ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Monção em São Paulo, Brasil

Antonio Jaschke Machado, Professor Doutor. Universidade Estadual Paulista – UNESP. jaschke.machado@unesp.br

Artigo recebido em 19/03/2019 e aceito em 04/11/2019

RESUMO

Este artigo corrobora a existência de monção em São Paulo, revelada a partir da observação de flutuações periódicas na umidade absoluta. O ciclo diário e o ciclo sazonal registrado em duas localidades nos extremos oriental e ocidental de São Paulo são comparados e analisados. A incorporação da direção do vento à análise sugere a existência de um regime de monção, cuja transição entre a estação úmida e a estação seca é definida pela variação da umidade absoluta.

Palavras-chave: Monção, Umidade absoluta, Direção do vento.

Monsoon in São Paulo State, Brazil

ABSTRACT

This paper corroborates the existence of monsoon in São Paulo, revealed from the observation of periodic fluctuations in absolute humidity. The daily cycle and the seasonal cycle recorded in two sites in the eastern and western extremes of São Paulo are compared and analyzed. The incorporation of the wind direction to the analysis suggests the existence of a monsoon regime, whose transition between the wet season and the dry season is defined by the variation of the absolute humidity.

Keywords: Monsoon, Absolute humidity, Wind direction.

Introdução

Mousin, a palavra árabe para estação (período fixo), designa uma circulação de ventos de superfície sobre o Oceano Índico tropical dominada pela reversão sazonal (Wallace e Hobbs, 2006). Consiste de um arco extenso que se origina como um fluxo para oeste no hemisfério de inverno, o qual cruza o equador, e curva-se a leste para formar um cinturão de ventos de oeste carregados de umidade no hemisfério de verão (para o hemisfério norte, isto é, verão boreal). A monção é induzida pela presença da Índia e do sudeste da Ásia no hemisfério norte subtropical em contraposição à presença do Oceano Índico no hemisfério sul subtropical.

A assimetria da zona de convergência intertropical (ITCZ) em relação ao equador é uma consequência da geometria terra-mar, bastante evidente no caso asiático, porém, não exclusivo, especificamente a orientação noroeste-sudeste do litoral ocidental da África e das Américas. Esse efeito da ITCZ já fora estudado na década de 1940, para o litoral oriental da América do Sul, por Serra e Ratisbona (1942). A confluência dos ventos e a

convergência de massa em baixos níveis, em especial na região do Atlântico sul, favorecem o transporte de umidade e a convecção sobre parte do continente sul-americano.

Devemos a Adalberto Serra a ideia de que há monção na América do Sul. Mas, a noção intuitiva talvez seja mais antiga. *A história das monções do Cuiabá é de certa forma, um prolongamento da história das bandeiras paulistas, em sua expansão para o Brasil Central. Desde 1622, numerosos grupos armados, procedentes de São Paulo, Parnaíba, Sorocaba e Itu, trilharam constantemente terras hoje mato-grossenses, preando índios ou assolando povoações de castelhanos* (HOLANDA, 1945). Sob o contexto histórico, monção é o período favorável à navegação dos rios, durante o qual era possível às bandeiras paulistas embrenharem-se pelo continente. Muito provavelmente, neste sentido, também os antigos navegadores árabes aplicassem o termo.

A região central da América do Sul apresenta um ciclo anual de precipitação bem definido, com seis meses secos e seis meses chuvosos, e 90% dessa precipitação ocorrem durante os meses mais quentes do ano (Gan et al., 2009). Apesar dessa constatação, no passado não era considerado que essa região tivesse uma circulação de monção, devido ao fato de os ventos em baixos níveis não reverterem sua direção durante a mudança da estação seca para a chuvosa e vice-versa.

A hipótese a que este estudo se propõe investigar é a de que a precipitação não é o parâmetro adequado para definir a transição entre as estações, ao invés disso, a umidade absoluta. Não se trata, pois, definir-se a transição entre a estação seca e a estação chuvosa, todavia, mais precisamente, a transição entre a estação seca e a estação úmida e vice-versa. A ocorrência na Índia, que se tem conhecimento a partir dos primeiros relatos dos exploradores árabes, seria um caso extremo no qual a atmosfera local não é capaz de reter todo o conteúdo de água disponível e, conseqüentemente, precipita-a.

Possivelmente, a monção a qual se referiam os navegadores árabes, era algo percebido mais sutilmente, a partir da constatação do desenvolvimento das primeiras torres de cumulus após um longo período em que sol imperava inclemente. Observações de longo prazo apresentadas neste artigo e tomadas em localidades extremas, próximo à costa e muito afastado no interior do Estado de São Paulo, indicam a ocorrência de monção, acompanhadas de giro apenas parcial de 90° do vento ESE, simultaneamente à secagem substancial da atmosfera no mês de abril e posterior umedecimento a partir de setembro.

As temperaturas da superfície sobre a terra respondem muito mais fortemente às variações sazonais do aquecimento solar, do que aquelas sobre o oceano. Conseqüentemente, durante janeiro os continentes subtropicais do hemisfério sul estão muito mais quentes do que a temperatura da superfície do mar do Oceano Atlântico tropical e subtropical. É este contraste de temperaturas que orienta o fluxo de monção para o continente. Em julho, quando no Estado de São Paulo e, de modo geral sobre todo o sudeste do Brasil, está mais frio do que a temperatura do Oceano Atlântico subtropical, o fluxo de monção ocorre no sentido inverso, do continente para o oceano.

A reversão dos ventos observada no leste do Estado de São Paulo foi identificada por Dias e Machado (1990; 1997) como um fenômeno de brisa

marítima, estritamente regional, caracterizado por um giro completo dos ventos em 360° durante um período de 24 horas. Mas a brisa do oceano para o continente não é apenas um fenômeno regional, também é um fenômeno continental (AZEVEDO, 2002). Quanto maior a escala espacial analisada a reversão dos ventos se dá por um giro parcial, podendo ser exatamente em oposição (180°) como no caso indiano, ao mesmo tempo em que a duração deste giro estende-se por um período muito maior, podendo chegar a meses.

Resumindo-se, ao restringir-se a análise a um período curto de apenas um dia referimo-nos à reversão na direção dos ventos como sendo brisa. Mas, caso ampliássemos a análise a um longo período de um ano, dever-se-ia referir-se à reversão na direção dos ventos como sendo monção.

Base física

A justaposição de ambientes termicamente contrastantes resulta no desenvolvimento de forças do gradiente horizontal de pressão, as quais se suficientes para superar a influência de retardo da fricção causarão movimento de ar através da fronteira entre as superfícies (Oke, 1987). Superfícies de terra e água possuem respostas térmicas contrastantes devido às suas diferentes propriedades e balanços de energia, e esta é a força indutora por detrás do sistema de circulação próximo ao oceano. Comparado à maioria das superfícies terrestres um corpo d'água exibe muito pouca mudança diurna na temperatura da superfície.

As quatro principais causas por a água ser diferente são (i) a água permite a transmissão de radiação em ondas curtas a profundidades consideráveis, (ii) a água é capaz de transferir calor por convecção e mistura, (iii) a água converte muito de sua energia excedente em calor latente ao invés de sensível, (iv) a água tem uma grande inércia térmica devido a sua maior capacidade térmica. Muito embora, o saldo radiativo poder ser maior sobre a água (por causa do seu baixo albedo) a efetividade do calor latente e do calor armazenado como sumidouros térmicos torna o calor sensível pequeno.

Dias e Machado (1990; 1997) observam e simula-se numericamente a circulação do ar próximo ao Oceano Atlântico, durante a estação úmida, no leste do Estado de São Paulo. Nota-se a ocorrência de desenvolvimento convectivo em diferentes dias, com características e intensidades distintas em dependência à situação sinóptica predominante. Na situação em que a circulação sinóptica favorece a

circulação termicamente induzida, há aceleração dos ventos em direção ao continente, formam-se nuvens mais profundas e chove. Por outro lado, na situação em que a circulação sinótica contrapõe-se à circulação termicamente induzida, há retardo dos ventos, formam-se nuvens mais rasas e não chove.

O avanço da frente de circulação térmica produz levantamento de ar naquela que já é uma atmosfera instável sobre o continente (Oke, 1987). A frente de circulação é, portanto, comumente associada ao desenvolvimento de nuvens cumulus que são apanhados no contra fluxo acima e carregados em direção ao mar onde se dissipam devido à remoção de sua fonte de umidade, e também devido à subsidência sobre a água que as aquece adiabaticamente.

Se os processos naturais fossem rigorosamente periódicos seria simples descrevê-los matematicamente. Obviamente, a atmosfera exibe variações e flutuações que são irregulares. Esta incerteza é o fio condutor por detrás do armazenamento e análise dos dados. Ao procurar relacionar as variações da umidade absoluta às variações da do vento, geradas pelas monções, pretende-se expor parte da circulação atmosférica regional imersa em uma circulação de escala espacial ainda maior.

A análise dos dados implica em comparar séries temporais de períodos distintos, é o caso deste estudo em que as séries obtidas no oeste do Estado de São Paulo são posteriores àquelas obtidas no leste no Estado. A técnica gráfica utilizada aqui procura aplicar uma suavização da densidade do núcleo de dados de umidade absoluta, de modo a gerar uma curva formalmente comparável à tendência sazonal. O polinômio interpolador utilizado para se chegar a

esta curva é um polinômio de terceira ordem, obtido pelo procedimento denominado Savitzky-Golay (WILKS, 2006).

Breve caracterização das localidades

O Oeste Paulista é a mais ocidental de todas as regiões do Estado de São Paulo e está localizada na confluência do vale do rio Paranapanema com o vale do rio Paraná. A cidade mais populosa na área estudada é Presidente Prudente (22°07'47"S, 51°24'31"W), situada a aproximadamente 600 km do Oceano Atlântico e localizada a aproximadamente 430 m acima do nível do mar. Abrange uma área municipal de aproximadamente 562 km², onde vivem mais de 220 mil habitantes (IBGE 2015) adensados no interior de uma malha urbana de cerca de 30 km².

O Leste Paulista é a mais oriental de todas as regiões do Estado de São Paulo e localiza-se na faixa delimitada pelos vales do rio Ribeira de Iguape, do rio Tietê, do rio Paraíba do Sul e o litoral. A cidade mais populosa na área estudada é São Paulo (23°33'35"S, 46°43'55"W), situada a aproximadamente 60 km do Oceano Atlântico e localizada a aproximadamente 770 m acima do nível do mar.

A Figura 1 mostra a localização do Estado de São Paulo, da cidade de Presidente Prudente e da cidade de São Paulo, onde é realizado este estudo. Os principais aspectos da superfície do terreno na área urbana de Presidente Prudente são destacados na Figura 1a, com ênfase à micro bacia do córrego do Veado (Fig.1b), em cuja vertente sul localiza-se a estação meteorológica. A topografia foi amostrada e georreferenciada durante uma campanha em 2012.

Figura 1. Localização geográfica de São Paulo, da cidade de Presidente Prudente, da cidade de São Paulo e topografia amostrada em metros acima do nível do mar para a área urbana de Presidente Prudente (a) e para a bacia do córrego do Veado (b) a noroeste da área urbana amostrada em Presidente Prudente, em cuja vertente sul localiza-se a Estação Meteorológica (MS) da UNESP de Presidente Prudente.

Experimentos realizados

Uma campanha tem sido realizada para coletar dados, a partir de março de 2015. Os experimentos são realizados em uma determinada localidade de Presidente Prudente, a estação meteorológica da FCT-UNESP (Fig.2a). A estratégia utilizada foi instalação de um anemômetro sônico (modelo CSAT3, Campbell Scientific Inc. (CS), Logan, Utah, USA) sobre o edifício sede da estação a uma altura de 4 m acima do chão (Figs.2c). A partir de março de 2016 o anemômetro (CS) foi removido, em seu lugar foi instalado um saldo-radiômetro (modelo NR-LITE-2, Kipp & Zonen (KZ), Amsterdam, Nederland), um pirgeômetro (modelo CGR4 (KZ)) e um termo-higrômetro (modelo HC2S3, Vaisäla (Va), Helsinki, Finland) (Fig.2b). A localidade é georreferenciada por um receptor de posição geográfica (modelo GPS16X-

HVS, Garmin International (GI), Lenexa, Kansas, USA).

Outra campanha, anterior a esta, foi realizada entre 1997 e 2006 na cidade de São Paulo. Um termo-higrômetro (Va) similar ao utilizado em Presidente Prudente permaneceu instalado e operando continuamente na plataforma radiométrica do IAG-USP sobre o edifício sede do Instituto a uma altura de 20 m acima do chão (Oliveira et al., 2002).

Séries temporais de dados para a umidade absoluta em Prudente e em São Paulo e a direção do vento em Prudente são utilizadas neste estudo. Os dados foram adquiridos automaticamente, em ambas as campanhas, com um sistema de aquisição de dados modelo CR3000 (CS) em Prudente e modelo CR-23X (CS) em São Paulo. Em ambas as campanhas os dados são adquiridos a uma

frequência de 0,2 Hz e armazenados em intervalos de 5 min.

Figura 2. Estação meteorológica na FCT/UNESP (a), saldo-radiômetro, pirgeômetro, termo-higrômetro (b) e anemômetro sônico (c) instalados e operando.

Análise

Uma prova da existência de monção em São Paulo pode ser obtida por meio de observação das variações da umidade absoluta. Identifica-se a existência de três perturbações periódicas. A primeira com frequência diária e amplitude da ordem de 4 hPa a 10 hPa, associada ao ciclo de desenvolvimento diurno e colapso noturno da camada de mistura (Fig.3a). A segunda com frequência em torno de 10 dias e amplitude da ordem de 8 hPa a 15 hPa, associada ao ciclo baroclínico de passagem dos anticiclones provenientes de latitudes médias (Fig.3b). E, finalmente, uma terceira com frequência anual e amplitude da ordem de 10 hPa. Esta terceira perturbação, percebida no valor médio da umidade absoluta, é a monção. Em torno do equinócio de outono começa a remoção de umidade da atmosfera, com queda marcante e indubitável no mês de abril, é o início da estação seca. A secagem da atmosfera aprofunda-se nos meses seguintes até julho, com mínimos absolutos especialmente no período da tarde estendendo-se até o mês de agosto. Tem começo então a lenta recuperação da umidade atmosférica que só será percebida nos meses seguintes, inicia-se a estação úmida. É notável a diferença entre o início da estação seca e o início da estação úmida. A estação seca inicia-se com o desaparecimento quase que repentino do conteúdo de vapor d'água antes dissolvido no ar. Por outro lado, no início da estação úmida, a recuperação deste conteúdo de água se dá de forma lenta, quase imperceptível, em uma relação linear com o decorrer dos dias.

A Figura 3 traz à luz a diferença profunda do ciclo diário da umidade no leste e no oeste do Estado de São Paulo. A perturbação de primeira ordem indica uma oscilação em torno de um mesmo valor, 13 hPa, porém, com amplitude de apenas 4 hPa no leste e amplitude maior de 10 hPa no oeste. A umidade do ar recupera-se no fim do dia e início da noite no leste. Mas no oeste a secagem do ar é vertiginosa e a recuperação lenta, leva horas noite adentro até a madrugada. A amplitude diária máxima observada no oeste é da mesma ordem de grandeza que a amplitude dos valores médios associada ao ciclo de monção. De modo geral, estima-se a secagem observada em ambas as localidades a partir do período da manhã, como efeito do crescimento da camada de mistura que transporta o ar úmido da superfície para o topo da camada limite, trazendo ao seu lugar ar mais seco proveniente do topo da camada em contato com a atmosfera livre. Percebe-se uma recuperação rápida da umidade no leste em torno do pôr do sol, inclusive com valor superior ao pico da manhã associada à evapotranspiração. Este pico no fim do dia pode ser efeito de uma brisa marítima, tendo-se em vista a proximidade ao oceano, como também poderia ser efeito antrópico da combustão veicular que eliminaria quantidades não desprezíveis de água em uma metrópole densamente congestionada, mas, levando-se em conta a relativa similaridade com a recuperação mais tímida que também ocorre ao mesmo horário no oeste paulista, deve ser fundamentalmente efeito da estratificação atmosférica em baixos níveis que tem andamento logo após o colapso da camada de mistura.

Na Figura 4 as variações descritas na Figura 3 podem ser observadas de modo integrado para um

ciclo sazonal completo, onde são tomados os valores médios horários, mês a mês, durante um período de nove anos para o leste. Com isto, obtém a caracterização do ciclo diário para cada um dos meses do ano, acompanhados da variação observada. No oeste ainda não há um banco de dados tão extenso, porém, observando-se a curva suavizada (Fig.5a) para o ano de 2016, nota-se a similaridade entre ambas as localidades. A mesma ruptura na evolução da umidade atmosférica observada para o mês de abril e, posteriormente, a recuperação intermitente entre agosto, setembro e outubro.

Também à análise sazonal é agregada a direção do vento, a partir de um registro bem documentado com o uso de anemômetro sônico no oeste para o ano de 2015 (Fig.5b). Nota-se que, além do ciclo bastante evidente da umidade atmosférica, há também um ciclo nítido na direção do vento observado, levando-se a crer nesta escala de análise tratar-se de monção. Porém, uma monção não com reversão de 180° no giro do vento conforme se observa no caso indiano, mas uma monção com reversão de 90° no giro do vento. Este giro apenas parcial do vento parece ser suficiente e coerente ao considerar-se a localização do Estado de São Paulo em relação ao oceano e ao continente ao redor (Figs.5c,d,e). A linha da costa de São Paulo recorta-

se de fato em torno da direção ENE-WSW. Percebe-se que o vento sopra preferencialmente de E, assim como no caso indiano, com ligeira tendência a NE na estação seca. Isto faz com que ar seco do interior do continente (Minas Gerais) seja trazido para São Paulo. No mês da ruptura (abril) o vento inicia o seu suave giro para o N, passando a trazer ar mais úmido de porções cada vez menos cobertas por terra. Até que enfim, no ápice da estação úmida (janeiro e fevereiro) o vento completa seu giro de 90° e passa a soprar quase que diretamente do oceano, para a maior parte do Estado de São Paulo.

O vento representado no leste é uma extrapolação do vento observado a oeste (Fig.5f), em que se procura manter o encadeamento da circulação do ar em relação a um anticlone hipotético de latitudes médias que se desloca até as latitudes próximas a São Paulo. A orientação do vento predominante observado, soprando do quadrante SE para o quadrante NW, justamente durante os meses mais quentes, de maior insolação, também se concilia com a ideia do fluxo de ar que sopra de uma superfície mais fria, coberta por água, em direção a uma superfície mais aquecida, coberta por terra.

Figura 3. Variação diária e mensal da umidade absoluta no ano de 2016 em Presidente Prudente (linha contínua) e no ano de 2005 na cidade de São Paulo (linha pontilhada), registrada durante um único dia de agosto (a) e durante todo o mês (b).

Figura 4. Variação anual do ciclo diário da umidade absoluta, baseada nas médias mensais dos valores horários observados no IAG. As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

Figura 5. Circulação de monção representada pela umidade absoluta (a) e pela direção do vento (b). Abaixo, representação esquemática das três fases da circulação, estação úmida (c), transição (d), estação seca (e) e a composição das três fases (f). As setas na cidade de São Paulo são uma extrapolação do vento observado em Presidente Prudente, ligeiramente desviado à esquerda, em suposição à presença de um anticiclone sobre o oceano. A orientação da circulação de monção varia durante o ano de SSE, para ESE e ENE, entre abril e agosto, em um giro anti-horário, de ENE, para ESSE e SSE, entre setembro e fevereiro, em um giro horário.

Conclusões

Com os resultados e argumentos apresentados demonstra-se que no caso de São Paulo há monção, corroborando a ideia original de Adalberto Serra. A monção deve ser compreendida em relação à umidade atmosférica absoluta, ou seja, em relação ao conteúdo de vapor d'água no ar e, não, em relação apenas ao excedente que precipita da atmosfera.

Existem outras formas de medir a umidade absoluta, além da pressão parcial de vapor d'água presente na atmosfera. Por exemplo, a razão de mistura, com a qual se acredita que se passe algo semelhante àquilo descrito neste artigo. O inconveniente de se trabalhar com a razão de mistura é a necessidade de registros sistemáticos da pressão atmosférica. Todavia, independente da variável que se utilize para representar a umidade absoluta, deve-se ter clareza ser este o parâmetro adequado na definição da transição entre as estações úmida e seca ou vice-versa. De fato, não existe uma estação seca, o que existe é uma estação menos úmida.

A noção de que existe monção em São Paulo, com fluxo predominante de SSE na fase mais úmida, também esclarece que a fonte de água que abastece a atmosfera é o oceano e, consequentemente, desmistifica a ideia de que o principal manancial seria a floresta amazônica. No mesmo sentido do fluxo bandeirante, ao qual um dia Raposo Tavares partiu de Porto Feliz e alcançou Belém do Pará.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fornecer suporte financeiro (proc. no. 2011/08520-8) e aos revisores anônimos cujos comentários ajudaram a melhorar este artigo.

Referências

- Azevedo, T. R., 2002. Precipitação na cidade de São Paulo em função da atividade urbana. Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, PR.
- Dias, M. A. F. S.; Machado, A. J., 1990. As circulações locais na Grande São Paulo. Anais do VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Salvador, BA.
- Dias, M. A. F. S.; Machado, A. J., 1997. The role of local circulations in summertime convective development. *Boundary-Layer Meteorology* 82, 135-157.
- Gan, M.; Rodrigues, L. R.; Rao, V. B., 2009. Monção na América do Sul. *In: Cavalcanti, I. F. A. et al (Orgs.) Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 297-316.
- Holanda, S. B., 1945. Monções e capítulos de Expansão Paulista. 2ª ed. São Paulo: Companhia das Letras.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. Disponível em < <http://www.censo2014.ibge.gov.br/> >. Acessado em 3 de julho de 2015.
- Oke, T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*. 2.ed. London: Routledge.
- Oliveira, A. P. de; Machado, A. J.; Escobedo, J. F.; Soares, J., 2002. Diurnal evolution of solar radiation at the surfasse in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theoretical and Applied Climatology* 71, 231-249.
- Serra, A. L.; Ratisbona, R. L., 1942. As massas de ar da América do Sul. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Serviço de Meteorologia.
- Wallace, J. M.; Hobbs, P. V., 2006. *Atmospheric science – an introductory survey*. 2nd edition. London: Academic Press.
- Wilks, D. S., 2006. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd edition. London: Academic Press.