

Estudo para Identificação de Tendências do Regime Pluvial na Região Metropolitana de Belo Horizonte a Partir de Métodos Estatísticos

Gladstone Rodrigues Alexandre, Márcio Benedito Baptista, Mauro Naghettini

Universidade Federal de Minas Gerais

gladstoneengenheiro@yahoo.com.br; marcio.baptista@ehr.ufmg.br; naghett@netuno.lcc.ufmg.br

Recebido: 10/03/09 - revisado: 02/12/09 - aceito: 26/04/10

RESUMO

Os sistemas de recursos hídricos são projetados, usualmente, a partir da suposição de que a sequência temporal de dados hidrológicos, de vazão ou de precipitação, seja estatisticamente estacionária. Entretanto, tal suposição pode não ser verificada quando são considerados aspectos como a mudança do uso do solo, variabilidade e mudança climática, etc. Nestes casos, os projetos baseados na estacionariedade dos eventos hidrológicos devem ser revistos, com o intuito de verificar os possíveis impactos destas alterações nas condições operacionais dos sistemas hidráulicos locais. Neste contexto, potencializado pelas intensas polêmicas e controvérsias relativas a possíveis mudanças climáticas, o presente artigo faz uso de testes estatísticos, paramétricos e não paramétricos, para detecção de eventuais tendências do regime de chuvas na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Para essa análise foram coletados e estudados dados de 20 estações, com séries de 51 a 149 anos, em quatro conjuntos de séries de precipitação: totais anuais, totais trimestrais, totais semestrais e totais mensais máximos anuais. Antes da utilização dos testes estatísticos, foram construídos, para os quatro conjuntos de série, gráficos temporais, de média e mediana móveis de 10 anos, regressões lineares e do tipo LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing), e gráficos RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums), com o objetivo de auxiliar o entendimento da variabilidade intrínseca aos dados e identificar visualmente possíveis tendências ou eventuais mudanças abruptas nas séries. Na sequência, os dados foram analisados estatisticamente a partir do software TREND, desenvolvido pelo centro australiano CRCCH (Cooperative Research Center for Catchment Hydrology), objetivando a identificação de tendências ou mudanças abruptas nas séries de precipitação da região.

Palavras-chave: Detecção de tendências, séries de precipitação, testes estatísticos.

INTRODUÇÃO

O estudo de mudanças em séries temporais de dados hidrológicos é de grande importância científica e prática para a gestão dos recursos hídricos. Em geral, os sistemas de recursos hídricos são projetados a partir da suposição de que a sequência de dados hidrológicos, de vazão ou de precipitação, seja estatisticamente estacionária. Em outras palavras, supõe-se que as características estatísticas essenciais dos processos hidrológicos, tais como suas medidas de posição e variabilidade, permanecem constantes ao longo do tempo. Entretanto, tal suposição pode não ser verificada quando são considerados aspectos como a mudança de cobertura vegetal, variabilidade e mudança climática. Nestes casos, os projetos baseados na estacionariedade dos eventos hidrológicos devem ser revistos, com o intuito de verificar os possíveis impactos destas alterações no sistema hidráulico local.

No contexto atual de intensos debates relativos a possíveis mudanças climáticas, observa-se, com frequência, o desenvolvimento de estudos e técnicas diversas com intuito de evidenciar eventuais mudanças nas séries hidrológicas temporais. Esses estudos, em sua grande maioria, englobam séries pluviométricas e fluviométricas reduzidas de valores médios, máximos e mínimos. Modelos climáticos de circulação global e regional, bem como ferramentas estatísticas, são utilizadas com o propósito de auxiliar esse tipo de avaliação.

Em particular, em se tratando da utilização de técnicas estatísticas para detecção de tendências, estudos em diversas partes do mundo (Santos e Portela, 2007; Xu *et al.*, 2003; Lang e Renard, 2007; Alemaw e Chaoka, 2002; Douglas *et al.*, 2000; Tucci e Braga, 2003; entre outros) foram realizados, visando identificar eventuais mudanças em séries hidrológicas temporais. Nesses estudos, os testes mais utilizados foram os de *Mann Kendall* e o de *Regressão Linear*. Em todos esses trabalhos, percebe-se, em geral,

que são significativas as evidências de alterações em séries hidrológicas, sem revelar, no entanto, de forma conclusiva, se essas evidências se devem a mudanças climáticas ou a modificações de uso do solo ou à variabilidade climática natural, tema que causa polêmica e controvérsias entre climatologistas de todo o mundo (Galvin, 2008; Molion, 2008; Chapman, 2008; entre outros), ocupando bastante espaço na mídia.

Sendo assim, diante desse cenário de especulações e incertezas quanto aos impactos causados pelas eventuais mudanças climáticas em séries hidrológicas, o presente trabalho visa contribuir para a análise de tendências do regime de chuvas na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Para desenvolver o estudo aplicou-se um conjunto de técnicas estatísticas aos dados de 20 estações, com séries de 51 a 149 anos, em quatro conjuntos de séries de precipitação: totais anuais, totais trimestrais, totais semestrais e totais mensais máximos anuais, como será descrito ao longo deste documento.

MÉTODOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES HIDROLÓGICAS

Apesar de existirem muitos testes para a avaliação da significância estatística de uma tendência, considera-se como imprescindível a análise gráfica exploratória das séries temporais, antes da aplicação desses testes. Este exame visual dos dados é parte de um conjunto de técnicas conhecido como “EDA – Análise Exploratória dos Dados”, tradução da terminologia de língua inglesa “*Exploratory Data Analysis*”. Kundzewicz e Robson (2000) salientam a importância da EDA em estudos de tendências, ressaltando ainda que esse conjunto de técnicas pode ser usado para o exame de dados brutos com a finalidade de identificar características e peculiaridades, tais como a eventual existência de pontos atípicos ou *outliers*, falhas nos registros, heterogeneidades e mudanças abruptas na série temporal, além de constituir-se em valiosa ferramenta de interpretação estatística.

Existem muitas possibilidades de exploração gráfica de eventuais tendências em séries hidrológicas. Entre as mais empregadas, destacam-se, a plotagem de histogramas em conjunto com o gráfico de probabilidade normal, gráficos temporais, gráficos de correlação e as chamadas curvas “suavizadoras” (*smoothing curves*) (Kundzewicz e Robson, 2004). De acordo com Grayson *et al.* (1996), dentre as técnicas

descritas, as mais simples e comumente usadas no estudo de tendências são as funções “suavizadoras”, nas quais se inserem a média e mediana móveis e a regressão LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*). Segundo Alemaw e Chaoka (2002), outra importante técnica preliminar para inspeção visual de séries hidrológicas é a *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS). Segundo Garbrecht e Fernandez (1994) *apud*. Alemaw e Chaoka (2002), a soma RAPS de uma função $Y(t)$ é definida como:

$$X_K = \sum_{t=1}^K \frac{Y(t) - \bar{Y}}{S_Y}; K = 1, \dots, n \quad (1)$$

sendo X_K a RAPS no limite K , $Y(t)$ denota o valor da variável no instante t , S_Y o desvio padrão da amostra, n é o tamanho da amostra e K o contador limite da soma atual.

A construção do gráfico RAPS permite a visualização de alterações na média dos dados que seriam de difícil percepção apenas a partir da análise da série temporal original.

Após a análise exploratória dos dados, é conveniente que as possíveis tendências ou mudanças abruptas observadas graficamente nessa etapa sejam verificadas mediante testes estatísticos, a fim de avaliar o grau de significância destas alterações. Dentro do contexto de análise estatística para detecção de mudanças em séries hidrológicas, muitos métodos estatísticos podem ser utilizados, sendo que a escolha de cada um deles dependerá do tipo de mudanças que são de interesse no estudo (tendências/mudanças abruptas), do conhecimento ou desconhecimento do ponto de mudança na série e das suposições feitas para cada amostra.

De acordo com Naghettini & Pinto (2007), os testes estatísticos podem ser classificados em paramétricos e não paramétricos. O teste é dito paramétrico se os dados amostrais, por premissa, foram extraídos de uma população Normal ou de qualquer outra população, cujo modelo distributivo seja conhecido ou previamente especificado. Já os testes não paramétricos são aqueles que não necessitam de especificação prévia do modelo distributivo da população, sendo formulados com base em características da amostra, tais como, ordens de classificação ou número de diferenças positivas ou negativas entre os dados.

Conforme exposto por Kundzewicz & Robson (2000), quando são realizados os testes estatísticos, três tipos de suposições são comuns, quais sejam, a especificação da forma da distribuição e as hipóteses de homogeneidade e independência dos

dados. Caso a suposição da forma da distribuição dos dados seja violada, uma alternativa consiste em determinar o nível de significância ou os valores críticos dos testes estatísticos usando os métodos de reamostragem (*resampling methods*) (Chiew e Siriwardena, 2005). Esses métodos são considerados robustos e incluem os métodos de *permutação* e *bootstrapping*. Para avaliar a independência entre os dados da série, vários testes estatísticos podem ser utilizados, como, por exemplo, o teste de *autocorrelação*. No caso de se verificar a suposição de independência dos dados em séries regionalizadas (correlação espacial), testes multivariados, que levem em conta a dependência estatística entre as estações devem ser utilizados, a fim de evitar imprecisões nos resultados (Tucci e Braga, 2003). Já para avaliar a homogeneidade dos dados, testes de medida da heterogeneidade podem ser feitos.

Dentro de uma abordagem mais tradicional, os principais testes estatísticos utilizados no estudo de mudanças em séries de dados hidrológicos podem ser divididos nas seguintes categorias (Kundzewicz e Robson, 2000 e Grayson *et al.*, 1996):

- Testes para tendências: verificam a significância de mudanças graduais na série de dados. Exemplos: *Mann Kendall* (não paramétrico), *Kendall Sazonal* (não paramétrico), teste do ρ de *Spearman* (não paramétrico) e testes dos coeficientes de *regressão linear* (paramétrico);
- Testes para mudanças abruptas: verificam a significância da mudança da média ou mediana da amostra a partir de um ponto da série conhecido ou desconhecido. Exemplos: soma acumulada não paramétrica ou *Distribution-Free CUSUM* (não paramétrico), desvio acumulado ou *Cumulative Deviation* (paramétrico), teste da razão de verossimilhança de *Worsley* ou *Worsley Likelihood Ratio* (paramétrico), soma das ordens ou *Rank-Sum* (não paramétrico) e o teste convencional de *Student* (paramétrico);
- Testes para verificação da independência: buscam verificar se existe correlação serial entre os dados da amostra. Exemplos: cruzamento da mediana ou *Median Crossing* (não paramétrico), inflexões ou *Turning Points* (não paramétrico), diferenças de ordens ou *Rank Difference* (não paramétrico) e *Autocorrelação* (paramétrico).

Com o intuito de facilitar o estudo estatístico de tendências em séries hidrológicas, pesquisadores australianos desenvolveram o *software* denominado "TREND – *Trend/Change Detection*" para o processamento dos testes estatísticos anteriormente mencionados, à exceção do teste *Kendall Sazonal*. A descrição detalhada deste programa, bem como dos testes estatísticos que o compõem, é apresentada em Chiew & Siriwardena (2005).

De posse dos resultados fornecidos pelos testes estatísticos, é imprescindível que seja feita uma análise criteriosa, integrando os gráficos determinados na etapa de EDA, os resultados dos testes estatísticos e o histórico de informações relativas aos dados.

DEFINIÇÃO METODOLÓGICA PARA ESTUDO DE TENDÊNCIAS DO REGIME DE CHUVAS

O estudo do referencial teórico sobre a questão, apresentado no item precedente, e as especificidades de disponibilidade de dados na Região Metropolitana de Belo Horizonte, permitiram a definição metodológica apresentada a seguir.

Inicialmente, as estações pluviométricas para o estudo foram selecionadas a partir dos critérios de tamanho mínimo amostral, ou seja, amostras com, pelo menos, 50 anos de registros, e de uniformidade na distribuição espacial das estações pluviométricas no interior ou nas proximidades da área em estudo. Os períodos faltosos das séries pluviométricas selecionadas foram preenchidos utilizando o *Método de Ponderação Regional com Base em Regressões Lineares*, descrito por Tucci (2001). Após o preenchimento das falhas, as séries de precipitação foram consistidas utilizando o *Método de Dupla Massa*, tal como descrito em Tucci (2001). Seguindo essa análise preliminar, foram obtidos quatro conjuntos de séries de precipitação a partir dos dados coletados, os quais serviram de base para o desenvolvimento da pesquisa: séries de totais anuais, séries de totais trimestrais, séries de totais semestrais e séries de totais mensais máximos anuais. O foco da pesquisa concentrou-se, sobretudo, nas séries de precipitação anual, sendo que para o estudo dos outros três conjuntos de séries, apenas algumas estações, consideradas representativas do regime pluviométrico da região, foram selecionadas.

Dessa forma, na continuidade dos estudos, foram obtidas, para os totais anuais, as características

descritivas das amostras selecionadas, sendo que três dessas características (primeiro quartil – Q_1 , terceiro quartil – Q_3 e amplitude inter-quartis – A/Q) serviram de base para a análise dos *outliers* de cada série. Em seguida, foram construídos gráficos para os quatro conjuntos de séries de precipitação, com o objetivo de auxiliar o entendimento da variabilidade intrínseca aos dados e identificar visualmente possíveis tendências ou mudanças abruptas nas séries. Foram construídos gráficos temporais, de média e mediana móveis de 10 anos e regressões LOWESS e linear. Aplicou-se também a metodologia RAPS, tal como descrita em Alemaw & Chaoka (2002), objetivando identificar características adicionais nas séries temporais.

Em seguida, considerando um nível de significância de 5%, as séries de precipitação foram analisadas estatisticamente por meio do *software* TREND-*Trend/Change Detection*, o qual, conforme menção anterior, é um programa projetado para facilitar a utilização de testes estatísticos de detecção de tendências, mudanças e independência de séries temporais. Como alguns dos testes estatísticos fornecidos pelo TREND partem do pressuposto de que os dados são normalmente distribuídos, foi feita, inicialmente, uma análise de aderência das séries de precipitação estudadas por meio do teste de aderência de *Filliben*, tal como descrito em Naghettini & Pinto (2007). O propósito do emprego do teste de *Filliben* neste trabalho é o de verificar se os dados selecionados na RMBH podem ser considerados como amostras extraídas de uma população normal.

Para as séries pluviométricas cujas distribuições de probabilidade foram significativamente diferentes da normal, utilizou-se o método de reamostragem (*resampling method*) de 1000 réplicas para o cálculo dos valores críticos das estatísticas de teste. Já para aquelas amostras em que a suposição de normalidade não pode ser rejeitada, foram considerados os valores críticos tabelados das estatísticas de teste. A hipótese de independência dos dados (correlação serial) também pôde ser verificada mediante testes estatísticos também presentes no *software* TREND; nesse caso, as estações que apresentaram significância estatística em dois ou mais testes de independência foram consideradas como séries com fortes evidências de correlação serial. No que diz respeito à correlação espacial, não foram utilizados testes multivariados para verificar a independência dos postos de medição, tendo em vista que, no presente estudo, não foram realizadas análises com séries regionalizadas.

DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELO HORIZONTE

A seleção da RMBH para desenvolvimento do estudo é justificada, fundamentalmente, pela ausência de estudos de tendências no regime de chuvas da região. Além disso, trata-se de uma área que, aparentemente, demonstra estar sendo afetada por eventos extremos de chuva cada vez mais frequentes, demandando o maior aprofundamento de estudos dessa natureza.

Nos itens a seguir descreve-se a aplicação das etapas metodológicas precedentemente apresentadas no estudo relativo à Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Descrição da Área de Estudo

A RMBH, drenada pelas sub-bacias dos rios das Velhas e Paraopeba, afluentes da margem direita do rio São Francisco está localizada geograficamente entre as latitudes 19°00' e 20°30' sul e longitudes 43°15' e 44°45' oeste, na porção central do Estado de Minas Gerais. Segundo o censo demográfico de 2007, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, a região abrange uma área de 9.459,10 km², sendo constituída por 34 municípios, com uma população estimada em cerca de cinco milhões de habitantes.

De acordo com a classificação climática de Köppen, praticamente toda a área da RMBH está inserida na classificada tipo Cwb - clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado, enquanto que uma parte bastante reduzida corresponde ao tipo Cwa - clima temperado úmido com inverno seco e verão quente.

Segundo Quadro e Abreu (1994) *apud* Santos (2002), a RMBH encontra-se, durante todo o ano, sob o domínio do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, sendo que durante os meses de maior atividade convectiva, a Zona de Convergência do Atlântico Sul é um dos principais mecanismos para produção de chuvas nessa região.

Com relação ao regime de chuvas, a RMBH pode ser considerada uma região chuvosa, com precipitação média anual girando em torno de 1500 mm. A distribuição da precipitação durante o ano é bem definida, sendo o período mais chuvoso compreendido nos meses de outubro a março.

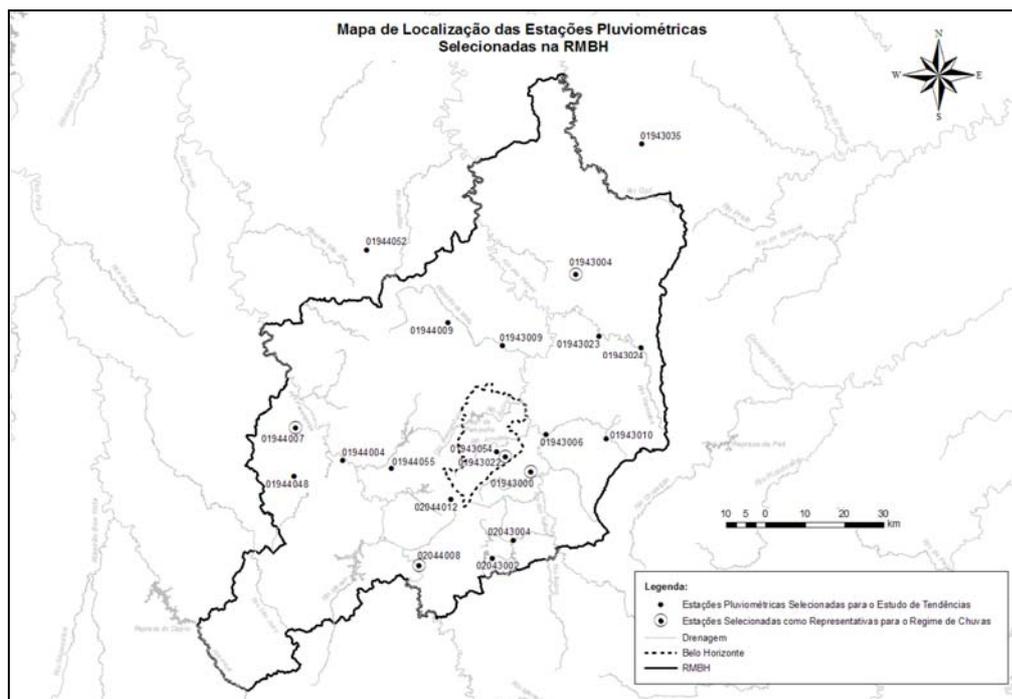


Figura 1 – Mapa de Localização das Estações Pluviométricas Seleccionadas na RMBH

Seleção e Tratamento Preliminar dos Dados de Chuva na RMBH

Foram selecionadas 20 estações pluviométricas na RMBH com, pelo menos, 50 anos de registros mensais, destacando-se a estação Mineração Morro Velho (01943000) com 149 anos de dados. Na Tabela 1, apresentam-se a localização e o período de dados das estações utilizadas, enquanto que na Figura 1, é mostrado o mapa de localização dessas estações pluviométricas.

Das estações listadas na Tabela 1, 18 séries pluviométricas estão disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA), enquanto que as outras duas foram obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os períodos faltosos foram preenchidos pelo *Método de Ponderação Regional com Base em Regressões Lineares* e a consistência dos dados foi realizada mediante a aplicação do *Método de Dupla Massa*. Das 20 estações listadas na Tabela 1, para o estudo das séries de totais anuais de precipitação, as seguintes 5 estações foram escolhidas para a análise dos totais trimestrais, totais semestrais e totais mensais máximos anuais, indicadas também na Figura 1: Mineração Morro Velho as (01943000), Jaboticatubas (01943004), Caixa de Areia (01943022), Fazenda

Escola Florestal (01944007) e Melo Franco (02044008).

Tabela 1 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Código	Latitude	Longitude	Período
01943000	19°58'44"	43°51'01"	1855 - 2003
01943004	19°31'11"	43°44'43"	1942 - 2007
01943006	19°53'29"	43°49'19"	1942 - 2007
01943009	19°41'14"	43°55'15"	1942 - 2007
01943010	19°53'54"	43°39'55"	1942 - 2007
01943022	19°57'02"	43°54'10"	1941 - 2007
01943023	19°39'50"	43°41'17"	1942 - 2007
01943024	19°41'23"	43°35'08"	1944 - 2007
01943035	19°13'08"	43°35'17"	1956 - 2007
01943054	19°56'00"	43°56'00"	1955 - 2005
01944004	19°57'20"	44°18'24"	1942 - 2007
01944007	19°52'47"	44°25'16"	1942 - 2007
01944009	19°38'05"	44°03'09"	1942 - 2007
01944048	19°59'30"	44°25'26"	1942 - 2001
01944052	19°28'00"	44°15'00"	1955 - 2005
01944055	19°58'24"	44°11'17"	1942 - 2007
02043002	20°10'45"	43°56'34"	1941 - 2007
02043004	20°08'16"	43°53'33"	1941 - 2007
02044008	20°11'52"	44°07'15"	1941 - 2007
02044012	20°02'34"	44°02'36"	1945 - 2007

Análise Exploratória dos Dados de Chuva na RMBH

Após a análise preliminar dos dados, as características descritivas para as séries de totais anuais de precipitação e os pontos atípicos dessas amostras foram obtidos. Apesar de serem identificados pontos atípicos em todas as amostras, eles não foram extraídos das séries, uma vez que, esses pontos correspondem, segundo observações, a eventos regionais, ou seja, foram observados em grande parte das estações pluviométricas.

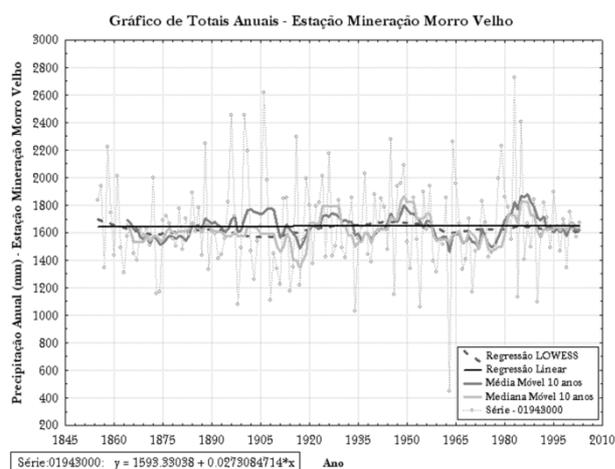


Figura 2 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais anuais da estação Mineração Morro Velho (01943000)

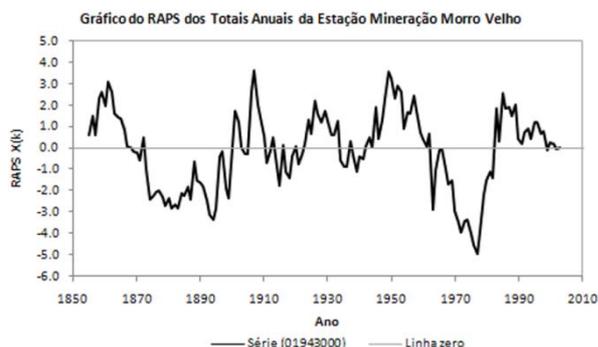


Figura 3 – Gráfico RAPS para os totais anuais da estação Mineração Morro Velho (01943000)

Após a análise de pontos atípicos, foram construídos os gráficos de análise exploratória para os quatro conjuntos de séries mencionados na metodologia.

No caso das séries de precipitação anual, em geral, os gráficos das curvas “suavizadoras” e de regressão linear demonstraram uma ligeira tendência negativa nos dados. Na Figura 2, exemplifica-se esse tipo de gráfico para o caso da estação Mineração Morro Velho (01943000). Já o gráfico RAPS, apresentou em todas as séries de precipitação anual uma depressão mais pronunciada em torno do ano de 1977, indicando uma possível mudança da média desse ponto em diante, em relação ao período anterior, como pode ser observado na Figura 3, também para a estação Mineração Morro Velho (01943000).

Para as séries de totais trimestrais, os gráficos de curvas “suavizadoras” e de regressão linear, em geral, apresentaram tendências negativas para os trimestres mais chuvosos (outubro-dezembro e janeiro-março), enquanto que, para os trimestres mais secos (abril-junho e julho-setembro), foram observadas tendências positivas. Como exemplo, são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente, esses gráficos para os trimestres de janeiro-março e julho-setembro da estação Caixa de Areia (01943022).

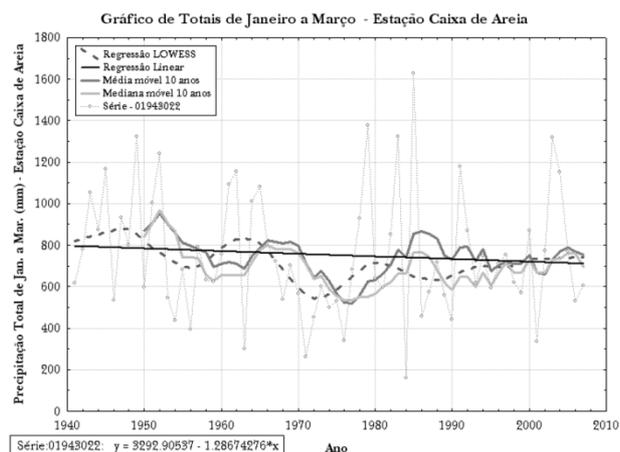


Figura 4 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais de Janeiro a Março da estação Caixa de Areia (01943022)

Ainda tratando dos gráficos RAPS, foram identificados diversos pontos de “depressão” e “picos” pronunciados, sendo que, para o caso particular da estação Caixa de Areia (01943022), o trimestre janeiro-março apresentou um “pico” mais evidente por volta do ano de 1952 e no trimestre julho-setembro foi observada uma depressão por volta do ano de 1967, como pode ser verificado nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

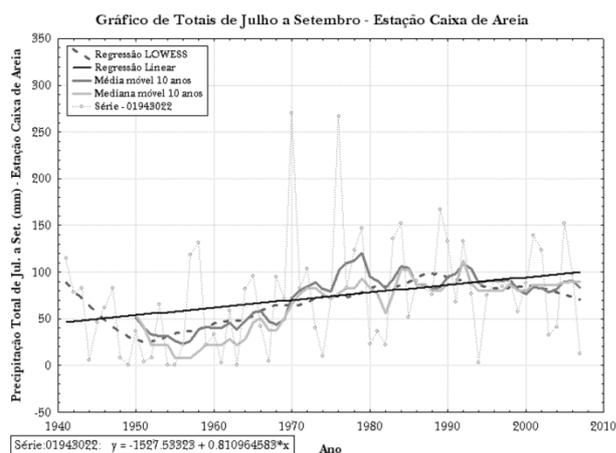


Figura 5 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais de Julho a Setembro da estação Caixa de Areia (01943022)

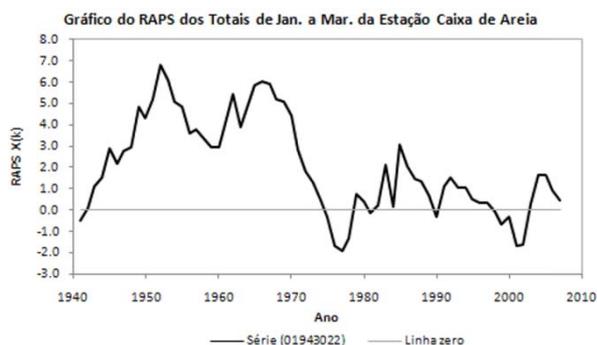


Figura 6 – Gráfico RAPS para os totais de Janeiro a Março da estação Caixa de Areia (01943022)

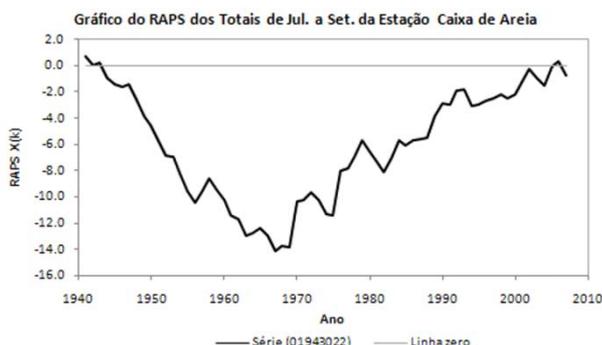


Figura 7 – Gráfico RAPS para os totais de Julho a Setembro da estação Caixa de Areia (01943022)

No tocante às séries de totais semestrais, foi constatado, a partir dos gráficos de curvas “suavizadoras”, um comportamento similar ao observado nos totais trimestrais. Em termos gerais, o semestre

mais chuvoso (outubro-março) indicou tendências negativas e o semestre mais seco (abril-setembro) apresentou tendências positivas. Nas Figuras 8 e 9, os dois casos, são respectivamente apresentados para o caso da estação Caixa de Areia (01943022). Já no que diz respeito aos gráficos RAPS, foram identificados, também, para os totais semestrais vários pontos de “depressão” e “pico”, sugerindo mudanças na média das séries nesses períodos. A título de exemplo, nas Figuras 10 e 11 apresentam-se os gráficos da estação Caixa de Areia (01943022), para os totais semestrais outubro-março e abril-setembro, respectivamente. Na Figura 10 pode-se observar um “pico” por volta do ano de 1952 e uma “depressão” mais evidente em 1977, enquanto que na Figura 11, o gráfico apresenta uma “depressão” pronunciada nas proximidades do ano de 1969.

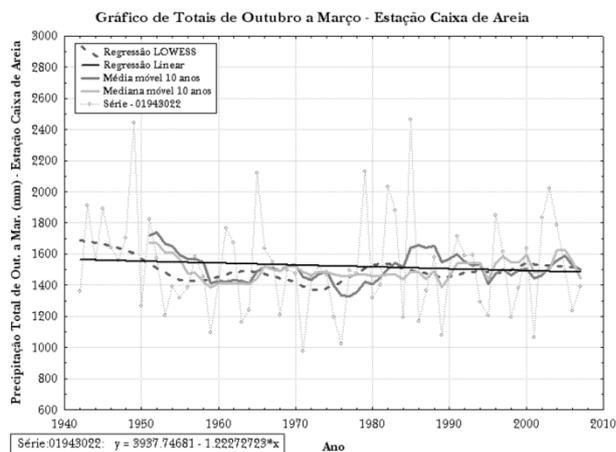


Figura 8 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais de Outubro a Março da estação Caixa de Areia (01943022)

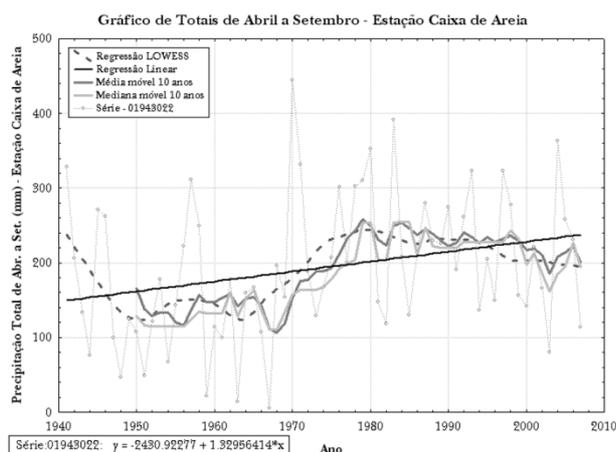


Figura 9 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais de Abril a Setembro da estação Caixa de Areia (01943022)

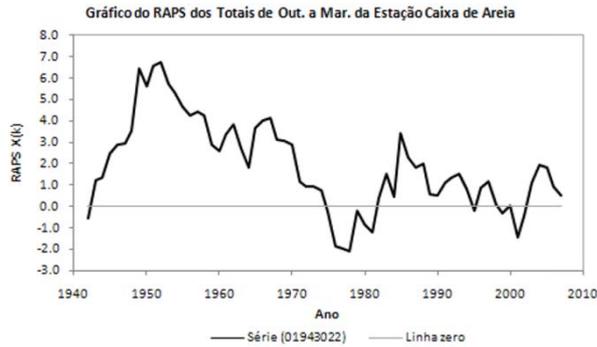


Figura 10 – Gráfico RAPS para os totais de Outubro a Março da estação Caixa de Areia (01943022)

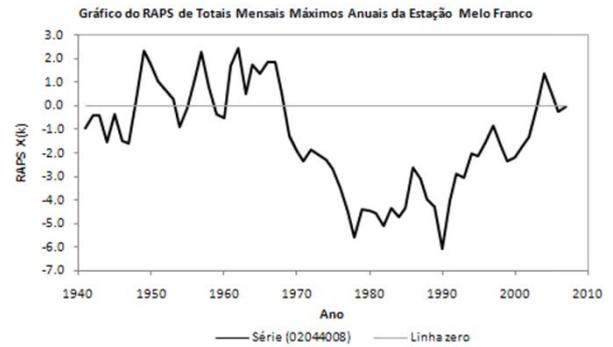


Figura 13 – Gráfico RAPS para os totais mensais máximos anuais da estação Melo Franco (02044008)

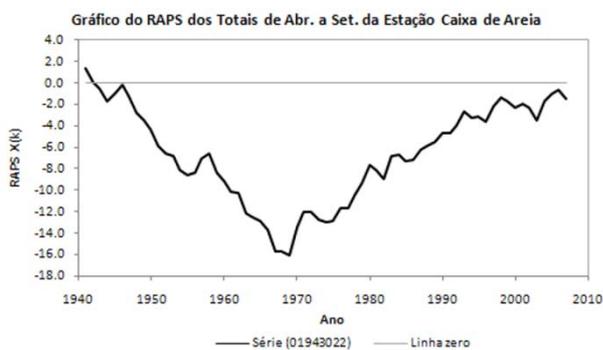


Figura 11 – Gráfico RAPS para os totais de Abril a Setembro da estação Caixa de Areia (01943022)

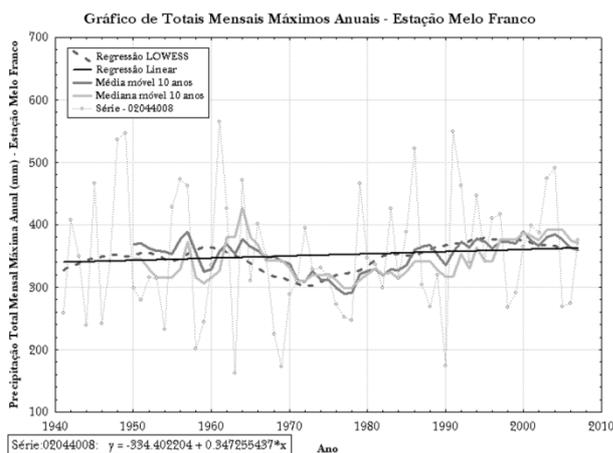


Figura 12 – Gráfico das regressões LOWESS e linear e da média e mediana móveis de 10 anos para os totais mensais máximos anuais da estação Melo Franco (02044008)

Aplicação de Testes Estatísticos para Detecção de Mudanças nos Dados de Chuva na RMBH

Por fim, para os totais mensais máximos anuais constatou-se que os gráficos das curvas “suavizadoras” e de regressão linear demonstraram tendências positivas em três estações pluviométricas (Mineração Morro Velho-01943000, Caixa de Areia-01943022 e Melo Franco-02044008), enquanto que nas outras duas estações (Jaboticatubas-01943004 e Fazenda Escola Florestal-01944007) foram apresentadas tendências negativas. A Figura 12 mostra um destes gráficos para o caso da estação Melo Franco (02044008). Para os gráficos RAPS, foram observadas depressões pronunciadas mais frequentes por volta do ano de 1977. Em particular, no caso da estação Melo Franco (02044008) a depressão mais evidente ocorreu no ano de 1990 como mostra a Figura 13.

Antes do processamento dos dados no *software* TREND, foram realizados testes de aderência para os quatro grupos de séries de precipitação, a partir do teste de *Filliben*, objetivando verificar a adequação da hipótese de normalidade das amostras aqui consideradas. Podem ser consideradas como extraídas de uma população normal, dez estações das séries de totais anuais, as cinco das séries de outubro-dezembro e abril-setembro, três estações das séries de janeiro-março e outubro-março, uma das séries de julho-setembro e de totais mensais máximos anuais e nenhuma estação das séries de abril-junho. A hipótese de homogeneidade dos dados foi aceita com base no estudo realizado por Pinheiro (1997) na RMBH, em que a partir de um teste da medida de heterogeneidade foi verificado que a região pode ser classificada como “aceitavelmente homogênea”. Já a hipótese de independên-

cia, essa foi verificada mediante testes estatísticos presentes no *software* TREND.

Em se tratando especificamente das séries de totais anuais, os resultados processados pelo programa TREND, considerando uma significância estatística de 5%, não evidenciaram tendências ou mudanças abruptas significativas nas vinte séries de precipitação estudadas. Para as séries de totais de outubro-dezembro, janeiro-março e dos totais mensais máximos anuais, também não foram observadas alterações significantes em nenhuma delas. Nas séries de abril-junho, apenas uma estação indicou mudança abrupta nos dados. No caso das séries de totais de julho-setembro, foram detectadas tendências positivas em duas delas e mudança abrupta nos dados em todas as estações pluviométricas. Para o grupo dos totais semestrais, constatou-se que o semestre de outubro-março apresentou apenas uma estação com tendência negativa nos dados, enquanto que, no semestre de abril-setembro, apenas uma estação apresentou tendência positiva e mudança abrupta nos dados e outras duas apresentaram significância nos testes de mudanças abruptas.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Como síntese global dos resultados obtidos na presente pesquisa, apresenta-se na Tabela 2 o número de ocorrências observadas para os testes de tendência, mudança abrupta e independência de cada uma das séries pluviométricas estudadas. Por exemplo, das 5 ocorrências dos T.J-S do teste de tendência, 2 foram do *Mann Kendall*, 2 de *Spearman* e 1 do teste de *Regressão Linear*.

Tabela 2 – Síntese Global dos Resultados

Tipo do Teste	Nº de Ocorrências			
	T.A.	T.O-D	T.J-M	T.A-J
Tendência	0	0	0	0
M. Abrupta	0	0	0	1
Independência	11	6	0	5
Tipo do Teste	T.J-S	T.O-M	T.A-S	M.T.M
Tendência	5	1	3	0
M. Abrupta	15	0	11	0
Independência	2	0	9	0

Obs.: T.A=Totais Anuais; T.O-D=Totais de Outubro a Dezembro; T.J-M=Totais de Janeiro a Março; T.A-J=Totais de Abril a Junho; T.J-S=Totais de Julho a Setembro; T.O-M=Totais de Outubro a Março; T.A-S=Totais de Abril a Setembro; M.T.M=Máximos Totais Mensais de Cada Ano

As séries de precipitação anual, que foram o foco da presente pesquisa, não apresentaram tendências significativas nos dados. Algumas estações indicaram significância nos testes de independência, mas, a rigor, apenas uma delas (Mateus Leme-01944048) indicou maiores evidências de correlação serial, como ilustrado na Figura 14.



Figura 14 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para os totais anuais

Já para os outros três conjuntos de séries, foram identificadas tendências em séries de totais trimestrais (julho-setembro) e totais semestrais (outubro-março e abril-setembro), enquanto que para os totais mensais máximos anuais não foram verificadas mudanças.

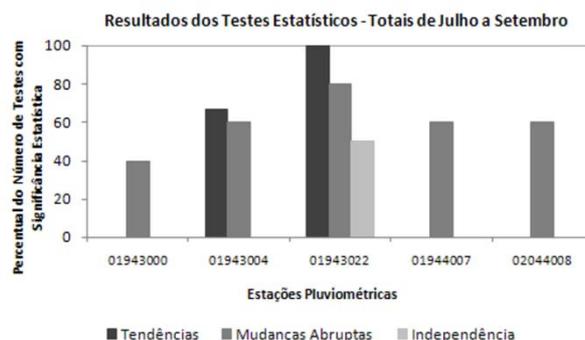


Figura 15 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para os totais de Julho a Setembro

No caso dos totais de julho-setembro, foram verificadas tendências positivas nas estações Jaboticatubas (01943004) e Caixa de Areia (01943022), mudanças abruptas nas cinco estações e dependência estatística nos dados apenas na estação Caixa de Areia (01943022), como pode ser observado na Figura 15. De acordo com o critério mencionado anteriormente, as tendências e mudanças abruptas encontradas na estação Caixa de Areia (01943022)

devem ser analisadas com muita cautela, uma vez que, dois testes de independência apresentaram significância estatística, atribuindo aos resultados um alto grau de incerteza.

Os totais semestrais de outubro-março indicaram tendência negativa nos dados apenas na estação Fazenda Escola Florestal (01944007) e não apresentaram significância estatística nas demais categorias de testes como mostra a Figura 16. Em se tratando dos totais semestrais de abril-setembro, a série da estação Caixa de Areia (01943022) apresentou tendência negativa nos dados, bem como significância nos testes de mudanças abruptas e de independência. Das quatro séries de precipitação restantes, duas apresentaram apenas significância estatística nos testes de independência (Mineração Morro Velho-01943000 e Fazenda Escola Florestal-01944007), enquanto que as demais mostraram significâncias tanto nos testes de mudanças abruptas quanto nos de independência, como pode ser visualizado na Figura 17. A tendência e as mudanças abruptas identificadas nas séries dos totais de abril-setembro podem ter sofrido influência da correlação entre os dados, tendo em vista que, o número de testes de correlação serial com significância estatística, nestes casos, ultrapassou o limite estabelecido *a priori*.



Figura 16 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para os totais de Outubro a Março

A mudança abrupta evidenciada em apenas uma estação pluviométrica (Melo Franco-02044008) das séries de totais de abril-junho, também deve ser avaliada com muito cuidado, já que, foi indicada significância estatística em dois testes de independência.

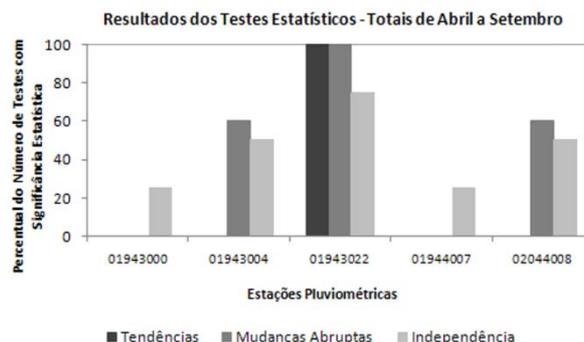


Figura 17 – Síntese dos resultados dos testes estatísticos para os totais de Abril a Setembro

Em suma, analisando, conjuntamente, os resultados encontrados na etapa de análise exploratória dos dados com os resultados dos testes estatísticos, conclui-se que, em termos gerais, os resultados indicam uma possível tendência de aumento de precipitação no período mais seco (abril-setembro) da RMBH, em contraposição a uma tendência de diminuição de chuvas no período mais chuvoso (outubro-março), apesar de, neste período, ter sido observada tendência significativa em apenas uma série pluviométrica. De acordo com o presente estudo, tanto o regime anual quanto os totais mensais máximos anuais da região, não apresentaram evidências de mudanças em suas séries.

Outra constatação importante obtida a partir desses resultados foi que, em algumas situações, a inclinação da reta de regressão linear de uma determinada série pluviométrica era maior do que a de outra estação. No entanto, os testes estatísticos indicaram tendência significativa na série com menor coeficiente angular e não apontaram significância estatística na amostra cuja inclinação da reta de regressão era maior. Um exemplo disso seria o caso das séries dos totais trimestrais de julho-setembro, onde a estação Jaboticatubas (01943004) apresentou um coeficiente angular (+0,4213) menor do que o coeficiente angular (+0,5002) da estação Fazenda Escola Florestal (01944007). A explicação para o ocorrido, tomando como base o exemplo citado, é que a variância ($S = 2233$) da série temporal da estação Fazenda Escola Florestal (01944007) é maior do que a variância ($S = 1506$) da série da estação Jaboticatubas (01943004). Dessa forma, quanto maior a variância dos dados, maior a incerteza em rejeitar a hipótese H_0 , ou seja, do teste estatístico indicar tendência na série temporal.

Os resultados apresentados neste trabalho chamam a atenção para o cuidado que se deve ter ao apontar como causa das catástrofes naturais observadas atualmente (aumento das tempestades e enchentes, por exemplo) as alterações climáticas, tendo em vista a complexidade em dissociar essas alterações das variações naturais do clima. No entanto, apesar das incertezas associadas às mudanças climáticas e, conseqüentemente, aos impactos dessas possíveis alterações do clima em séries hidrológicas, como apresentado e discutido anteriormente, estudos dessa natureza são importantes e oportunos para auxiliar gestores de recursos hídricos no cenário atual de intenso questionamento e debate das questões ambientais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos ainda ao INMET – Instituto Nacional de Meteorologia – pela disponibilização de alguns dados utilizados.

REFERÊNCIAS

- ALEMAW, B. F.; CHAOKA, T. R. Trends in the Flow Regime of the Southern African Rivers as visualized from Rescaled Adjusted Partial Sums (RAPS), *African Journal of Science and Technology*, vol. 3, n. 1, p. 69-78, 2002.
- CHAPMAN, P. Sorry to ruin the fun, but an ice age cometh. *The Australian – Online Newspaper of the Year*, 2008. Disponível em: <<http://www.theaustralian.news.com.au/story/0,25197,23583376-5013480,00.html>>. Acesso em: 07 dez. 2008.
- CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. Trend User Guide, CRC for Catchment Hydrology, Australia, 29 p., 2005.
- DOUGLAS, E. M.; VOGEL, R.M.; KROLL, C. N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation, *Journal of Hydrology*, n. 240, p. 90-105, 2000.
- GARBRECHT, J.; FERNANDEZ, P.G. Visualization of trends and fluctuations in climatic records. *Water Resources Bulletin*, 30 (2), p. 297-306, 1994.
- GALVIN, C. On AGU's Position Statement, "Human Impacts on Climate, *Eos Trans. AGU*, vol. 89, n. 46, p. 459-460, 2008.
- GRAYSON, R. B.; ARGENT, R. M.; NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A.; MEIN, R. *Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia, 125 p., 1996.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. J. Change Detection in Hydrological Records – A Review of the Methodology, *Hydrological Sciences*, vol. 49, n. 1, p. 7-19, 2004.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; ROBSON, A. Detecting trend and Other Changes in Hydrological Data, *World Climate Programme-Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD n. 1013*, Geneva, 158p., 2000.
- LANG, M.; RENARD, B. Analyse régionale sur les extrêmes hydrométriques en France: détection de changements cohérents et recherche de causalité hydrologique. *La Houille Blanche*, n. 6, p. 83-89, 2007.
- MOLION, L. C. B. Desmistificando o Aquecimento Global. 2008. Disponível em: <<http://www.msia.org.br/c---t/542.html>>. Acesso em: 07 dez. 2008.
- NAGHETTINI, M. C.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte – Serviço Geológico do Brasil (C-PRM), 561 p., 2007.
- PINHEIRO, M. M. G. Estudo de chuvas intensas da Região Metropolitana de Belo Horizonte-RMBH. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 1997.
- QUADRO, M.F.L.; ABREU, M.L. Estudos de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul sobre a América do Sul. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8., 1994, Belo Horizonte-MG. Anais II...Belo Horizonte, p. 620-623, 1994.
- SANTOS, E. C. X. Estudo da Variabilidade Espacial do Campo de Chuva e Transformação da Precipitação Pontual em Precipitação Média Espacial na Região Metropolitana de Belo Horizonte-RMBH. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2002.
- SANTOS, J. F.; PORTELA, M. M. Tendências em Séries de Precipitação Mensal em Portugal Continental: Aplicação do Teste de Mann-Kendall. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (CD-ROM), São Paulo, 2007.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia Ciência e Aplicação*, 2ª ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ UFRGS: ABRH, 943 p., 2001.
- TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*, 1ª ed. Porto Alegre: ABRH, 348 p., 2003.

XU, Z. X.; TAKEUCHI, K.; ISHIDAIRA, H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation, *Journal of Hydrology*, n. 279, p. 144-150, 2003.

Study of Trend Identification Of The Rainfall Regime in The Metropolitan Region Of Belo Horizonte Through Statistical Methods

ABSTRACT

Water resources systems are usually designed under the assumption of statistically stationary time series of precipitation and/or streamflow. However, this assumption must be previously verified if changes in climate and land use are issues of interest. In these cases, designs based on the assumption of stationary hydrologic time series should be revised, with the specific aim of verifying the possible impacts that these changes would have on the local water infrastructure. In this context, potentiated by intense controversies about climate change, this paper describes a collection of parametric and non-parametric statistical tests for detecting possible trends in the rainfall regime of the Metropolitan Region of Belo Horizonte, in southeastern Brazil. For this analysis data from 20 gauges, with 50 to 149-year series were collected in four groups of rainfall series: the annual rainfall series, the quarterly rainfall series, the half-yearly series and the annual maximum monthly rainfall series. Prior to the use of statistical tests, the 4 groups of precipitation series were submitted to a preliminary graphical analysis covering time series plots of a 10-year moving average and moving median, LOWESS smoothing (Locally Weighted Scatterplot Smoothing), linear regression and RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums) graphs, as well as an exploratory analysis for detecting and identifying possible trends and/or abrupt changes in data. After this graphical and exploratory study, the data were formally analyzed using TREND software, developed by the Australian Cooperative Research Center for Catchment Hydrology (CRCCH), aiming to identify possible trends or abrupt changes in point precipitation series within the region.

Key-words: *Trend detection, rainfall series, statistical tests.*