

# Identificação dos sistemas atmosféricos responsáveis por inundações e deslizamentos no município de Belo Horizonte: análise dos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013

Prof. Dr. Wellington Lopes Assis  
Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Profa. Dra. Maria Giovana Parizzi  
Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais  
Samuel Matos Ribeiro  
Bolsista FAPEMIG, Universidade Federal de Minas Gerais

## Resumo

Este trabalho teve como objetivo identificar os sistemas atmosféricos responsáveis pelos eventos pluviométricos extremos ocorridos no município de Belo Horizonte (MG) nos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013. Esses sistemas foram identificados utilizando-se a técnica da análise rítmica, subsidiada por imagens de satélite, cartas sinóticas e informações das estações meteorológicas de superfície. Com base nos dados horários, adquiridos em dezoito pontos amostrais distribuídos nas nove regionais do município, foram confeccionados mapas com os acumulados mensais de precipitação. Como objetivo específico, foi realizado o mapeamento da precipitação acumulada mensal, correlacionando os cartogramas com as informações obtidas junto à Coordenadoria Estadual de Defesa Civil de Minas Gerais. Os resultados apontaram a Zona de Convergência do Atlântico Sul e as Linhas de Instabilidade como os principais sistemas atmosféricos responsáveis pela ocorrência de alagamentos, inundações e deslizamentos na capital mineira durante o período analisado.

**Palavras-chave:** eventos pluviométricos extremos, enchentes e deslizamentos, Belo Horizonte.

## Abstract:

*This study aimed to analyze extreme rainfall events that occurred in the city of Belo Horizonte (MG) in the following rainy periods: 2011-2012 and 2012-2013. The weather systems responsible for high levels of precipitation were identified by using satellite images, synoptic maps and rhythmic analysis. Based on hourly data, acquired in eighteen sampling points distributed in the nine regions of the county, a map was made with the accumulated monthly rainfall. The mapping of the monthly rainfall, which was the specific objective of the study, was made by correlating the maps with the information obtained from the of Civil Defense of Minas Gerais State. The results showed South Atlantic Convergence Zone and the Squall Lines as the most important weather systems. They were responsible for the occurrence of floods, landslides and floods in the state capital.*

**Keywords:** extreme rainfall events, flooding and landslides, Belo Horizonte.

Recebido 06/2013  
Aprovado 09/2013

assisw@gmail.com  
giece@uaigiga.com.br  
samuelmribeiro@gmail.com

## Introdução

O estudo dos impactos pluviiais concentrados nas cidades tropicais tem se destacado pela importância das consequências sociais e econômicas, decorrentes da precariedade ou mesmo da falta de adequação da infraestrutura urbana ao ambiente natural onde está localizado o sítio urbano. A maioria desses refere-se à ocorrência de enchentes, inundações, alagamentos e deslizamentos<sup>1</sup> na atuação de eventos meteorológicos extremos.

No meio científico, há um consenso de que sobre as cidades são criados padrões de circulação atmosférica específicos responsáveis por alterações nas características das precipitações, tanto nos totais acumulados como na distribuição espacial. Essas mudanças variam muito, de acordo com o porte da cidade, das funções urbanas desempenhadas e dos ritmos atmosféricos associados a essas transformações. Embora o teor de umidade relativa do ar seja menor dentro do tecido urbano, especialmente em áreas desprovidas de vegetação ou lâminas d'água, alguns estudos apontaram para um aumento nos totais pluviométricos em cidades de porte metropolitano (AZEVEDO, 2002; LANDSBERG, 1981; LOWRY, 1998; THIELEN; GADIAN, 1997). Porém, nem sempre é possível estabelecer uma relação direta entre urbanização e aumento nas chuvas, pois fatores como topografia e sistemas sinóticos influenciam esse parâmetro a ponto de minimizar, ou mesmo anular, os efeitos antrópicos.

Os eventos pluviométricos extremos recorrentes no verão tropical são responsáveis por grandes transtornos no meio urbano em várias regiões do Brasil. No município de Belo Horizonte não é diferente, sendo que as condições de irregularidade topográfica do sítio e a atuação de sistemas atmosféricos instáveis, associadas à intensa ocupação e impermeabilização do solo, reproduzem ano após ano a ocorrência de enchentes, inundações, alagamentos e deslizamentos. Esses problemas são agravados pelo crescimento desordenado da metrópole belo-horizontina, principalmente em regiões com pouca ou nenhuma infraestrutura urbana. Anualmente são registrados, entre os meses de novembro e fevereiro, transtornos relacionados às chuvas intensas. Nesse período, aumentam os riscos de tragédias para a população, principalmente para as famílias que ocupam de forma irregular as vertentes da Serra do Curral e os fundos de vales das bacias hidrográficas do Ribeirão Arrudas e do Córrego do Onça.

Em dezembro de 2011, os totais pluviométricos superaram a Normal Climatológica de 1961 a 1990 (292,0mm, INMET, 2009) em 70,3%, alcançando o acumulado mensal de 789,4mm e estabelecendo um novo recorde histórico para esse mês. Em decorrência disso, vários casos de alagamentos, enchentes, inundações e deslizamentos foram registrados pela Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Minas Gerais (CEDEC)<sup>2</sup>.

Este trabalho teve como objetivo identificar os sistemas atmosféricos responsáveis pelos eventos pluviométricos extremos ocorridos no município de Belo Horizonte (MG) nos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013. Como objetivo específico, foi realizado o mapeamento da precipitação acumulada mensal para os respectivos períodos chuvosos, correlacionando os cartogramas com as informações obtidas junto à CEDEC. Esse procedimento permitiu conhecer a distribuição espacial das chuvas e as interações entre topografia-morfologia e o uso e ocupação do solo nos totais pluviométricos mensais.

O estudo dos impactos pluviiais concentrados nas cidades tropicais tem se destacado pelas recorrentes consequências sociais e econômicas provenientes da precariedade ou mesmo da falta de

<sup>1</sup> Enchente é a elevação do nível d'água no canal de drenagem em função do aumento da vazão, atingindo a cota máxima sem ocorrer extravasamento. Já inundação representa o transbordamento das águas dos cursos d'água, alcançando as planícies de inundação ou várzeas. Os alagamentos são caracterizados como acúmulo ou represamento momentâneo de águas em determinados locais do tecido urbano, causados por deficiência no sistema de drenagem. Os deslizamentos são identificados como processos de movimentos de massa envolvendo materiais que recobrem as superfícies das vertentes (solos, rochas e cobertura vegetal) sob a ação direta da gravidade. No período analisado, esses movimentos foram potencializados pelo acúmulo excessivo de água no solo. Segundo Tominaga et al. (2009), o termo deslizamento tem diversos sinônimos de uso mais generalizado, como queda de barreira, escorregamento, desbarrancamento, os quais equivalem ao *landslide* da língua inglesa.

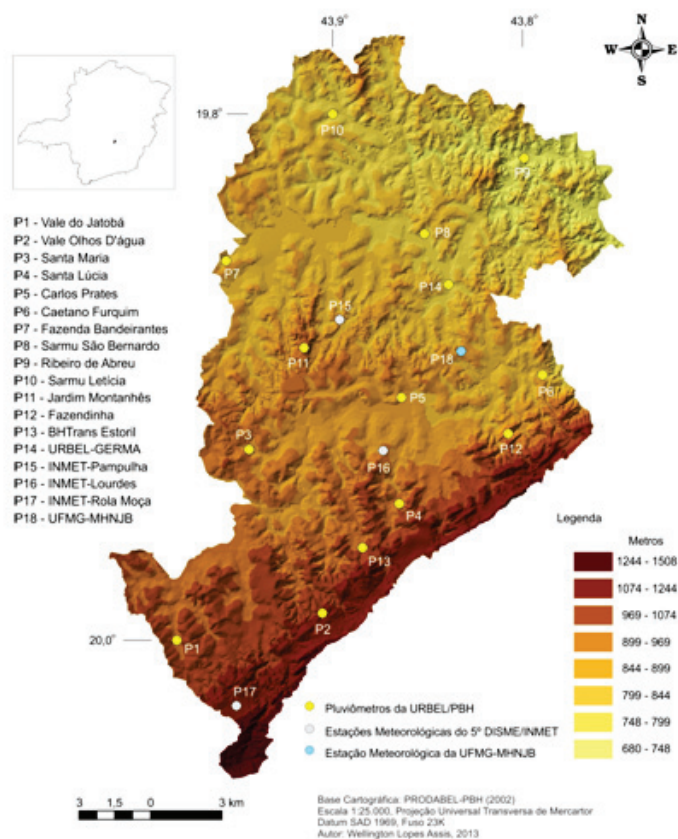
<sup>2</sup> Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br>>.

adequação da infraestrutura urbana. Dessa forma, identificar e entender a dinâmica atmosférica durante o período chuvoso é de suma importância para subsidiar os órgãos públicos com informações sobre a espacialização da precipitação. Essas poderão contribuir para aprimorar a gestão e atuação da Defesa Civil durante a ocorrência dos eventos extremos, bem como auxiliar na ação preventiva.

## Materiais e métodos

Para atingir os objetivos propostos, foram utilizados dados horários dos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013 das seguintes estações meteorológicas: três estações oficiais pertencentes ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (5ºDISME/INMET)<sup>3</sup>, uma convencional (P16) e duas automáticas (P15 e P17); quatorze pluviômetros datalogger (P1 a P14) da Companhia Urbanizadora da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (URBEL/PBH)<sup>4</sup> e informações da estação automática localizada no Museu de História Natural e Jardim Botânico (MHNJB)<sup>5</sup> da UFMG (P18), totalizando dezoito pontos amostrais (FIG. 1). O período chuvoso foi delimitado entre os meses de outubro e março. Segundo a análise do balanço hídrico mensal (FIG. 2), calculado a partir dos dados das Normais Climatológicas de 1961 a 1990 (INMET, 2009), esses meses não possuem déficit hídrico.

Figura 1 Localização das estações meteorológicas e pluviométricas no município de Belo Horizonte/MG.



<sup>3</sup> Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>.

<sup>4</sup> Disponível em: <<http://www.teleaneel.com.br/index.php>>.

<sup>5</sup> Disponível em: <<https://www.hobolink.com>>.

Entre os dias 01 e 29 de dezembro de 2011, não foram utilizados os dados do ponto 18, uma vez que a estação meteorológica instalada neste local entrou em operação somente no dia 30/12/2011. Ressalte-se que, devido às falhas apresentadas em determinados dias nos pluviômetros da URBEL/PBH, alguns pontos não foram utilizados na confecção dos cartogramas mensais (TAB. 1). Entretanto, em função da proximidade desses locais com outras estações meteorológicas e do método de interpolação utilizada (RBF), ainda assim foi possível obter a espacialização do acumulado mensal.

Figura 2 **Balanco hídrico mensal do município de Belo Horizonte/MG para o período de 1961 a 1990.**

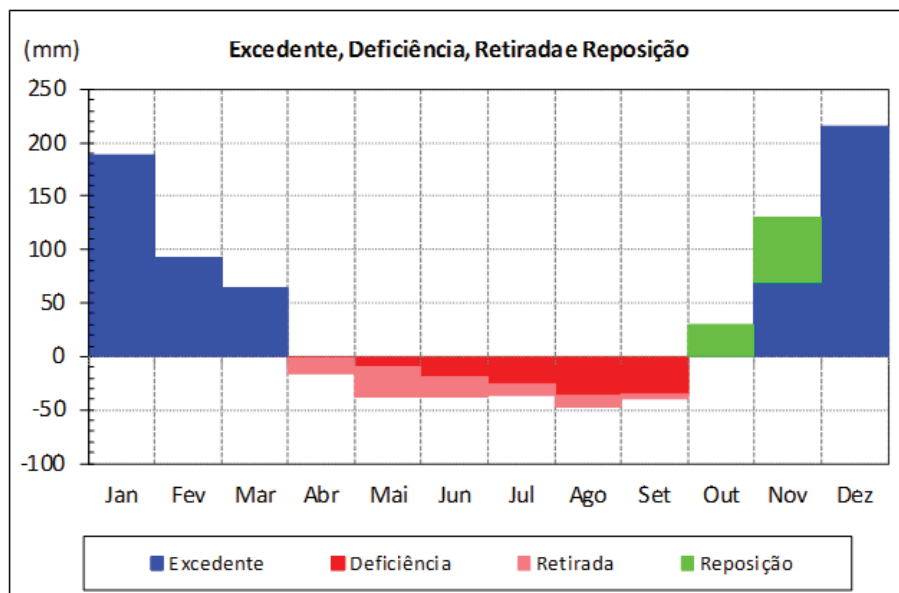


Tabela 1 **Pluviômetros que apresentaram falhas**

Mês	2011	2012	2013
Jan		P7, P12	P5
Fev		P12, P13	P5
Mar		P12, P13	P5
Out	P10, P11	P5, P6, P10	
Nov	P11	P5, P6, P14	
Dez	P12	P18	
Dados não utilizados			

A caracterização dos tipos de tempo e a análise diária da sucessão dos estados atmosféricos observada no período amostral foram realizadas tendo como instrumental teórico-metodológico os gráficos de análise rítmica (MONTEIRO, 1971). Como subsídio à interpretação da dinâmica atmosférica, utilizaram-se as seguintes ferramentas: cartas sinóticas (1000mb) de 00h e 12h UTC, elaboradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)<sup>6</sup>, cartas sinóticas de superfície (1000mb) e altitude (250mb) de 00h, 06h, 12h e 18h UTC, confeccionadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)<sup>7</sup>, e imagens meteorológicas do satélite GOES-12 (Infra 4) dos referidos horários sinóticos, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)<sup>8</sup>. Dessa forma, foi possível identificar os sistemas atmosféricos que atuaram no município durante os dois períodos chuvosos, relacionando-os com as ocorrências da Defesa Civil.

Todos os dados coletados em campo foram organizados em planilhas no *software* Excel e contabilizados em eventos horários, diários e mensais. Entretanto, como nem todas as estações disponibilizavam as informações de modo horário, optou-se pelo total acumulado diário como critério de classificação da precipitação.

Precipitação intensa foi entendida neste trabalho como chuva extrema caracterizada pela duração e distribuição têmporo-espacial crítica para uma determinada área, ou bacia hidrográfica, no município. Nesses eventos, foi registrado um grande volume de água precipitada em um curto intervalo de tempo, causando prejuízos materiais e humanos consideráveis. Como exemplo destacam-se as precipitações observadas entre os dias 15 e 19/12/2011, que contribuíram para a ocorrência de alagamentos, inundações e deslizamentos em diversos pontos da cidade.

Num segundo momento, importou-se a tabela com dados da precipitação acumulada mensal dos pontos amostrais com suas respectivas coordenadas geográficas no *software* MapInfo 10. Em seguida foram criadas *shapes* a partir da ferramenta *Universal Translator*, para a confecção dos cartogramas de base. O *software* ArcGis 10 foi utilizado para os testes de interpolação e geração dos mapas mensais. Essas representações foram necessárias, uma vez que facilitaram a análise da distribuição espacial das chuvas.

A base cartográfica utilizada, em especial as informações altimétricas e as divisões administrativas das regionais e bairros, foi elaborada a partir dos dados produzidos pela Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte S.A. (PRODABEL, 2001) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1979). Utilizaram-se cartas topográficas e plantas cadastrais produzidas por esses órgãos nas escala de 1:25.000 e 1:10.000. Todas as informações encontram-se georreferenciadas em coordenadas planas no sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM).

Para gerar as superfícies estatísticas que aproximassem a variação espacial da precipitação mensal com os parâmetros altimétricos e morfométricos, foi necessário realizar interpolações. Foram testados quatro métodos matemáticos de interpolação, utilizando a ferramenta *Geoestatistical Analyst* do *software* ArcGis/ArcMap 10, a saber: *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Ordinary Kriging* (KRI), *Radial Basis Functions* (RBF) e o *Local Polynomial Interpolation* (LPI). Em todos se empregou o raio de busca esférico, dividido em quadrantes, para a seleção das amostras. Por se tratar da espacialização do total mensal da precipitação, foram incluídos os oito vizinhos mais próximos ao ponto de origem, numa tentativa de minimizar discrepâncias entre os demais pontos amostrais.

<sup>6</sup> Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>>.

<sup>7</sup> Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/>>.

<sup>8</sup> Disponível em: <<http://satellite.cptec.inpe.br/home/>>.

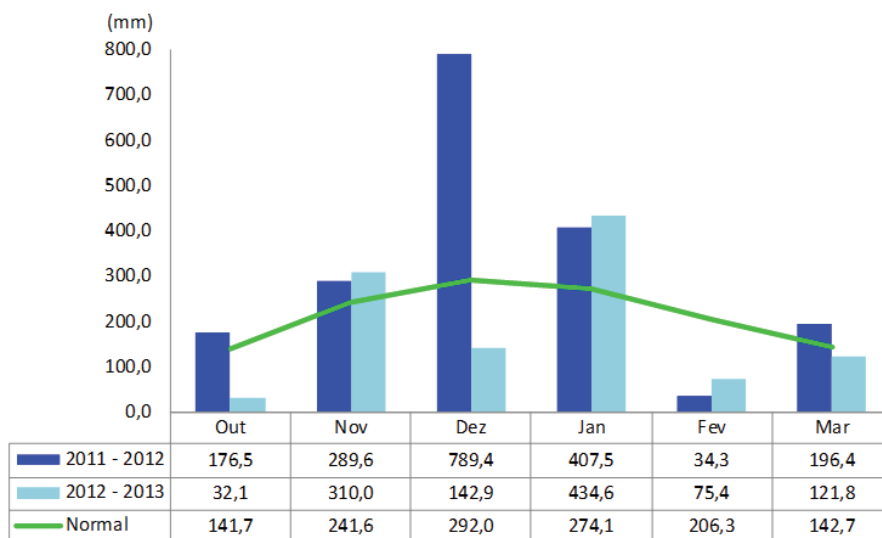
Após serem testados os quatro interpoladores, variando em cada modelo os parâmetros de decisão e estabelecendo diferentes intervalos, chegou-se à conclusão de que a Função Radial Básica (RBF) representou melhor a distribuição espacial da precipitação mensal no município. Três fatores respaldaram essa escolha: as isolinhas geradas neste modelo são mais suavizadas, seguindo as principais feições topográficas do sítio de Belo Horizonte; a ocorrência de círculos concêntricos (*bull eyes*) foi minimizada; e não existem falhas na superfície interpolada, sendo a aquela que apresentou menores distorções.

Na última etapa, todos os dados obtidos pelos pontos amostrais foram confrontados com as informações disponibilizadas pela CEDEC em seu site<sup>9</sup>. Porém, uma ressalva deve ser feita. Esse órgão disponibiliza somente os registros de chamadas públicas<sup>10</sup> para as ocorrências de alagamentos, enchentes, inundações e deslizamentos. É importante ressaltar que em algumas dessas chamadas não existe uma análise técnica. Por esse motivo, optou-se por considerar apenas os registros que puderam ser verificados e discriminados, seja pela participação presencial de algum membro da Defesa Civil (estadual ou municipal), seja por confirmações em jornais e outros meios de comunicação.

### Análise dos resultados e discussão

Os períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013 apresentaram acumulados pluviométricos mensais (FIG. 3) anômalos em relação às normais climatológicas de 1961 a 1990 (INMET, 2009). Em dezembro de 2011, o município de Belo Horizonte registrou os maiores totais mensais em 100 anos de coleta de dados (789,4mm). As condições atmosféricas para esse mês foram marcadas predominantemente por tipos de tempo instáveis, caracterizados por elevada nebulosidade e ocorrências de chuvas intensas e generalizadas sobre todo o tecido urbano. Entre os dias 15/12/2011 e 19/12/2011, a maioria dos pontos amostrais registrou mais da metade do total acumulado mensal esperado para o mês de dezembro (ASSIS *et al.*, 2012).

Figura 3 Precipitação acumulada mensal dos períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013 para o município de Belo Horizonte/MG.



<sup>9</sup> <http://www.defesacivil.mg.gov.br/>

<sup>10</sup> Segundo a CEDEC, chamadas públicas são contatos diretos feitos pela população via telefone ou internet para relatar a ocorrência de alagamentos, deslizamentos, inundações, entre outros desastres. Somente algumas chamadas são verificadas *in loco* por técnicos da Defesa Civil.

Segundo o resumo climatológico do 5º Distrito de Meteorologia (INMET, 2013), o início do período chuvoso 2012-2013 apresentou atraso de aproximadamente quinze dias para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). A estação começou com chuvas acima da normal climatológica em determinadas partes da RMBH, principalmente no mês de novembro. Entretanto, o mês de dezembro apresentou chuvas irregulares e déficit de precipitação, registrando o menor acumulado mensal dos últimos 35 anos. As chuvas aumentaram gradativamente ao longo do mês de janeiro, o volume acumulado superou em 138,3mm a normal climatológica. O veranico<sup>11</sup> de fevereiro afetou a reposição mensal de água no sistema, precipitou somente 75,4mm – bem abaixo da normal climatológica (206,3mm). Por outro lado, as chuvas ocorridas em março e na primeira quinzena de abril normalizaram as condições hídricas em quase toda a RMBH.

### Participação dos sistemas atmosféricos

As condições atmosféricas observadas em Belo Horizonte durante os períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013 foram controladas pela atuação dos seguintes sistemas sinóticos (FIG. 4 e 5): Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul (APAS)<sup>12</sup>, Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul Tropicalizado (APAS<sub>t</sub>), Frentes Frias (FF), Frentes Estacionárias (FE), Linhas de Instabilidade (LI), Zona de Convergência de Umidade (ZCOU) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Entretanto, os totais pluviométricos diários mais significativos ocorreram durante a atuação da ZCAS e das LI. Vale destacar que as Instabilidades Convectivas Locais (ICL) tiveram uma participação importante nas chuvas torrenciais nos meses de dezembro e janeiro.

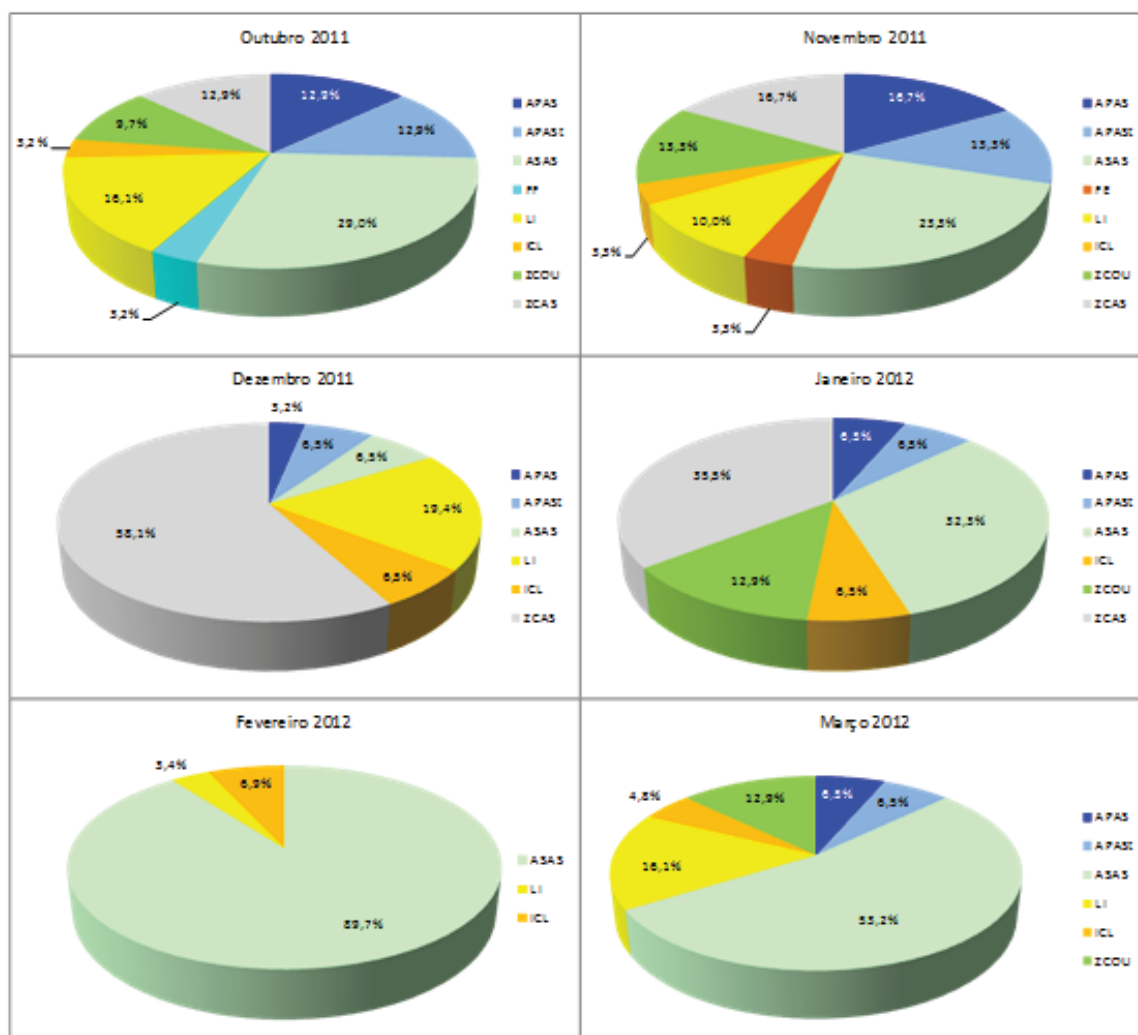
O *Anticiclone Subtropical Atlântico Sul* (ASAS) exerceu influência durante todo o período analisado na RMBH, especialmente nos meses de outubro, fevereiro e março. Esse sistema tem origem no centro de ação semipermanente relacionado à zona de alta pressão do Atlântico Sul. Quando localizado sobre áreas continentais, possui altas temperaturas e baixo teor de umidade nos níveis inferiores. A sua influência sobre os tipos de tempo no município se caracterizou por relativa estabilidade, gerada pelos movimentos subsidentes, elevadas temperaturas, baixa umidade relativa e ausência de precipitação. A permanência desse sistema por vários dias na região fez com que o mesmo adquirisse características de continentalização, elevando a temperatura e reduzindo ainda mais a umidade do ar.

Outro sistema sinótico que proporcionou condições de estabilidade atmosférica em Belo Horizonte foi o *Anticiclone Subpolar Atlântico Sul* (APAS). Oriundo do sul do continente, mais precisamente no extremo sul da região da Patagônia, atuou na meteorologia do município com maior periodicidade no início do período chuvoso, transição entre o outono e a primavera. Este sistema foi impelido em direção às baixas latitudes pela ação dos centros das baixas pressões tropicais e equatoriais, recebendo influências termodinâmicas do relevo sobre o qual se movimentou. No período analisado, o APAS atingiu o estado mineiro já em franco processo de tropicalização, apresentando temperaturas e o teor de umidade relativa aumentados. Entretanto, ainda foi responsável por pequenas quedas térmicas e reduzidos totais pluviométricos, ocasionando tipos de tempo amenos e estáveis nos meses de outubro e novembro. Em alguns dias de outubro, foi possível observar no período da manhã situações de inversões térmicas próximas à superfície, propiciando o acúmulo de poluentes e particulados nas regiões deprimidas e fundos de vale.

<sup>11</sup> Veranico consiste em um período de estiagem em pleno período chuvoso, acompanhado por calor intenso, forte insolação e baixa umidade relativa (NIMER; BRANDÃO, 1989; ASSAD *et al.*, 1993).

<sup>12</sup> Utilizou-se o termo Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul (APAS) para diferenciar esse sistema dos anticlones polares que têm origem no planalto antártico e que não ultrapassam, em situação de normalidade, as regiões de baixas pressões atmosféricas que circundam a zona de convergência antártica. O APAS trata-se do mesmo anticiclone polar migratório do tipo *Polar Outbreak High* (MARENGO *et al.*, 1997), originado em latitudes subpolares, descrito na literatura para caracterizar advecção de ar frio e acentuada queda de temperatura nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, principalmente durante o outono-inverno.

Figura 4 Participação dos sistemas atmosféricos no município de Belo Horizonte/MG durante o período chuvoso de 2011-2012.

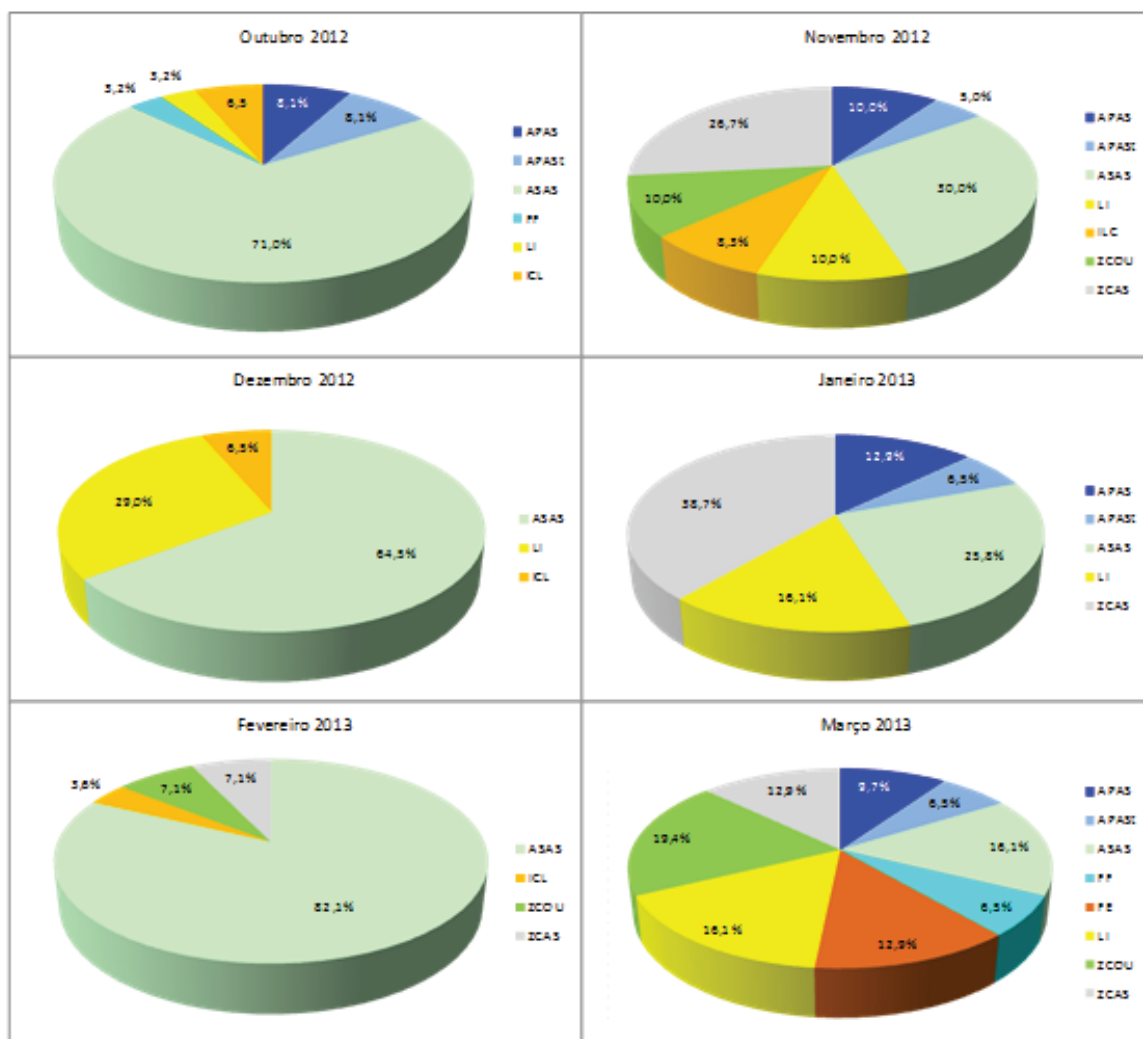


Os sistemas frontais, representados em grande parte pelas Frentes Frias (FF), antecederam as invasões do *Anticiclone Subpolar Atlântico Sul* (APAS) na RMBH. Esses sistemas fazem parte de ondas atmosféricas de larga escala, ondas baroclínicas<sup>13</sup>, e se formam no contato entre as massas de ar com propriedades termodinâmicas diferenciadas. Atuaram principalmente no início do período chuvoso, outubro e novembro. As FF avançaram em direção às latitudes mais baixas em forma de arco, impulsionadas pelo centro de alta pressão (APAS). Deslocaram-se preferencialmente no sentido sudoeste-nordeste, em direção ao oceano Atlântico. Esse deslocamento levou precipitação até o litoral SE da região Nordeste.

<sup>13</sup> Segundo Cavalcanti et al. (2009), são ondas cujo mecanismo de desenvolvimento ou manutenção está associado a instabilidade baroclínica, vulnerabilidade de um escoamento planetário representado pela corrente de jato a uma perturbação de escala sinótica e/ou subsinótica. Normalmente possuem escala horizontal da ordem de 1000 km e são acompanhadas de ventos fortes nos altos níveis na troposfera.



Figura 5 Participação dos sistemas atmosféricos no município de Belo Horizonte/ MG durante o período chuvoso de 2012-2013.



A passagem das frentes frias sobre Belo Horizonte foi acompanhada por turbulências, fortes mudanças na direção e velocidade dos ventos e, normalmente, intensas precipitações. De fato, as FF contribuíram para a ocorrência de chuvas durante a primavera e verão na capital mineira, especialmente quando associadas à atuação de *Linhas de Instabilidade (LI)* e da *Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)*. Após a passagem das frentes frias, o tempo no município tornou-se estável, com céu limpo e baixas temperaturas.

As *Linhas de Instabilidade (LI)* atuaram no município nos dois períodos chuvosos, especialmente nos meses de outubro, dezembro, janeiro e março. Esses centros de baixa pressão alongados tiveram sua participação associada à atuação de dois sistemas: passagem de frentes frias no litoral da região

sudeste e atuação da convecção tropical<sup>14</sup>. Foram responsáveis por significativos acumulados diários. Em sua atuação, registraram-se chuvas intensas e generalizadas com formação de cumulonimbus (Cb) agrupados e alinhados.

As *Instabilidades Convectivas Locais* (ILC) constituem um dos agentes causadores das chuvas do verão belo-horizontino, a maioria de caráter torrencial e de curta duração – conhecidas popularmente como “chuvas de verão”. Essas precipitações têm origem no intenso aquecimento basal nas áreas mais expostas à insolação da depressão periférica belo-horizontina, proporcionando instabilidades convectivas locais (ASSIS, 2010). No período em questão, ocorrem principalmente no verão e no interior da massa equatorial continental (mEc).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) atua em Belo Horizonte entre os meses de outubro e março, devido às condições de instabilidade proporcionadas pelas altas temperaturas do continente sul-americano observadas nessa época do ano (FIG. 6). A maior frequência foi registrada nos meses de novembro, dezembro e janeiro. Esse sistema de larga escala é formado pela associação entre os sistemas frontais frios (FF), oriundos do sul do país, e pela organização da convecção tropical, proveniente principalmente da região amazônica (ABREU, 1998; CAVALCANTI *et al.*, 2009)<sup>15</sup>. Na medida em que as FF avançam sobre o continente, ocorre o alinhamento dos centros de baixa pressão. Esse processo gera intensa nebulosidade com uma orientação predominante noroeste-sudeste no território brasileiro.

No domínio da ZCAS, ocorreram fortes eventos pluviais concentrados que chegam a durar entre 4 e 9 dias, acarretando inúmeros prejuízos às localidades com precária infraestrutura. As regiões consideradas de risco, em especial os bairros localizados nas proximidades da Serra do Curral e aquelas assentadas nos terraços dos ribeirões Arrudas e Onça, são as mais afetadas por este sistema<sup>16</sup>. No período em análise, os meses de novembro, dezembro e janeiro foram os mais críticos. Infelizmente, houve ocorrências de inundações e deslizamentos com vítimas fatais.

A *Alta da Bolívia* (AB) e a *Baixa do Chaco* (BC) atuam em Belo Horizonte de forma mais episódica e indireta, especialmente durante o verão, quando áreas de baixa pressão ficam fortificadas sobre o continente sul-americano<sup>17</sup>. O forte aquecimento convectivo na bacia amazônica durante o verão resulta na formação de baixas pressões próximas à superfície da região do Chaco e uma alta pressão nos níveis superiores da troposfera sobre a Bolívia (250mb). Os tipos de tempo observados na capital mineira sob o domínio desses sistemas foram de relativa instabilidade convectiva, proporcionada pelas altas temperaturas e elevados índices de umidade relativa.

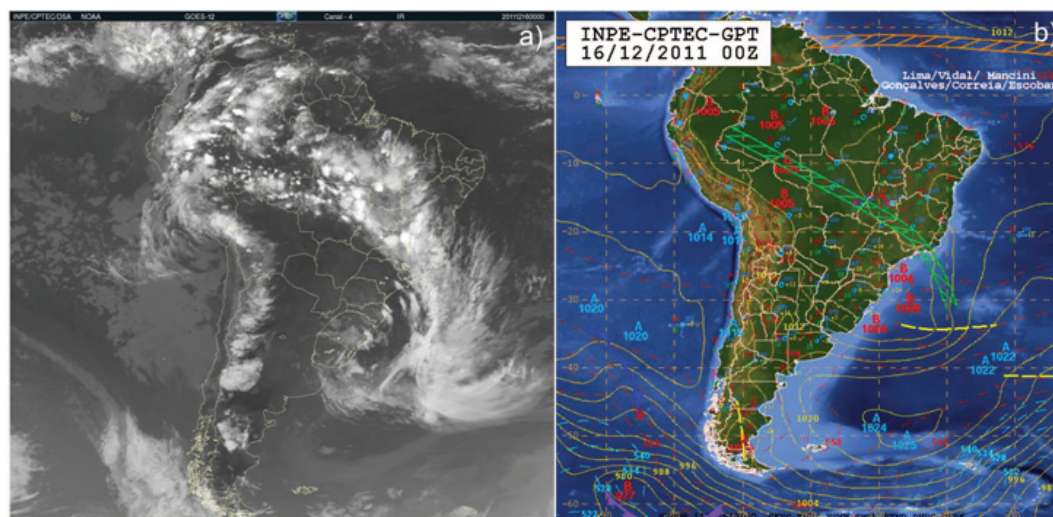
<sup>14</sup> As linhas de instabilidades são conhecidas na literatura estrangeira por *squall lines* e normalmente estão associadas ao movimento ondulatório dos sistemas frontais. Segundo Barry e Chorley (2010), depois de formadas, deslocam-se com extrema mobilidade numa velocidade de até 60 km/hora, embora possam permanecer estacionárias.

<sup>15</sup> A ZCAS pode ser perfeitamente identificada na composição de imagens de satélite, estendendo-se desde o sul da região Amazônica até a região central do Atlântico Sul. Segundo Abreu (1998), as frentes frias têm papel fundamental na organização, duração e intensificação do volume precipitado. Devido à intensa nebulosidade, bloqueando a radiação solar direta, e aos elevados índices de umidade no ar, a temperatura diminui consideravelmente – fenômeno popularmente conhecido como *invernada*.

<sup>16</sup> Estes locais possuem condições litoestratigráficas e topográficas desfavoráveis à ocupação.

<sup>17</sup> Segundo Cavalcanti *et al.* (2009), a localização e a intensidade da Alta da Bolívia e da Baixa do Chaco variam ao longo do ano. Durante o outono, ela se desloca para o norte do país, atingindo também a Venezuela e a Colômbia, retornando, no verão, para a Bolívia, depois de ter passado pelo oeste da bacia amazônica e Peru.

Figura 6 Atuação da ZCAS no Estado de Minas Gerais em 15 de dezembro de 2013 (16/12/2011- 00h Z). Em (a) observa-se intensa nebulosidade com orientação NW-SE, estendendo desde a bacia amazônica até o litoral da região Sudeste. Em (b) tem-se a carta sinótica de superfície mostrando a interação do sistema frontal com as linhas de instabilidades na formação da ZCAS. Fonte: INPE-CPTEC (2011).



### Distribuição espacial da precipitação

A análise dos resultados mostrou que a precipitação variou temporal e espacialmente entre os pontos amostrais durante os períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2012 (FIG. 7 e 8). Ao analisar a distribuição mensal das chuvas com o parâmetro topografia, foi possível observar uma relação entre rugosidade superficial e os totais pluviométricos elevados. Destaque para os meses de outubro (2012), novembro (2011 e 2012), dezembro (2011), janeiro (2012 e 2013), fevereiro (2012) e março (2013).

Os pontos amostrais sob a influência direta do alinhamento topográfico Serra do Curral/Serra do Rola Moça (1, 3, 9 e 13 – regionais Centro-Sul, Oeste e Barreiro), apresentaram significativos acumulados diários de chuva nos dois períodos analisados. Entretanto, as figuras 7 e 8 mostram somente os totais mensais. É importante ressaltar que, em alguns eventos horários, os pontos localizados na Depressão Periférica de Belo Horizonte (4, 6, 7, 11 e 15) registraram intensas precipitações. Os totais diários mais significativos ocorreram quando da atuação da ZCAS e das Linhas de Instabilidades.

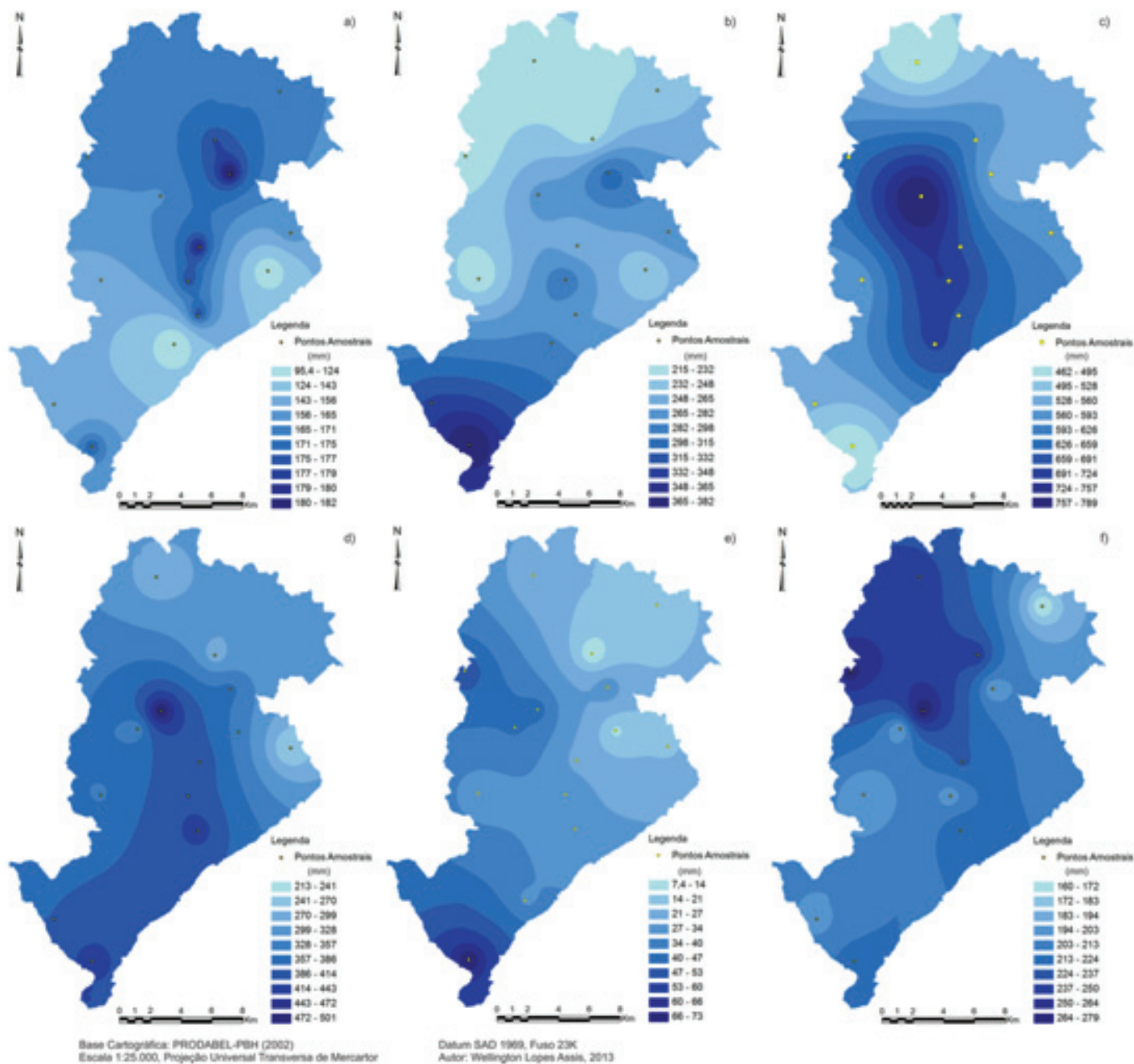
Entre outubro e novembro de 2011 (FIG. 7a e 7b), os maiores totais mensais foram registrados no contato da Depressão Periférica de Belo Horizonte com as serras do Quadrilátero Ferrífero, destaque para os pontos 14 (181,8mm/Out. 2011) e 17 (381,8mm/Nov. 2011). Em dezembro de 2011 (FIG. 7c) e janeiro de 2012 (FIG. 7d), as regionais Pampulha e Noroeste, localizadas na Depressão de Belo Horizonte, e as regionais Centro-Sul e Barreiro, assentadas em grande parte em colinas e escarpas de média a alta declividade, apresentaram acumulados mensais muito acima da normal climatológica – ponto 15 (789,4mm/Dez.), 16 (720,0mm/Dez.) e 18 (501,0mm/Jan.). As condições de tempo e os sistemas atmosféricos observados nesses meses apresentaram instabilidades e fortes chuvas torrenciais no final da tarde e início da noite.

O dia 15 de dezembro de 2011 destacou-se dos demais em função do elevado volume de chuva acumulado em 24 horas. Das dezoito estações utilizadas, sete registraram valores superiores a 100mm. Dentre essas, destacam-se os pontos 11 (165,2mm), 9 (149,8mm), 4 (124,2mm), 3 (121,0mm), 6 (115,2mm), 2 (110,6mm) e 13 (106,8mm). Essa quantidade expressiva de chuvas resultou em um elevado número de ocorrências registradas pela Defesa Civil, fatos amplamente divulgados pela imprensa. As ocorrências mais frequentes estavam relacionadas a inundações, alagamentos e deslizamentos.

Em fevereiro de 2012 (FIG. 7e), todos os pontos amostrais tiveram acumulados mensais bem abaixo da normal climatológica (188,4mm); o maior valor foi registrado no ponto 17 (73,0mm). Esse comportamento foi determinado pela presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que atuou fortemente em todo o mês, intensificando o veranico.

Em março de 2012, houve um ligeiro aumento nos totais pluviométricos pontuais em relação à normal, 35mm em média. As precipitações foram principalmente de caráter convectivo e se concentraram nas regionais Pampulha e Venda Nova (FIG. 7f). A topografia e o uso do solo observados nessas regionais facilitam o intenso aquecimento superficial nos dias mais quentes. Essa porção do município possui um relevo mais suavizado e com pouca obstrução à chegada efetiva da radiação solar. A presença da Lagoa da Pampulha também é outro fator que contribui para o aumento da instabilidade atmosférica local, existindo um aporte constante de umidade para a camada laminar.

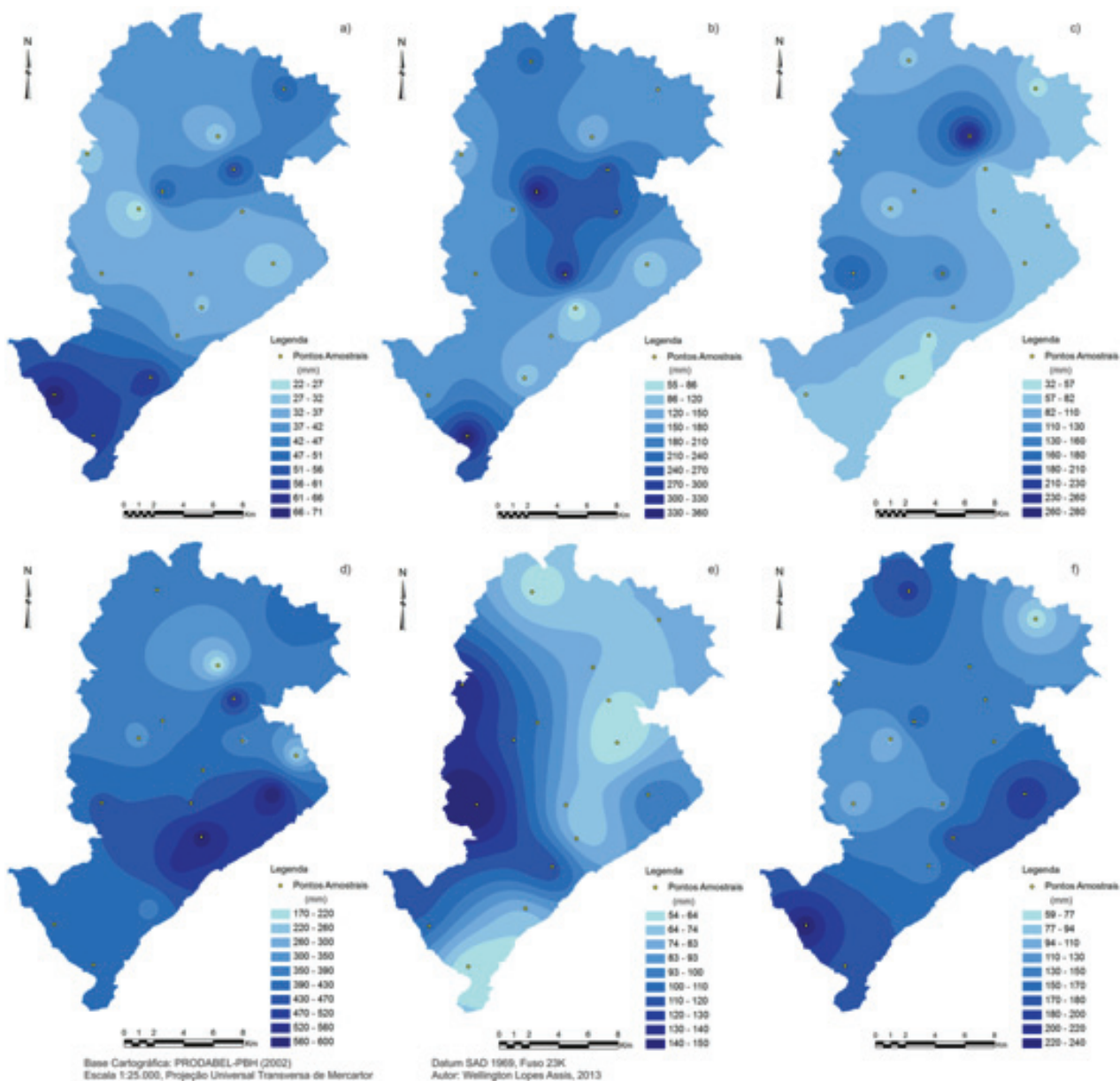
Figura 7 Distribuição espacial da precipitação no município de Belo Horizonte durante o período chuvoso 2011-2012: Out./2011 (a), Nov./2011 (b), Dez./2011 (c), Jan./2012 (d), Fev./2012 (e) e Mar./2012 (f).



Nos meses de outubro e novembro de 2012 (FIG. 8a e 8b), os maiores totais mensais foram registrados na regional Barreiro, no contato com a Serra do Rola Moça, e na regional Pampulha, nas

proximidades da Estação Ecológica da UFMG – destaque para os pontos 1 (70,8mm/Out. 2012), 17 (360,6mm/Nov. 2012) e 16 (345,8mm/Nov. 2012). A CEDEC registrou, entre os dias 04 e 15 de novembro, vários pontos de alagamentos no município, queda de árvores, desabamentos parciais de muros e cinco vítimas fatais.

Figura 8 Distribuição espacial da precipitação no município de Belo Horizonte durante o período chuvoso 2012-2013: Out./2012 (a), Nov./2012 (b), Dez./2012 (c), Jan./2013 (d), Fev./2013 (e) e Mar./2013 (f).



Dezembro de 2012 foi marcado por precipitações bem abaixo da normal climatológica (292,0mm). O motivo foi a participação de sistemas atmosféricos estáveis sob influência do ASAS. O maior acumulado para esse mês foi registrado no ponto 8 (281,8mm), regional Norte, e o menor no ponto 2 (32,0mm), porção nordeste da regional Barreiro (FIG. 8c).

Em janeiro de 2013, houve um aumento significativo nos totais mensais, destaque para os pontos 12 (602,0mm) e 4 (587,2mm), ambos localizados no contato com a Serra do Curral (FIG. 8d). A CEDEC registrou, nos dias 07 e 20 de janeiro, ocorrências de alagamentos em diversas avenidas e ruas nas regionais Oeste, Leste e Noroeste. Veículos foram arrastados pela força das águas e algumas famílias ficaram temporariamente isoladas. Apesar dos transtornos e prejuízos materiais, não foram registrados óbitos.

Em fevereiro de 2013, todos os pontos amostrais tiveram acumulados mensais abaixo da climatologia, o maior valor foi observado no ponto 3 (150,6mm), localizado na regional Noroeste. Esse comportamento foi determinado pela presença constante do ASAS em 82,1% dos dias. As três primeiras semanas de março (2013) foram marcadas pelo prolongamento do veranico, que teve início no mês anterior. Precipitações mais intensas só foram registradas na última semana. Segundo a CEDEC, em fevereiro e março não ocorreu nenhum óbito associado a inundações, enchentes ou deslizamentos.

De modo geral, nos dias em que as precipitações no município foram de baixa intensidade, ocasionadas essencialmente por instabilidades locais (ILC), os totais diários acumulados nas estações climatológicas oficiais (pontos 15, 16 e 17) superaram em poucos milímetros alguns pontos da área de estudo. Já nos eventos de grande intensidade, característicos de forte instabilidade convectiva e atuação de sistemas sinóticos (ZCAS, LI e FF), os totais pluviométricos nos pontos sob a influência direta do alinhamento topográfico Serra do Curral/Serra do Rola Moça (1, 3, 9 e 13) foram superiores. As regiões consideradas de risco, em especial as encostas e aquelas assentadas nos terraços dos ribeirões Arrudas e Onça, foram as mais afetadas pelas chuvas.

Os bairros localizados na porção leste das regionais Barreiro, Oeste e Centro-Sul possuem feições topográficas e morfológicas que favorecem a intensificação das instabilidades atmosféricas e aumento dos totais precipitados. O relevo é bastante irregular, apresentando variações altimétricas de 860m a 1240m em distâncias lineares inferiores a 800m. Somando-se a essas características, o tecido urbano aumenta a rugosidade superficial, pela presença de edificações com número elevado de pavimentos. Nos últimos anos, essas regionais passaram por profundas modificações no uso e ocupação do solo. Houve acréscimo significativo no número de habitações acima de oito andares e intensa impermeabilização da superfície com capeamento asfáltico.

### Considerações Finais

É importante ressaltar que os resultados aqui expostos não esgotam a discussão sobre o comportamento pluviométrico e a ocorrência de eventos extremos no município de Belo Horizonte, pois este trabalho analisa somente os períodos chuvosos de 2011-2012 e 2012-2013. No entanto, eles permitem extrair algumas considerações sobre a distribuição espacial da precipitação no tecido urbano da cidade.

Os maiores acumulados diários da precipitação foram observados durante a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e das Linhas de Instabilidades, resultando em diversas ocorrências

registradas pelos órgãos de defesa civil (estadual e municipal). Foi possível constatar a influência do relevo na intensificação, modulação e distribuição espacial das precipitações. Os bairros localizados no contato ou nas proximidades do alinhamento topográfico Serra do Curral/Serra do Rola Moça registraram os maiores totais diários (24h) e mensais de chuvas. Exceção a esse comportamento foi observada em alguns eventos horários nos pontos 15 e 18, localizados na Depressão Periférica de Belo Horizonte, sob influência de instabilidades convectivas locais.

A partir da apreciação dos casos mais significativos, escolhidos entre aqueles que maiores prejuízos trouxeram para os cidadãos, principalmente para a população em situação social e econômica vulnerável, evidenciou-se o aumento de alagamentos e inundações nas proximidades de avenidas e ruas localizadas em antigos terraços e fundos de vale. Um número significativo desses locais, hoje impermeabilizados, foi ocupado irregularmente.

Os resultados confirmaram as suposições dos modelos teóricos e empíricos de que os fatores sinóticos de larga escala são determinantes na ocorrência de chuvas intensas e persistentes (BARRY; CHORLEY, 2010; MONTEIRO, 1971). Entretanto, os condicionantes topográficos e o uso do solo potencializam os impactos das precipitações nos locais com graves problemas de infraestrutura e com deficiência na drenagem urbana (LOWRY, 1998; THIELEN; GADIAN, 1997; AZEVEDO, 2002).

Com base nos resultados apresentados nesta pesquisa, reforça-se a ideia de que o entendimento dos processos climáticos que afetam a vida nos grandes aglomerados urbanos deve merecer atenção dos gestores públicos. Essa afirmativa é válida tanto para a situação presente quanto no que diz respeito à previsão e ao planejamento, visando atenuar os impactos decorrentes dos eventos meteorológicos extremos.



## Referências

- ABREU, M. L. Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Geonomos*, Belo Horizonte, v. 4, n. 2, p. 17-22, dez. 1998.
- ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R.; SILVA, F. A. M. Veranicos na região dos cerrados brasileiros: frequência e probabilidade de ocorrência. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 28, n. 9, p. 993-1003, set. 1993.
- ASSIS, W. L.; RIBEIRO, S. M.; ABREU, M. L.; MARRA, J. F. Eventos pluviométricos extremos ocorridos no município de Belo Horizonte em dezembro de 2011. *Revista Geonorte – Edição Especial 2*, v. 1, n. 5, p. 1177-1188, 2012.
- AZEVEDO, T. R. Distribuição espacial da ocorrência dos maiores totais diários de precipitação na RMSP e arredores em função da intensidade relativa da atividade urbana. *GEOUSP – Espaço e Tempo*, São Paulo, n. 12, p. 89-104, 2002.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. *Atmosphere, weather and climate*. 9th ed. Oxon: Routledge, 2010. xvi, 516p.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 463p.
- COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL DE MINAS GERAIS – CEDEC. *Boletim diário com as ocorrências registradas no município de Belo Horizonte (MG) para os anos de 2011, 2012 e 2013*. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mg.gov.br>>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Carta topográfica de Belo Horizonte*. Rio de Janeiro, 1979. Escala 1:25.000, folha SE-23-Z-C-VI-3-A.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. *Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990* / Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes - Brasília. INMET, 2009. 465p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. *Resumo climatológico do período chuvoso 2012-2013* / Organizadora: Anete – Belo Horizonte, 5º Distrito de Meteorologia, Seção de Análise e Previsão do Tempo, 2013. 4p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) - CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC). *Síntese sinótica mensal de dezembro de 2011*. São José dos Campos, dez. 2011. 13p. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20466>>. Acesso em: jan. 2012.
- LANDSBERG, H. E. The urban heat island. In: *The urban climate*. v. 28. New York: Academic Press, 1981. 275p.
- LOWRY, W. P. Urban effects on precipitation amount. *Progress in Physical Geography*. London, v. 22, n. 4, p. 447-520, 1998.
- MARENGO, J.; CORNEJO, A.; SATYAMURTY P.; NOBRE, C.; SEA, W. Cold surges in the tropical and extratropical South America - The strong event in June 1994. *Mon. Wea. Rev.*, n. 125, p. 2759-2786, 1997.
- MONTEIRO, C. A. F. *Análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e chegadas para um programa de trabalho*. São Paulo, Série Climatologia Dinâmica I, USP-IG, 1971, 21 p.
- NIMER, E.; BRANDÃO, A. M. P. M. *Balanço hídrico e clima da região dos cerrados*. Rio de Janeiro: IBGE-DERNA, 1989. 162p.
- PRODABEL. *Base topográfica digital do município de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, 2001: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. Escala 1:5.000.
- THIELEN, J.; GADIAN, A. Influence of Topography and Urban Heat Island

Effects on the Outbreak  
of Convective Storms  
Under Unstable  
Meteorological  
Conditions: a Numerical  
Study. *Meteorological  
Applications*. v. 4, p. 139-  
149, 1997.

TOMINAGA, L.  
K.; SANTORO, J.;

AMARAL, R. (Org).  
*Desastres naturais:*  
conhecer para prevenir.  
São Paulo: Instituto  
Geológico/IMESP, 2009.  
196p.

**Agradecimentos:** à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do Projeto de Pesquisa CRA 00269-11, Edital Mudanças Climáticas, intitulado “Avaliação dos condicionantes climáticos do risco de enchentes e inundações no município de Belo Horizonte”; à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais, pelo auxílio à pesquisa denominada “Caracterização dos sistemas atmosféricos responsáveis por deslizamentos e enchentes no município de Belo Horizonte – MG”, Edital nº 12/2011, e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelos dados atmosféricos disponibilizados através do convênio nº D05/081/2008.