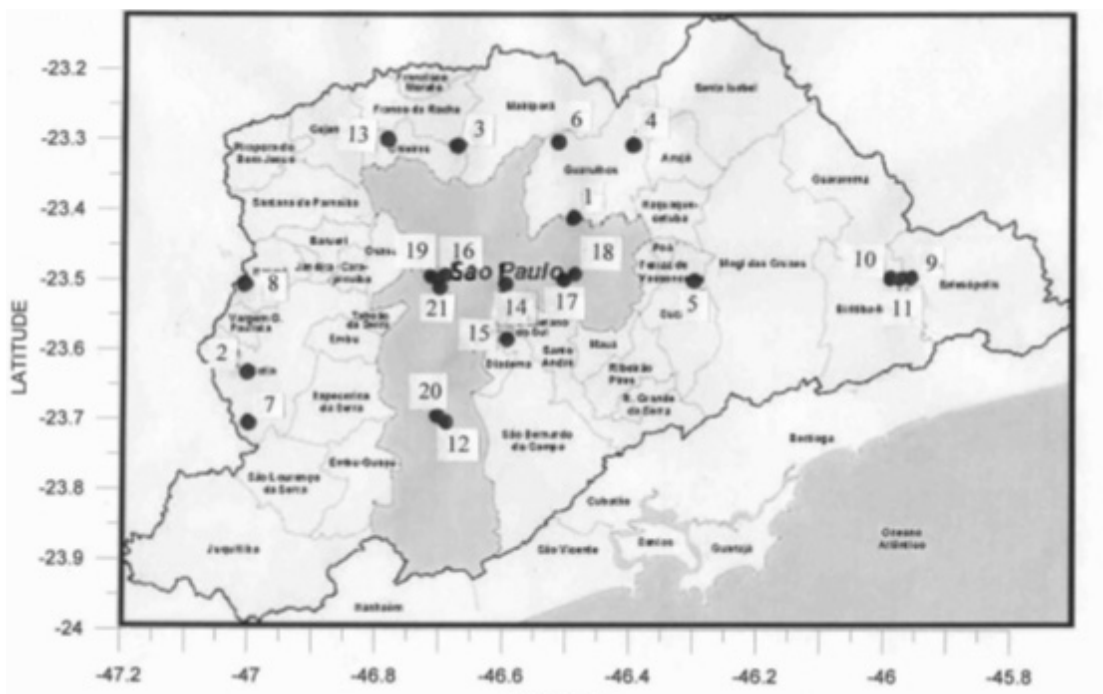


Figura 1 - Distribuição das 21 estações pluviométricas na Região Metropolitana de São Paulo.

para incluir toda a estação chuvosa, que na região sudeste vai de setembro a março. Em relação ao comportamento sazonal, foram considerados os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, que compõem o trimestre mais chuvoso na região. Os dados correspondentes às séries de precipitação não dispunham de continuidade nas séries até os anos atuais, por isso hoje não é possível atualizar a pesquisa até os anos mais recentes, ressaltando ainda, que algumas estações não existem mais depois do período de 2004.

As precipitações diárias das 21 estações foram classificadas em 3 categorias: chuva leve, com totais entre 0,1 e 5mm/dia, moderada, com totais entre 10 e 30mm/dia e severas ou intensas, com totais superiores a 30mm/dia. Para cada ano hidrológico e período de verão, foram computados os números de casos em cada uma destas 3 categorias de precipitação consideradas. Estas séries anuais e sazonais do número de eventos de chuva leve, de precipitações moderadas e de intensas, foram submetidas a testes de tendência de Mann-Kendall, considerado como um dos mais apropriados para detecção de tendências climáticas (Goossens e Berger, 1986).

O teste de Mann-Kendall (MK) consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes na sua ordem sequencial. Ele é baseado na distribuição normal reduzida z da variável t , que é o somatório dos casos precedentes na série que lhe são inferiores:

$$z(t) = (t - E(t)) / \sqrt{\text{var}(t)} \quad (1)$$

na qual a esperança matemática $E(t)$ e a variância $\text{var}(t)$ são, segundo Sneyers (1975), dadas por:

$$E(t) = n(n-1) / 4 \quad (2)$$

$$\text{var}(t) = n(n-1)(2n+5) / 72 \quad (3)$$

O teste MK também permite identificar o sentido da tendência através do sinal de $z(t)$ e seu início, através de sua aplicação progressiva, como mostrado em Sneyers (1975). Para as séries com tendências significativas no nível de confiança adotado (95%, com $|z| > 1,96$), foram obtidas suas tendências lineares usando regressão pelo método dos quadrados mínimos.

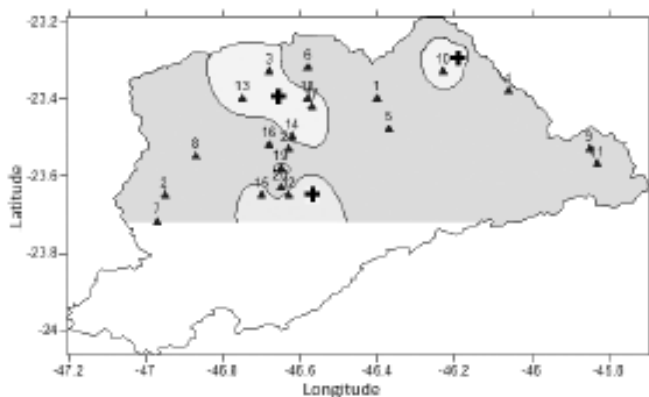
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de tendência para os totais anuais e de verão nas 21 estações da RMSP encontram-se na Tabela 2. Nas Tabelas 2, 3 e 4 foram mostrados apenas os valores dos coeficientes da reta de regressão linear para os dados das estações que representaram tendências estatísticas significativas, e os que não foram mostrados estarão representados por um traço (-).

Para os totais anuais, considerando o ano hidrológico, os resultados dos testes MK mostraram que 9 das 21 estações consideradas apresentaram tendência significativa de acréscimo, a maioria localizada na área central e um pequeno grupo mais à norte (Figura 2).

Tabela 1 - Localização espacial e geográfica, período e falhas das estações pluviométricas da RMSP.

| N ^o | Estação/Município | lat. | lon. | alt.(m) | período | Falhas |
|----------------|----------------------------|----------------------|----------------------|---------|-----------|--|
| 1 | Bom Sucesso-Guarulhos | -23 ^o 25' | -46 ^o 24' | 770 | 1940-2004 | - |
| 2 | Cachoeira da Graça-Cotia | -23 ^o 39' | -46 ^o 57' | 880 | 1935-2004 | - |
| 3 | Franco da Rocha (hospital) | -23 ^o 20' | -46 ^o 41' | 740 | 1937-2004 | - |
| 4 | Guararema | -23 ^o 23' | -46 ^o 40' | 580 | 1943-2004 | - |
| 5 | M.Belo-Itaquaquecetuba | -23 ^o 29' | -46 ^o 22' | 790 | 1943-2004 | - |
| 6 | Mairiporã | -23 ^o 19' | -46 ^o 35' | 800 | 1937-1998 | 1997/1998 |
| 7 | Pedro Beicht-Cotia | -23 ^o 43' | -46 ^o 58' | 920 | 1936-2004 | - |
| 8 | Baixo Cotia-Barueri | -23 ^o 33' | -46 ^o 52' | 730 | 1937-2004 | 1949/1950 1950/1951 |
| 9 | Salesópolis | -23 ^o 32' | -45 ^o 51' | 770 | 1927-2004 | - |
| 10 | Santa Isabel | -23 ^o 34' | -46 ^o 14' | 690 | 1937-2004 | 1938/1939 1939/1940 1950/1951 1951/1952 |
| 11 | Salesópolis (Usina) | -23 ^o 34' | -45 ^o 50' | 790 | 1928-2003 | - |
| 12 | Observatório do IAG- SP | -23 ^o 39' | -46 ^o 38' | 780 | 1933-2004 | - |
| 13 | Perus-SP | -23 ^o 24' | -46 ^o 45' | 840 | 1938-1998 | 1948/1949 1949/1950 1997/1998 |
| 14 | Santana-SP | -23 ^o 30' | -46 ^o 37' | 760 | 1936-2004 | - |
| 15 | Santo Amaro-SP | -23 ^o 39' | -46 ^o 42' | 764 | 1936-2002 | - |
| 16 | Água Branca-SP | -23 ^o 31' | -46 ^o 41' | 730 | 1937-2004 | 1981/1982 1997/1998 |
| 17 | Barrocada-SP | -23 ^o 25' | -46 ^o 34' | 760 | 1941-1998 | - |
| 18 | Engordador-SP | -23 ^o 24' | -46 ^o 35' | 800 | 1941-1998 | 1997/1998 |
| 19 | Instituto Biológico-SP | -23 ^o 35' | -46 ^o 39' | 760 | 1943-2003 | 1962/1963 1963/1964 1964/1965 1965/1966 |
| 20 | Congonhas (aeroporto) -SP | -23 ^o 38' | -46 ^o 39' | 800 | 1946-2003 | - |
| 21 | Estação da Luz-SP | -23 ^o 32' | -46 ^o 38' | 730 | 1888-2004 | 1978/1979 |



- + Região com acréscimo
- Região normal sem tendência

Figura 2 - Localização espacial das regiões com tendências significativas para os totais anuais.

Um destaque foi observado na região central, em relação à série da Estação da Luz (#21), que nos 107 anos de observações não apresentou tendência significativa. Já a estação do IAG/USP, na Água Funda (#12) apresentou uma tendência linear significativa crescente, de 4,56 mm/ano, mostrada na Figura 3.

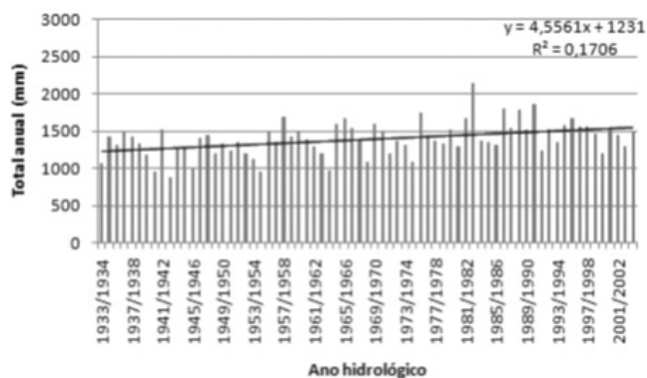
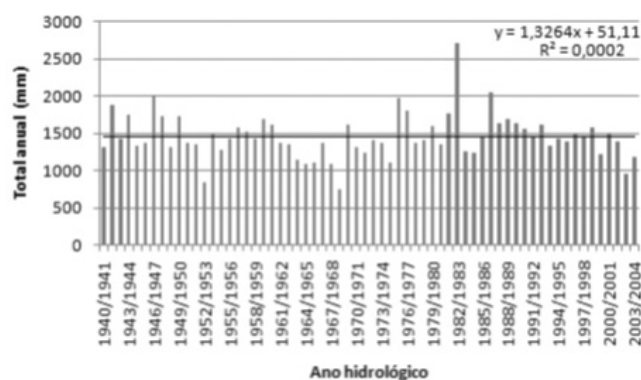
Pode-se observar na Figura 3 um leve incremento nos totais a partir do ano de 1976, período de transição da fase fria da ODP para a sua fase quente. Muitas outras estações também apresentaram esta mesma tendência nos seus totais anuais neste mesmo período, quando comparado ao anterior, à fase fria da ODP (1947 a 1976).

No ano hidrológico de 1982/83, quando ocorreu um forte El-Niño, foram registrados os maiores acúmulos em quase todas as estações da região. Como exemplo, a estação de Guarulhos (#1), mostrada na Figura 4, totalizou mais de 2500 mm. Mas os eventos de El-Niño não são os principais responsáveis pelo aumento nos totais acumulados na região. Em 1982/83, por exemplo, o mecanismo associado a estes elevados volumes

Tabela 2 - Resultados dos testes de tendência de Mann-Kendall e coeficientes da reta de regressão linear para os totais anuais e sazonais de verão (DJF).

| Nº | Localidade | MK | Coef. | MK | Coef. |
|----|---------------------|-------------|----------|--------|-----------|
| | | Total anual | (mm/ano) | Verão | (mm/trim) |
| 1 | Guarulhos | -0,197 | - | -1,309 | - |
| 2 | C.G.-Cotia | 0,549 | - | 0,000 | - |
| 3 | Franco da Rocha | 3,858* | 6,16 | 2,051* | - |
| 4 | Guararema | -0,149 | - | -0,635 | - |
| 5 | Itaquaquecetuba | 1,294 | - | 0,187 | - |
| 6 | Mairiporã | 0,847 | - | 0,585 | - |
| 7 | P.Beicht-Cotia | 0,847 | - | 0,423 | - |
| 8 | Barueri | 0,547 | - | 1,315 | - |
| 9 | Salesópolis | 0,695 | - | 0,440 | - |
| 10 | Santa Isabel | 2,592* | 10,80 | 1,088 | - |
| 11 | Salesópolis (Usina) | 1,651 | 2,58 | 0,270 | - |
| 12 | IAG | 3,231* | 4,56 | 2,914* | 2,18 |
| 13 | Perus | 3,041* | 9,11 | 1,607 | - |
| 14 | Santana | 2,446* | 4,94 | 1,196 | - |
| 15 | Santo Amaro | 3,016* | 5,54 | 2,773* | 2,88 |
| 16 | Água Branca | 1,185 | - | 0,860 | - |
| 17 | Barrocada | 1,996* | 8,90 | 0,867 | - |
| 18 | Engordador | 2,809* | 3,11 | 0,537 | - |
| 19 | I. Biológico | 4,388* | 11,09 | 3,508* | 5,04 |
| 20 | Congonhas | 0,922 | - | 0,496 | - |
| 21 | Estação da Luz | 1,198 | - | 1,479 | - |

*Valores significativos a 5% , + de aumento e - diminuição.

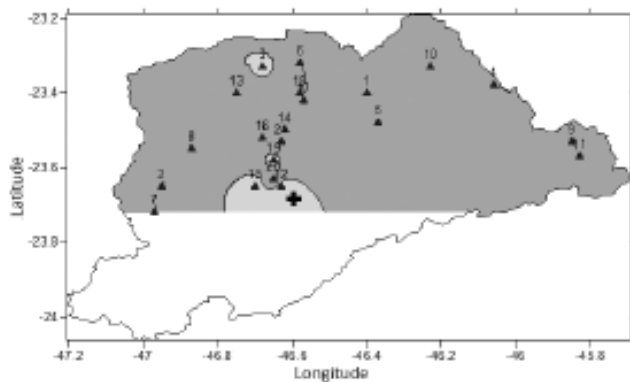
**Figura 3** - Totais de precipitação no ano hidrológico na estação do IAG/USP (#12), assim como sua tendência linear significativa de acréscimo.**Figura 4** - Totais de precipitação no ano hidrológico na estação de Guarulhos (#1).

de precipitação foi um bloqueio atmosférico provocado pela influência da Alta da Bolívia sobre a região.

Em relação aos totais sazonais de verão, também mostrados na Tabela 2, apenas 4 estações, como visto na Figura 5, apresentaram tendência crescente significativa: Santo Amaro (#15), tendência de acréscimo mostrada na Figura 6, IAG (#12) e Instituto Biológico (#19) na região central, e Franco da Rocha (#3) ao norte. Muitas outras estações também apresentaram

leves tendências de aumento, no entanto, não significativas pelo teste de MK, como a de Pedro Beicht em Cotia (#7), mostrada na Figura 7.

Os resultados da Tabela 2 relativos às estações do IAG (#12) e Estação da Luz (#21), comprovam os obtidos por Xavier et al. (1992) mencionando uma fraca tendência positiva na estação do IAG no período mais chuvoso do ano. Já para Estação da Luz não foi encontrada qualquer tendência significativa.



- + Região com acréscimo
- Região normal sem tendência

Figura 5 - TLocalização espacial das regiões com tendências significativas para os totais sazonais de verão.

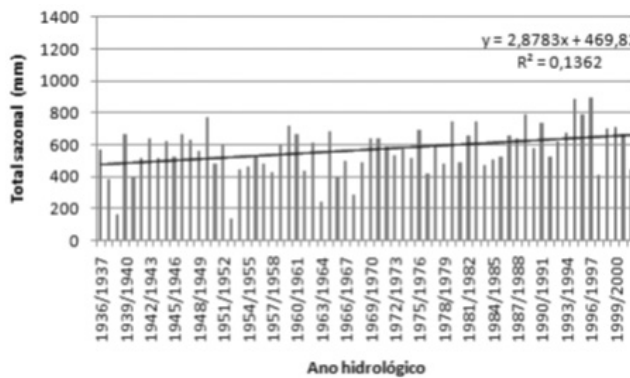


Figura 6 - Totais sazonais de verão (DJF) na estação de Santo Amaro (#15), assim como sua tendência linear significativa de acréscimo.

Estes resultados também concordam com os Monteiro (1986), mostrando que não são suficientemente claros os sinais de aumento das precipitações na RMSP, especialmente em termos de totais anuais, mas às vezes sim em termos de aguaceiros episódicos de verão.

Como foram constatadas tendências crescentes significativas num maior número de estações relativos aos seus totais anuais, quando comparados aos de verão, conclui-se que nem sempre o período mais chuvoso é o mais representativo das precipitações que geram as maiores acumulações. As estações de Santo Amaro (#15), IAG (#12) e Instituto Biológico (#19) na região central, e Franco da Rocha (#3), na região mais ao norte, apresentaram tendências crescentes significativas, tanto para o período anual, quanto para o período sazonal de verão (Tabela 2). Por situarem numa região que sofre influência das maiores temperaturas da RMSP, as precipitações convectivas tornam-se mais acentuadas, já

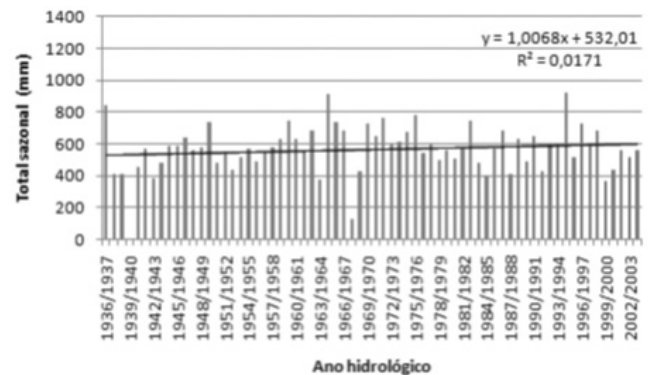


Figura 7 - Totais de precipitação no ano hidrológico na estação de Pedro Beicht, Cotia (#7), assim como sua tendência linear não significativa.

que os ventos de sudeste transportam os aerossóis produzidos pelas indústrias da região do ABC paulista na direção central da metrópole, também contribuindo assim para formação de nuvens cumulonimbus e com o aumento das precipitações ao longo do ano, principalmente no verão, onde a incidência de radiação solar e o transporte de poluentes tornam a região central mais quente do que a periferia.

Nestes casos, foram as precipitações de verão as que mais contribuíram para os totais anuais. Este aumento nas precipitações de verão pode estar associado ao aquecimento urbano, que aliado à topografia leva a uma maior atuação e intensificação do sistema de brisas nesta época do ano. Nobre et al. (2011) também encontrou em várias estações da RMSP tendências positivas nos casos de precipitação acumulada de 50-100mm em 2-3 dias, reforçando a contribuição dessas precipitações de verão para os totais anuais. A provável causa desse aumento nos extremos de chuva nas décadas recentes estaria, provavelmente, ligada ao processo de urbanização e geração da ilha de calor urbana, como constatado por Xavier et al. (1994) e Pereira et al. (2004), que mostraram que as chuvas de verão mais intensas na RMSP ocorrem devido aos efeitos combinados da ilha de calor urbana com a circulação de brisa marítima.

Os resultados dos testes MK e as tendências lineares significativas para o número de casos de chuva leve, precipitações moderadas e severas, no ano hidrológico, nas 21 estações da RMSP, encontram-se na Tabela 3.

Nove estações, das 21 mostradas na Tabela 3, apresentaram tendências crescentes significativas e outras 4 apresentaram tendências decrescentes significativas no número anual de casos de chuva leve, como a do IAG/USP (#12). Já outras estações, como as do lado leste, nordeste e norte da RMSP, apresentaram tendências positivas nas precipitações entre 0,1 e 5 mm/dia, como mostradas na Figura 8.

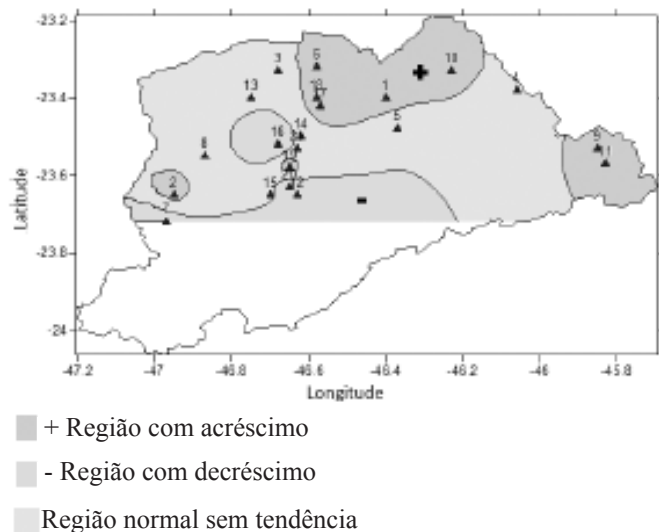


Figura 8 - Localização espacial das regiões com tendências significativas no número anual de casos de chuva leve.

Analisando a estação de Pedro Beicht (#7), no município de Cotia, verifica-se que foi a que apresentou o maior número anual de eventos (182), mas apesar desta quantidade expressiva, ela apresentou uma tendência decrescente significativa (Figura 9). Já a estação de Baixo Cotia (#8), no município de Barueri, apresentou uma tendência linear crescente, mostrada na Figura 10, mas não significativa pelo teste MK.

Em relação ao número anual de eventos moderados na metrópole, os resultados dos testes MK mostrados na Tabela 3, indicaram tendências significativas e de acréscimo em apenas 4 estações (Figura 11): três na região central (IAG (#12), mostrando tendência linear significativa de acréscimo, como visto na Figura 12, Instituto Biológico (#19), e Estação da Luz (#21)) e uma ao norte (Franco da Rocha (#3)). Apenas a Estação da Luz (#21) apresentou uma tendência decrescente significativa (Figura 11).

Para a classe de precipitações severas (> 30 mm/dia) no ano hidrológico, verifica-se na Tabela 3 que apenas 4 estações apresentam tendências crescentes significativas: Franco da Rocha (#3) ao norte, Santa Isabel (#10) a nordeste, e IAG (#12)

Tabela 3 - Resultados dos testes de tendência de Mann-Kendall e coeficientes da reta de regressão linear para o número anual de eventos nas classes de precipitação: chuva leve, moderada e severa.

| N ^o | Localidade | Classe de precipitação | | | | | |
|----------------|---------------------|------------------------|-------|----------|-------|---------|-------|
| | | chuva leve | | moderada | | intensa | |
| | | MK | Coef. | MK | Coef. | MK | Coef. |
| 1 | Guarulhos | 3,071* | 1,33 | 0,649 | - | -2,908* | -0,05 |
| 2 | C.G-Cotia | 3,740* | 0,81 | -1,430 | - | -0,207 | - |
| 3 | Franco da Rocha | -0,373 | - | 2,051* | 0,09 | 2,018* | 0,07 |
| 4 | Guararema | 1,842 | - | -1,369 | - | -0,809 | - |
| 5 | Itaquaquecetuba | 1,021 | - | 0,398 | - | 0,460 | - |
| 6 | Mairiporã | 2,178* | 0,91 | -1,357 | - | 1,469 | - |
| 7 | P. Beicht-Cotia | -3,007* | -0,70 | 0,381 | - | -0,730 | - |
| 8 | Barueri | 1,726 | - | -0,211 | - | -1,283 | - |
| 9 | Salesópolis | 8,049* | 1,41 | -1,067 | - | -0,194 | - |
| 10 | Santa Isabel | 5,125* | 1,46 | 0,676 | - | 2,040* | 0,14 |
| 11 | Salesópolis (usina) | 4,085* | 0,38 | 0,691 | - | 0,288 | - |
| 12 | IAG | -6,011* | -1,35 | 2,288* | 0,11 | 2,487* | 0,07 |
| 13 | Perus | 2,615 | - | -0,663 | - | 1,097 | - |
| 14 | Santana | 0,396 | - | -1,387 | - | 1,757 | - |
| 15 | Santo Amaro | 0,017 | - | 1,677 | - | 1,101 | - |
| 16 | Água Branca | -4,205* | -0,60 | -0,590 | - | 0,179 | - |
| 17 | Barrocada | 6,251* | 3,15 | 1,239 | - | -0,289 | - |
| 18 | Engordador | 3,414* | 1,52 | 1,459 | - | -0,014 | - |
| 19 | I. Biológico | 4,031* | -1,06 | 2,475* | 0,23 | 2,143* | 0,12 |
| 20 | Congonhas | -5,135* | -0,71 | 0,275 | - | 1,432 | - |
| 21 | Estação da Luz | 1,341 | - | -2,482* | -0,07 | 0,262 | - |

*Valores significativos a 5%, + aumento e - diminuição

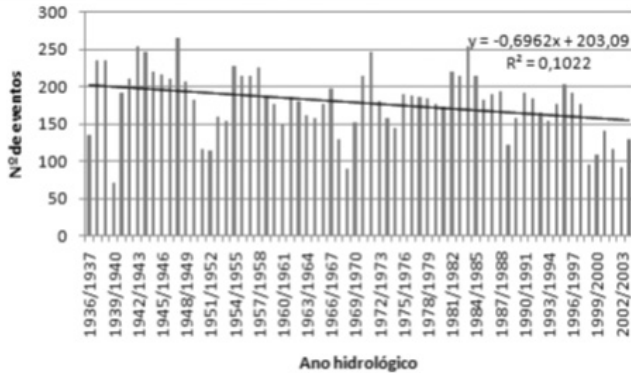


Figura 9 - Número anual de caso de chuva leve, assim com sua tendência linear significativa na estação de Pedro Beicht, em Cotia.

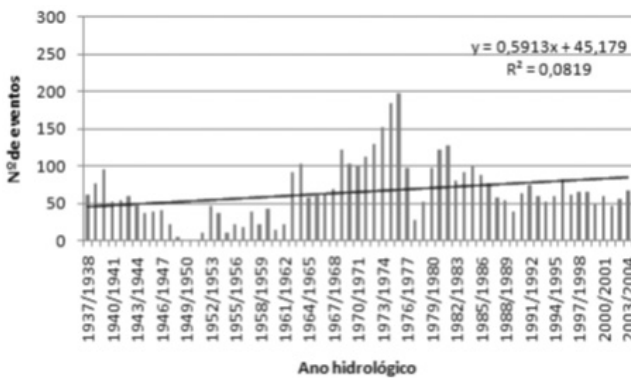


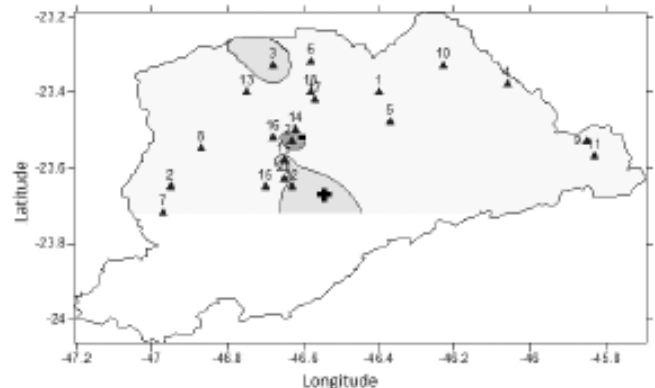
Figura 10 - TNúmero anual de casos de chuva leve, assim com sua tendência linear, não significativa, para a estação de Baixo Cotia, em Barueri.

e Instituto Biológico (#19) na área central, como mostrado na Figura 13. O mesmo foi constatado por Nobre et al. (2011) numa análise decenal para a estação do IAG/USP, onde se notou um aumento na frequência de dias com precipitações entre 25 - 50 mm e superiores a 50 mm, particularmente nas três últimas décadas.

A estação de Guarulhos (#1), visto na Figura 13, foi a única que apresentou tendência decrescente significativa, sendo mostrada sua linha de tendência de decréscimo na Figura 14. As estações de Engordador e Cachoeira da Graça apresentaram tendência decrescente, porém não significativa. Resultado similares também foram encontrados para precipitações superiores a 50 mm nas estações de Engordador e Cachoeira da Graça por Nobre et al. (2011).

Os resultados dos testes de MK e as tendências lineares significativas para o número de casos de chuva leve, precipitações moderadas e severas, no período de verão, nas 21 estações da RMSP, encontram-se na Tabela 4.

Na classe chuva leve, observaram-se tendências crescentes significativas em 9 estações e decrescentes



+ Região com acréscimo
 - Região com decréscimo
 Região normal sem tendência

Figura 11 - Localização espacial das regiões com tendências significativas do número anual de eventos moderados.

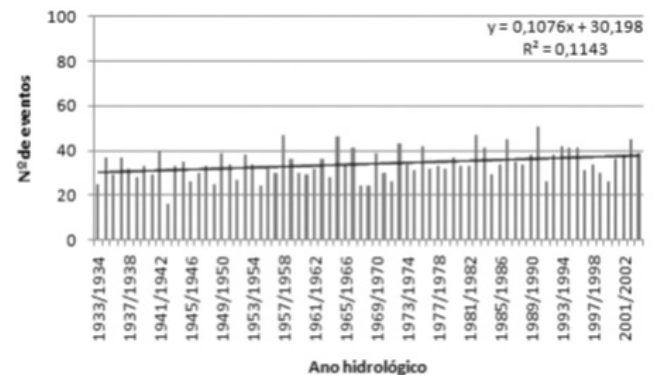


Figura 12 - Número anual de eventos moderados de chuva, assim com sua tendência linear significativa, para a estação do IAG, em São Paulo.

significativas em 5, como ilustrado na Figura 15, indicando que algum fenômeno físico que altera o microclima local pode induzir um aumento ou diminuição no número de casos de chuva leve de verão nestas localidades.

Quanto aos eventos de precipitação moderada no verão, 6 estações apresentaram tendências significativas, a maioria (5) de decréscimo e apenas uma de acréscimo (Instituto Biológico (#19)) como mostrado na Figura 16.

Muitos trabalhos mencionam que esta classe de precipitação também possui ligação com o efeito da ilha de calor urbana, mas observa-se que no período mais quente do ano, as estações situadas na região com as maiores temperaturas, apresentaram tendências decrescentes significativas. O mesmo ocorreu em relação às precipitações severas de verão, cujos resultados dos testes MK também se encontram na Tabela 4, na qual verifica-se, que apenas 2 das 21 estações na RMSP

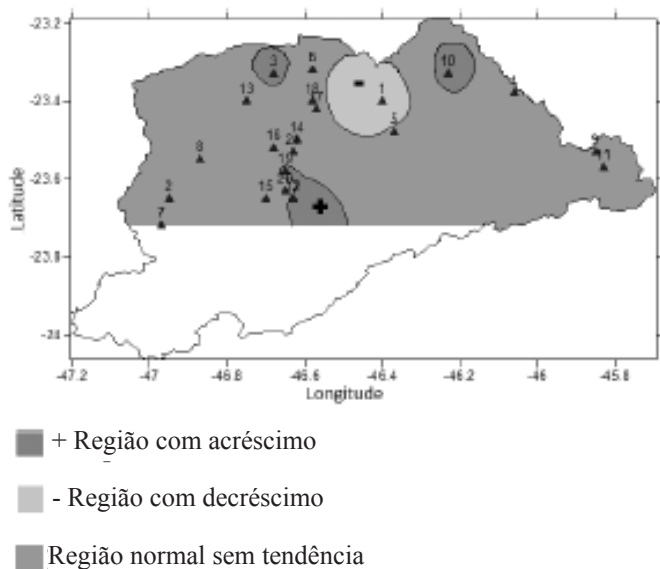


Figura 13 - Localização espacial das regiões com tendências significativas do número anual de eventos severos (> 30 mm/dia).

apresentaram tendências significativas, e de decréscimo: Guarulhos (#1) e Pedro Beicht (#7), como mostrado na Figura 17.

Ressalte-se que estas tendências são de longo prazo (superiores a 60 anos), que obviamente são diferentes das mais

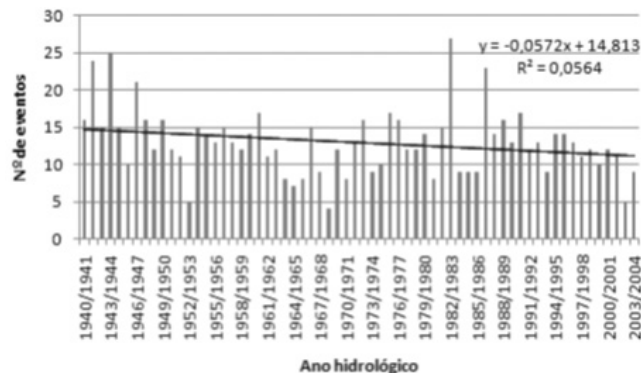


Figura 14 - Número anual de eventos severos de chuva, assim como sua tendência linear significativa, para a estação de Guarulhos.

Tabela 4 - Resultados dos testes de tendência e coeficientes da reta de regressão linear para o número de eventos sazonais de verão (DJF) nas classes, chuva leve, moderada e severa.

| Nº | Localidade | Classe de precipitação | | | | | |
|----|---------------------|------------------------|-------|----------|-------|---------|-------|
| | | chuva leve | | moderada | | Intensa | |
| | | MK | Coef. | MK | Coef. | MK | Coef. |
| 1 | Guarulhos | 3,129* | 1,33 | -0,151 | - | -3,071* | -1,33 |
| 2 | C.G-Cotia | 2,579* | 1,36 | -2,289* | -0,04 | -1,357 | - |
| 3 | Franco da Rocha | -0,806 | - | 1,867 | - | -0,449 | - |
| 4 | Guararema | 1,145 | - | -2,091* | -0,05 | -1,381 | - |
| 5 | Itaquaquecetuba | -0,050 | - | -0,473 | - | -1,842 | - |
| 6 | Mairiporã | 2,427* | 0,20 | -1,668 | - | -0,361 | - |
| 7 | P. Beicht-Cotia | -3,737* | -0,16 | 0,794 | - | -2,011* | -0,01 |
| 8 | Barueri | 2,441* | 0,22 | -0,904 | - | -1,932 | - |
| 9 | Salesópolis | 6,228* | 0,31 | -2,973* | -0,05 | -0,932 | - |
| 10 | Santa Isabel | 2,863* | 0,25 | -1,109 | - | 0,915 | - |
| 11 | Salesópolis (usina) | 1,112 | - | -0,983 | - | -0,782 | - |
| 12 | IAG | -6,051* | -0,27 | 1,653 | - | 0,144 | - |
| 13 | Perus | 2,256* | 0,15 | -1,105 | - | -0,816 | - |
| 14 | Santana | -2,657* | -0,07 | -3,292* | -0,04 | 0,286 | - |
| 15 | Santo Amaro | -1,942 | - | 0,105 | - | 0,836 | - |
| 16 | Água Branca | -3,685* | -0,16 | -0,568 | - | -0,319 | - |
| 17 | Barrocada | 4,337* | 0,42 | 0,165 | - | -0,441 | - |
| 18 | Engordador | 1,267 | - | 0,096 | - | -1,101 | - |
| 19 | I. Biológico | 3,265* | 0,28 | 2,156* | 0,11 | 0,906 | - |
| 20 | Congonhas | -4,750* | -0,20 | -0,441 | - | -0,248 | - |
| 21 | Estação da Luz | 1,002 | - | -2,443* | -0,03 | -0,095 | - |

*Valores significativos a 5%, + aumento e – diminuição.

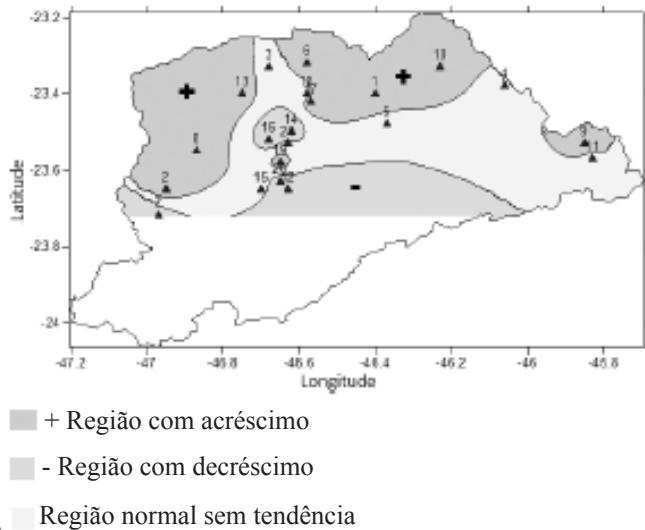


Figura 15 - Localização espacial das regiões com tendências significativas do número de eventos chuva leve no período de verão.

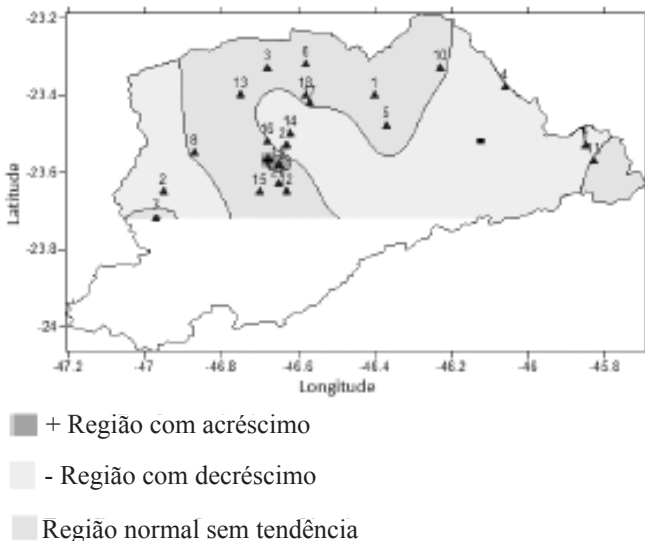


Figura 16 - Localização espacial das regiões com tendências significativas do número de eventos moderados no período de verão.

recentes (20-30 anos) nas quais são mais evidentes os impactos da urbanização e a geração da ilha de calor urbana. Raimundo (2010) mostrou que na Estação da Luz, a década com a maior frequência de eventos intensos de chuva ($> 30\text{mm}/\text{dia}$) foi a de 1940, fato que não poderia ser explicado pela produção de gases provenientes da queima de combustíveis fósseis nem pelo fenômeno de ilha de calor na cidade de São Paulo, que não era tão intenso quanto atualmente, mas poderia ser atribuído à forçantes naturais externas de frequência decenal, como por exemplo os ciclos solares, ou às flutuações naturais interanuais como o ENOS ou decenais, como a ODP.

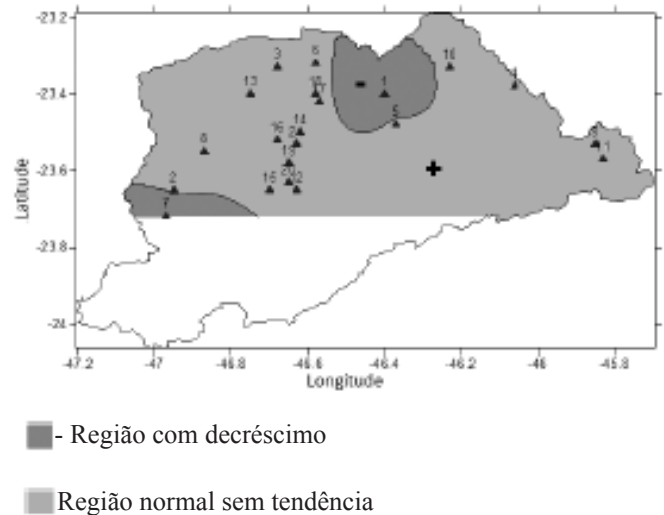


Figura 17 - Localização espacial das regiões com tendências significativas do número de eventos severos no período de verão ($> 30\text{mm}/\text{dia}$).

Os resultados dos testes MK para as precipitações anuais e de verão mostram que existe um maior número de estações com tendência significativa de acréscimo nos seus totais anuais do que nos de verão, principalmente na área central da RMSP.

A frequência de chuvas leves foi a classe que apresentou tendências significativas num maior número de estações, na sua maioria na área central, como também constatado por Nobre et al. (2011). Quatro estações apresentaram tendências significativas de acréscimo nos casos de precipitação severa e uma de decréscimo, mas no verão, apenas duas apresentaram tendências significativas, mas de decréscimo. Em nenhuma estação foi constatada tendência significativa de aumento nos casos de precipitações severas de verão, consideradas as principais causadoras de impactos sócio-econômicos na RMSP.

Em relação às tendências significativas de longo prazo, as estações analisadas apresentaram um comportamento anual e sazonal de verão distinto na RMSP, ainda mais considerando as classes de precipitação.

4. CONCLUSÕES

Foram constatadas tendências significativas positivas nos totais anuais em 9 estações na área central da RMSP, mas somente em 4 delas no verão. Tendências significativas de aumento (diminuição) no número de eventos de chuva leve no período anual (verão) foram, respectivamente, observadas em 9 (8) e 4 (6) das 21 estações consideradas. Na classe de precipitações moderadas, 4 estações apresentaram tendências anuais de aumento e uma de decréscimo, mas considerando somente o período de verão, 5 apresentaram tendências significativas de decréscimo e uma só de aumento. Em

relação aos casos anuais de precipitações severas, 4 estações apresentaram tendências significativas de acréscimo e uma de decréscimo, mas no verão apenas duas apresentaram tendências significativas, e de decréscimo.

Estes resultados mostram algumas evidências esparsas de aumento, às vezes de diminuição, nos totais anuais e sazonais e nas frequências anuais e sazonais das diferentes classes de precipitação. Alguns destes casos poderiam estar relacionados ao aquecimento urbano e à circulação de brisa marítima, principalmente os extremos de verão nos últimos 20-30 anos. A grande maioria das estações na RMSP não mostra tendências significativas. Também há evidências nas tendências de longo prazo, da influência de forçantes naturais de frequência interanual como o ENOS e decenal como a ODP, do aquecimento do Atlântico adjacente e talvez do aumento dos GEE.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; TANK, A.M.G. K., HAYLOCK, M.; COLLINS, D et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research**. v. 111, D05109, 2006.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2377-2394, 2002.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: intensity, form, persistence, relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88-108, 2004.
- COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 71, p. 185-97, 2002.
- DUFEK, A. S., AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, p. 167-178, 2008.
- GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. **Annales Geophysicae**, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.
- HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I. e VINCENT, L. A. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.
- LIEBMANN, B.; VERA, C. S.; CARVALHO, L. M. V.; CAMILLONI, I.; HOERLING, M. P.; BARROS, V. R.; BAEZ, J.; BIDEGAIN, M. An observed trend in central South American precipitation. **Journal of Climate**, v.17, p. 4357-4367, 2004.
- MAGRIN, G.; GARCÍA, C. G.; CHOQUE, D. C.; GIMÉNEZ, J. C.; MORENO, A. R.; NAGY, G. J.; NOBRE, C. A.; VILLAMIZAR, A. **Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. In: PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Eds.) **Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 581-615, 2007.
- MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico, **Climanálise**, agosto, CPTEC/INPE, 2005.
- MONTEIRO, C. A. F. Some aspects of the urban climates of tropical South America: the brazilian contribution. In: **WCP Urban Climatology and Applications, with Special Regard to Tropical Areas**. Sydney, WMO, p. 166-168, 1986.
- NOBRE, C. A.; YOUNG, A.; MARENGO J. A.; NOBRE, A. D.; SALDIVA, P.; OGURA, A.; VALVERDE, M.; OBREGON, G.; SILVA, G. C. M.; SILVEIRA, A. C.; RODRIGUES, G. O. **Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo**. In: MOTA, R.; HARGRAVE, J.; LUEDERMANN, G.; SARMIENTO, M.B. (Eds.). **Mudanças do Clima no Brasil: Aspectos econômicos, sociais e regulatórios**. 1^{ed}. Brasília: IPEA, p. 233-258, 2011.
- PEREIRA FILHO, A. J.; BARROS, M. T. L.; HALLAK, R.; GANDU, A.W. Enchentes na região metropolitana de São Paulo: aspectos de mesoescala e a avaliação de impactos. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004.
- RAIMUNDO, C. C. Eventos extremos de precipitação na cidade de São Paulo e sua possível relação com a oscilação decadal do Pacífico. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Belém do Pará, 2010. **Anais...** Belém, 2010.
- SNEYERS, R. **Sur l'analyse statistique des séries d'observations**. Genève: Organisation Météorologique Mondial. 192p. (OMN, Note Technique 143), 1975.

XAVIER, T. M. B. S.; OLIVEIRA, S.; DIAS, M. A. F. S.; XAVIER, A. F. S. Tendências da pluviometria na grande São Paulo e a influência dos processos de urbanização e industrialização. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., 1992. São Paulo. **Anais...** SBMet, São Paulo, p. 220-224, 1992.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; DIAS, M. A. F. S. Evolução da precipitação diária num ambiente urbano: o caso da cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 9, n.1, p. 44-53, 1994.