Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL VERTICAL DO VENTO EM IPERÓ (SÃO PAULO) COM O USO DE UM LIDAR DOPPLER

Characterization of the wind vertical profile in Iperó (São Paulo) with the use of a doppler lidar

Caracterización del perfil vertical del viento en Iperó (São Paulo) con el uso de un lidar doppler

Cássia Maria Leme Beu
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)
cassia.beu@gmail.com

Eduardo Landulfo
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)
elandulf@ipen.br

Resumo: Um lidar Doppler com alcance até 290 m operou continuamente por 1 ano no município de Iperó, interior de São Paulo. O lidar usado possui alta resolução vertical e temporal e estima além da velocidade e direção do vento horizontal, também a velocidade vertical do vento. O banco de dados gerado durante essa campanha experimental permitirá estudar fenômenos da Camada Limite Planetária, bem como validar modelos numéricos e auxiliar estudos de transporte e dispersão de poluentes. Neste trabalho é apresentada a caracterização do perfil vertical do vento e o ciclo anual entre Agosto/2017 e julho/2018.

Palavras-chave: Lidar Doppler. Camada Limite Planetária. Perfil Vertical do Vento.

Abstract: A Doppler lidar with a range up to 290 m operated continuously for 1 year in the municipality of Iperó, São Paulo State. This lidar has high vertical and temporal resolution and estimates beyond the speed and direction of the horizontal wind as well as the vertical speed of the wind. The database generated during this experimental campaign will allow the study the of Planetary Boundary Layer phenomena, as well as to validate numerical models and to assist studies of transport and dispersion of pollutants. This work presents the characterization of the vertical wind profile and the annual cycle between August/2017 and July/2018.

Keywords: Doppler Lidar. Planetary Boundary Layer. Vertical Wind Profile.

Resumen: Un lidar Doppler con alcance hasta 290 m operó continuamente por 1 año en el municipio de Iperó, interior de São Paulo. Este lidar tiene alta resolución vertical y temporal y además, él estima la dirección y velocidad del viento horizontal, también la velocidad vertical del viento. La base de datos generada durante esta campaña experimental permitirá estudiar fenómenos de la Capa Limite Planetaria, así como validar modelos numéricos y auxiliar estudios de transporte y dispersión de

contaminantes. En este trabajo se presenta la caracterización del perfil vertical del viento y el ciclo anual entre agosto/2017 y julio/2018.
Palabras-clave: Lidar Doppler. Capa Limite Planetaria. Perfil Vertical del Viento.

Submetido em: 30/11/2020
Aceito para publicação em: 20/01/2022
Publicado em: 24/02/2022

1. INTRODUÇÃO

Há várias décadas as técnicas de sensoriamento remoto tem contribuído para o desenvolvimento das ciências atmosféricas (TOMLINSON et al., 2011). Mais recentemente, a tecnologia lidar (acrônimo para LIght Detection And Ranging) vem sendo usada e tem sido bem aceita pela comunidade científica. O lidar pode ser usado para diversas aplicações, tais como: estudos de poluição, energia eólica, física da atmosfera, características das nuvens, aspectos da Camada Limite Planetária (CLP), segurança aeroportuária, entre outros. Cada aplicação está associada a um comprimento de onda diferente (WEITKAMP, 2006). O lidar de vento, também chamado lidar Doppler, estima a velocidade do vento a partir do efeito Doppler sobre o aerossol (partículas presentes na atmosfera). De forma geral, são aparelhos compactos, autônomos e de fácil operação, o que proporciona grandes vantagens em relação aos instrumentos tradicionais usados em estudos da CLP (radiossonda, balão cativo ou torres meteorológicas equipadas).

A CLP é a parte da atmosfera mais próxima à superfície e que responde diretamente às suas características (STULL, 1988). É na CLP, onde os movimentos são turbulentos, que se concentram as emissões (naturais e antropogênicas) provenientes da superfície. Apesar da sua importância para o transporte e dispersão de poluentes e qualidade do ar, a CLP, devido às suas características dinâmicas (ciclo diurno) e físicas (escalas espacial e temporal), é altamente variável de um local para outro e ao longo do tempo. Devido à sua complexidade, a modelagem da CLP é difícil, apresenta alto custo computacional e operacionalmente inviável. Uma alternativa à modelagem é a parametrização dos aspectos físicos a partir de dados observacionais e experimentos numéricos.

Por 1 ano, um lidar Doppler operou continuamente no município de Iperó (interior de São Paulo) para investigar características da CLP da região. As pesquisas atmosféricas em Iperó tiveram início nos anos 1990, com o chamado Projeto Iperó (IAG-USP, 2004) do qual resultaram diversas dissertações, teses e artigos científicos. O presente trabalho apresenta a caracterização do perfil vertical do vento obtida com o lidar Doppler e tem como objetivo contribuir com os estudos já realizados, bem como com o desenvolvimento da região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Por 1 ano desde agosto/2017 o lidar Windcube v2, da Leosphere, operou continuamente em Iperó (23°21'S;47°41'W). O Windcube v2 é um lidar Doppler, para estimar a velocidade e direção do vento, que escaneia a atmosfera através da técnica Doppler beam swinging (DBS) (WEITKAMP, 2006). Esse aparelho consiste de 4 feixes com um ângulo zenital de 28° apontando para as direções norte (N), sul (S), leste (L) e oeste (O) e 1 feixe vertical. O feixe vertical fornece a medida direta da componente vertical do vento (***w***), enquanto os outros 4 feixes estimam a velocidade radial ($\mathbf{V_r}$). Esses 4 feixes formam um conjunto de equações (1) que permite estimar as componentes zonal (***u***) e meridional (***v***) do vento horizontal.

$$\begin{aligned} V_{r1} &= u_1 \sin \emptyset + w_1 \cos \emptyset \\ V_{r2} &= v_2 \sin \emptyset + w_2 \cos \emptyset \\ V_{r3} &= -u_3 \sin \emptyset + w_3 \cos \emptyset \\ V_{r4} &= -u_4 \sin \emptyset + w_4 \cos \emptyset \end{aligned} \qquad (1)$$

No conjunto de equações (1), Ø= 62° é o ângulo de elevação e os índices 1, 2, 3 e 4 representam os pontos cardeais N, S, L e O, respectivamente. Este conjunto de equações pode ser resolvido para ***u*** e ***v***. Assumindo que o fluxo é homogêneo e fazendo $u_1 = u_3 = \bar{u}$, $v_2 = v_4 = \bar{v}$ e $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = \overline{w}$, a equação para a velocidade média (2) é obtida:

$$\bar{u} = \frac{\overline{V_{r1}} - \overline{V_{r3}}}{2 \sin \emptyset}$$

$$\bar{v} = \frac{\overline{V_{r2}} - \overline{V_{r4}}}{2 \sin \emptyset} \qquad (2)$$

A varredura completa dura 4 s, mas o algoritmo do Windcube v2 calcula as componentes do vento para cada segundo usando as 4 medidas anteriores. O algoritmo também calcula a média de 10 min da velocidade e direção do vento horizontal e do vento vertical, as variâncias do vento horizontal e vertical e a disponibilidade de dados para o mesmo intervalo de tempo. As especificações técnicas são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Especificações técnicas do lidar Windcube v2 (fonte: manual do equipamento)

CARACTERÍSTICA	VALOR
Altura min e max	40 a 290 m
Frequência de amostragem	1 s
Número de alturas medidas	12
Resolução vertical	20 m
Resolução da velocidade	0,1 m/s
Intervalo de velocidade	0 a 55 m/s
Resolução da direção	2 graus
Comprimento de onda	1,54 µm
Frequência de disparo	30000 Hz
Duração do pulso	200 ns

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

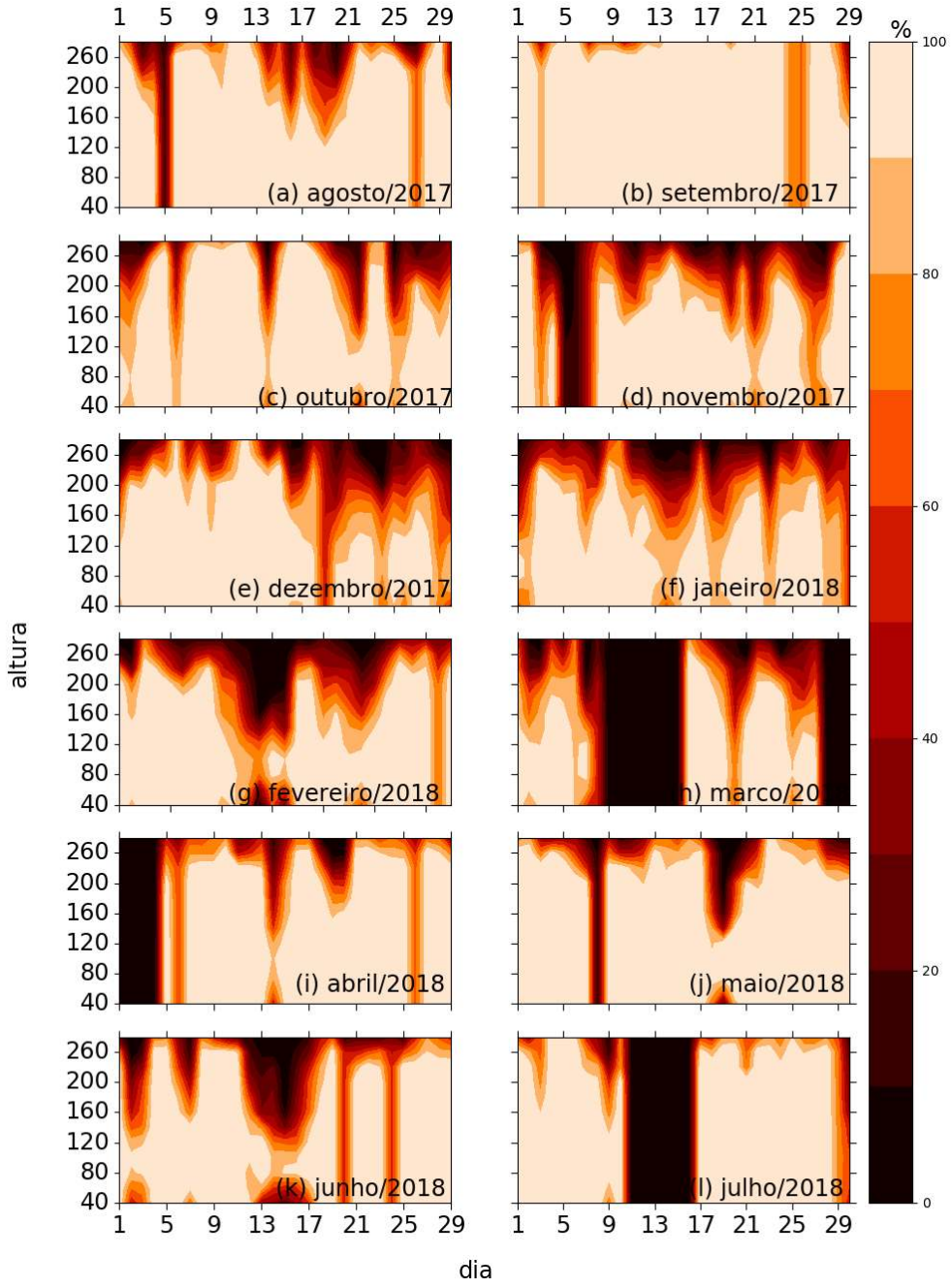
Embora o alcance máximo seja apenas 290 m de altura, espera-se que a alta resolução espacial vertical (20 m), a alta taxa de amostragem e o longo período observacional contribuam para investigar aspectos da CLP de Iperó, uma vez que as técnicas convencionais de observação da CLP, tais como: radiossonda, e balão cativo, inviabilizam, tanto do ponto de vista financeiro como operacional, campanhas de campo de longa duração, como foi feita em Iperó. Neste experimento, o Windcube v2 foi configurado para as seguintes alturas: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 230, 260 e 290 m.

Para as análises apresentadas neste trabalho foram adotadas as médias de 10 min do vento horizontal e vento vertical. Dados com disponibilidade inferior a 80% no intervalo de 10 min foram descartados. Após a remoção dos dados com disponibilidade inferior a 80%, foi feita a média.

Ao longo da campanha experimental, apenas 3 paradas foram realizadas (1 semana em março, 1 semana em abril e 1 semana em julho), para pequenos ajustes do aparelho. A autonomia do lidar Windcube v2 proporcionou alta taxa de recuperação de dados, como mostrado na figura 1, em que no eixo horizontal está o dia de cada mês e no eixo vertical a altura. O percentual de recuperação é indicado pela legenda na lateral do gráfico, sendo que a cor mais escura indica recuperação inferior a 10% e a cor mais clara indica recuperação superior a 90% em 24 horas. Verifica-se que a perda de dados é maior nos níveis mais altos (acima de 200 m),

principalmente nos meses mais chuvosos (entre outubro e março), devido à densa cobertura de nuvens e eventos de chuva.

Figura 1 - Índice de recuperação dos dados (%) do lidar Windcube v2



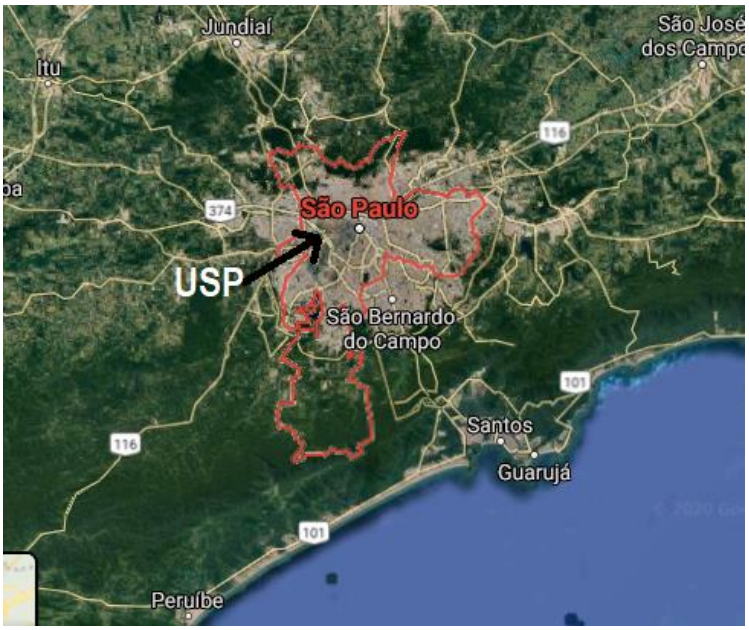
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Com a finalidade de avaliar o desempenho do lidar Windcube v2, dados observacionais de uma campanha realizada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), localizado no campus da Universidade de São Paulo (USP) Armando Salles de Oliveira (cidade

de São Paulo) foram comparados com os dados da torre meteorológica do IPEN. A torre meteorológica do IPEN está a uma altitude de 778 m acima do nível do mar e conta com anemômetros tipo concha (modelo A100L2 Low Power) e *windvanes* (modelo W200P/L), ambos da Vector Instruments a 3, 10 e 30 m de altura. As manutenções preventivas e calibrações foram realizadas conforme recomendação do fabricante. O lidar, por sua vez, estava instalado em uma cota mais baixa, a 760 m, no telhado do Centro de Lasers e Aplicações (CLA). Sendo assim, o seu primeiro nível de observação corresponde a aproximadamente 800 m acima do nível do mar, sendo possível apenas comparar os dados desse nível com o nível de 30 m da torre meteorológica (correspondente a 808 m).

As figuras 2 e 3 indicam, respectivamente, a posição da USP em relação ao município de São Paulo e a vista aérea do IPEN, com indicações da posição do CLA e da torre meteorológica. A USP está inserida em uma região densamente urbanizada, como indica a mancha urbana (Figura 2) que abrange a quase totalidade do município e parte dos municípios adjacentes. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) estima que em 2019 a população ultrapassou a marca de 12 milhões de habitantes, o que corresponde à densidade populacional de aproximadamente 7.400 habitantes/km^2. A densa urbanização implica em alta taxa de impermeabilização da superfície com diferentes padrões construtivos que variam entre residências muito simples a altos edifícios.

Figura 2 - Contorno do município de São Paulo, indicação da USP e mancha urbana da Região Metropolitana de São Paulo



Fonte: Google Earth/2020

Na vista aérea do IPEN (Figura 3) observa-se a distribuição dos edifícios por entre a vegetação, composta por diversas espécies de plantas, dentre as quais estão árvores de grande porte, como pinheiros, por exemplo. A ocupação da Região Metropolitana de São Paulo e da Cidade Universitária adicionam complexidade ao escoamento do vento.

A comparação foi feita para o período entre 1 e 26 de outubro de 2018, utilizando-se as médias horárias. As médias horárias das componentes u e v são mostradas na figura 4, na qual também é indicada a correlação entre os dois equipamentos, bem como a equação da regressão linear.

Os equipamentos apresentaram alta correlação entre si, apesar das diferenças entre os sensores. As diferenças são admissíveis, visto que existem diferenças cruciais nos princípios físicos de cada um dos equipamentos. Lidars estimam a média espacial do vetor em um volume, enquanto anemômetros tipo concha medem a velocidade escalar do ar. Variação da velocidade do vento com a altura também produz diferença entre as medições de anemômetros e lidars (NREL, 2015). Apesar das diferenças dos princípios de cada equipamento e da rugosidade do terreno (Figuras 2 e 3) em que estavam posicionados, o lidar apresentou alta correlação com as observações do anemômetro. Segundo as conclusões do NREL (2015) que avaliou os efeitos de escoamentos complexos com lidars, lidars cuja varredura é cônica (como os DBS), são os mais indicados para substituir torres meteorológicas, pois seu padrão de varredura se repete regularmente.

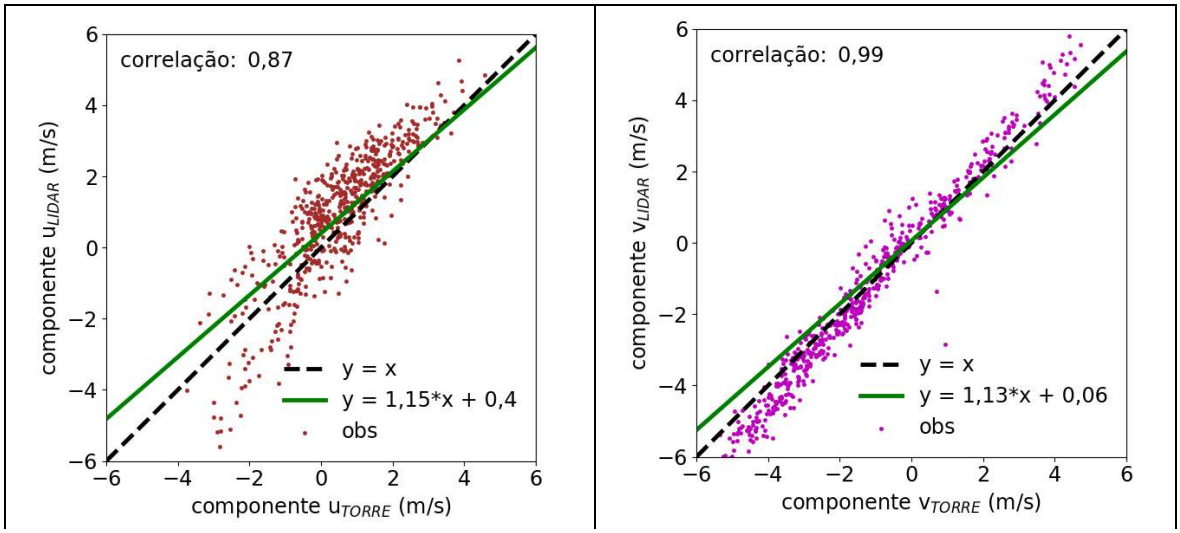
Recentemente diversos trabalhos tem apresentado resultados obtidos com o lidar Windcube v2 (BODINI et al., 2019; BODINI; LUNDQUIST; NEWSOM, 2018; BONIN et al., 2016; NEWMAN; CLIFTON, 2017). Newman e Clifton (2017) obtiveram correlação de ~0,99 nas comparações do lidar Windcube v2 com anemômetros sônicos e de concha em seus experimentos em Oklahoma e sul das Grandes Planícies (EUA). Bodini, Lundquist e Newsom (2018) exploraram a capacidade de três diferentes lidars de vento (entre os quais estava o Windcube v2) para estimar a taxa de dissipação de turbulência e o Windcube v2 foi o que apresentou menor erro.

Figura 3 - Vista aérea do IPEN, com a indicação do CLA e da Torre Meteorológica



Fonte: Google Earth/2020

Figura 4 - Comparação entre o lidar e a torre meteorológica do IPEN



(a) média horária – componente u (b) média horária – componente v

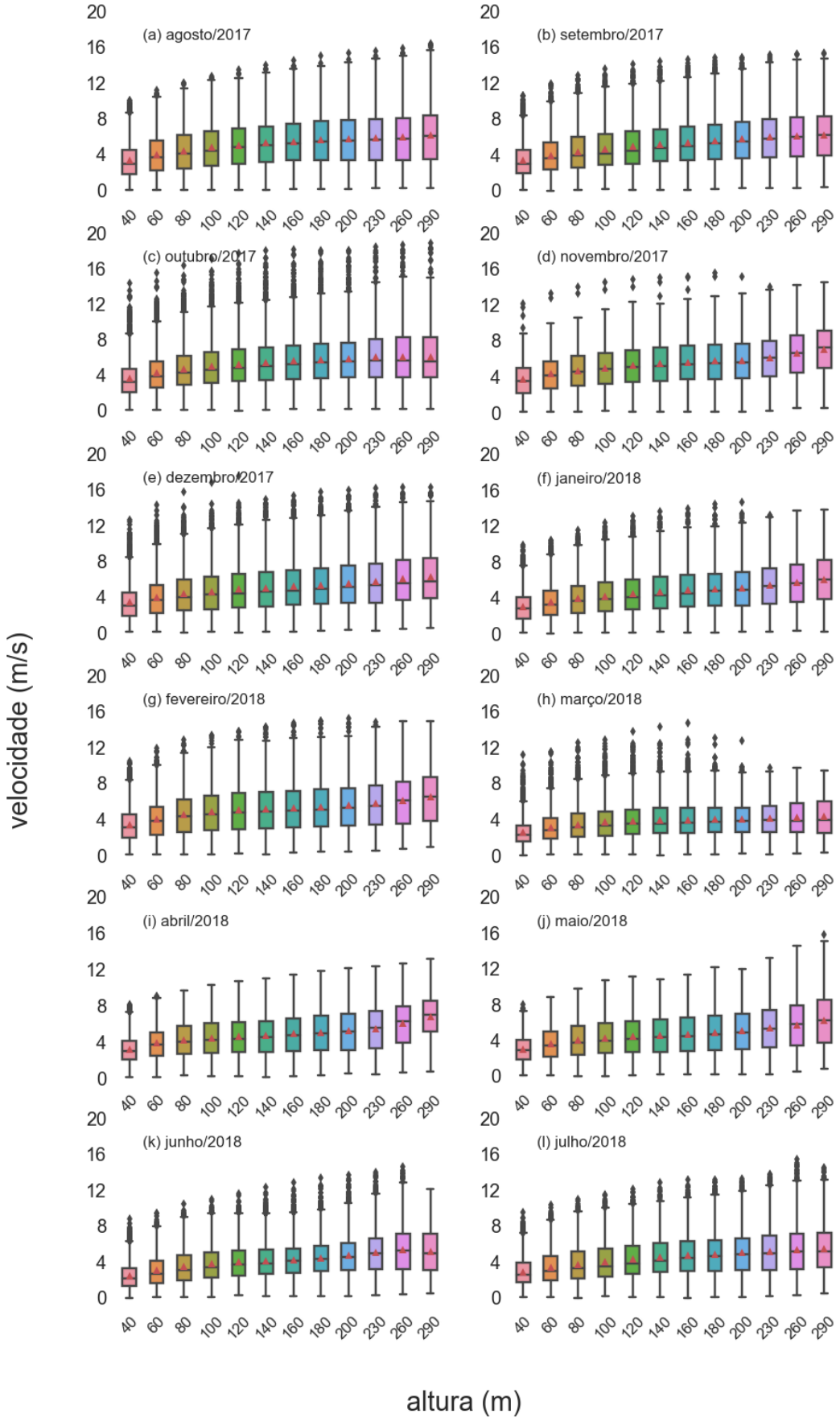
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A média e a mediana da velocidade do vento horizontal são mostradas na figura 5. Cada gráfico mostra o comportamento mensal da velocidade do vento, sendo que o eixo horizontal representa a altura em que o vento foi estimado. O traço horizontal em cada caixa indica a mediana e o triângulo representa média. Os losangos representam os pontos discrepantes e ocorrem apenas acima do limite superior.

Em todos os meses, as médias e as medianas praticamente se sobrepõem, o que indica que a média representa bem o ponto médio da população. Tanto a média como a mediana indicam que de forma geral, o vento é fraco em todos os meses e que a intensidade aumenta com a altura. O aumento da intensidade do vento com a altura é uma soma de dois fatores: a redução do atrito com a altura e a ocorrência de Jatos de Baixos Níveis (JBNs). O JBN é um aspecto recorrente em Iperó (KARAM, 2002; BEU, 2019) que se origina a partir do desacoplamento com a superfície após o decaimento da turbulência térmica e é caracterizado por uma estreita corrente de ventos intensos (STULL, 1988) próximo à superfície.

Figura 5 - Média e mediana mensal do vento entre 40 e 290 m



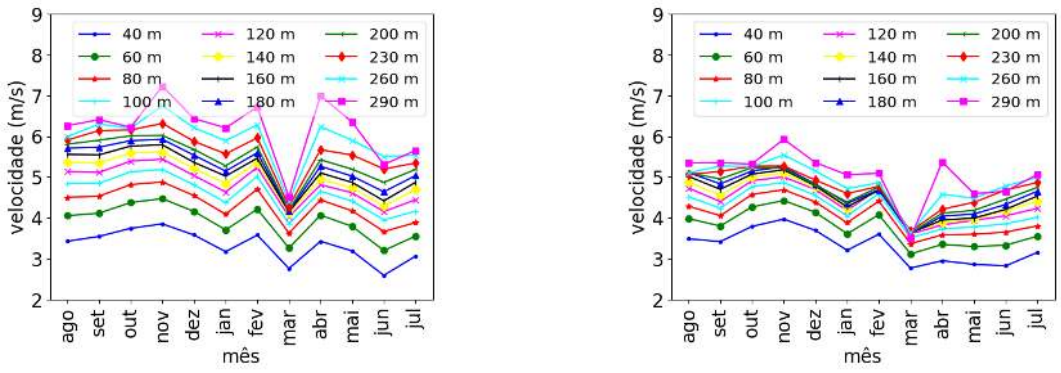
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

As médias mensais mostradas na figura 6 mostram o ciclo anual da intensidade do vento, sendo que na figura 6(a) a velocidade média foi calculada considerando-se as 24 horas do dia, enquanto a figura 6(b) foi calculada considerando-se apenas o horário convectivo (período entre 6 horas e 18 horas local), intervalo em que a turbulência térmica age para homogeneizar a camada e dessa forma eliminar o efeito do JBN na média do vento. No período considerado, observa-se que os ventos foram mais fracos nos meses de março e junho de 2018, sendo a média inferior a 3 m/s na altura de 40 m. Nos demais meses, a média variou entre 3 e 4 m/s, atingindo o pico em novembro (3,85 m/s).

A figura 6(a) também mostra a intensificação do vento com a altura, com valores médios entre 6 e 8 m/s em 290 m. No mês de março, a amostragem acima de 200 m foi reduzida devido ao efeito de bloqueio produzido pela nebulosidade, mesmo assim, a média dos níveis entre 200 e 290 m acompanha a tendência da altura de 40 m. Quando somente o horário convectivo é considerado (Figura 6(b)), observa-se que pouca coisa muda nos níveis mais próximos da superfície. Em 40 m, maior alteração foi observada em abril e maio, com a redução da intensidade do vento. Por outro lado, nos níveis acima de 100 m, observa-se que as linhas tendem a se sobrepor, uma vez que o efeito do JBN foi removido e a variação da velocidade do vento com a altura diminui, diminuindo também o cisalhamento vertical.

A distância entre o 1º e o 3º quartis (Figura 5) e os valores do desvio padrão (não mostrados) indicam que a variabilidade da velocidade do vento aumenta com a altura. Embora, em média, os ventos sejam fracos, especialmente nos níveis mais próximos à superfície, foram registrados ventos intensos ao longo da campanha observacional.

Figura 6 - Velocidade média nas alturas entre 40 e 290 m entre 2017 e 2018



(a) 24 horas (b) período convectivo

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

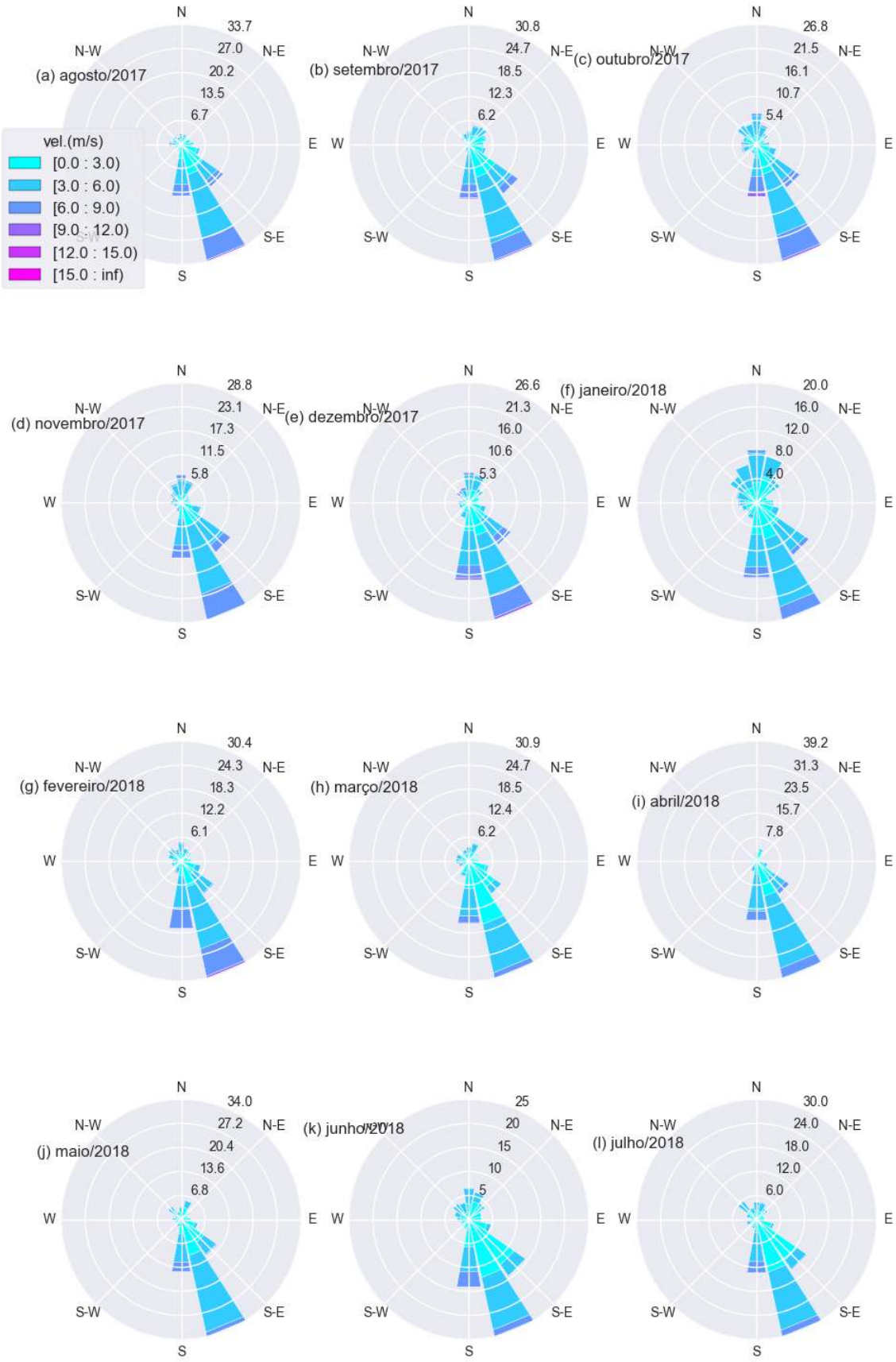
O percentual do vento por categorias de velocidade pode ser verificado na rosa dos ventos (Figura 7), que também indica o percentual por setores de direção. A velocidade é indicada pela legenda. A figura 7, para a altura de 40 m, indica que a maior contribuição é de ventos com intensidade inferior a 6 m/s.

A ocorrência de ventos acima de 6 m/s é bem inferior e somente em alguns meses tiveram ventos com intensidade entre 9 e 12 m/s em 40 m de altura (agosto, setembro, outubro e dezembro de 2017 e janeiro a março de 2018). Somente em outubro houve ventos com intensidade superior a 12 m/s, porém, devido à baixa frequência, a visualização é prejudicada neste gráfico normalizado. Entre abril e julho de 2018 verificou-se significativa redução de ventos com intensidade superior a 6 m/s, conforme figura 7.

Essa figura também indica que os ventos são predominantes de sul, sul-sudeste e sudeste e que os eventos com intensidade superior a 9 m/s somente foram registrados nos setores sul e sul-sudeste. Investigar a situação sinótica e/ou de mesoescala associada a esses eventos está além do escopo deste trabalho, no entanto, constitui uma excelente oportunidade para estudo. Embora em um percentual bem inferior, observa-se contribuição de todas as direções. Essa é uma consequência da oscilação inercial (MARKOWSKI e RICHARDSON, 2011) que é um dos mecanismos para a formação do JBN em Iperó (KARAM, 2002).

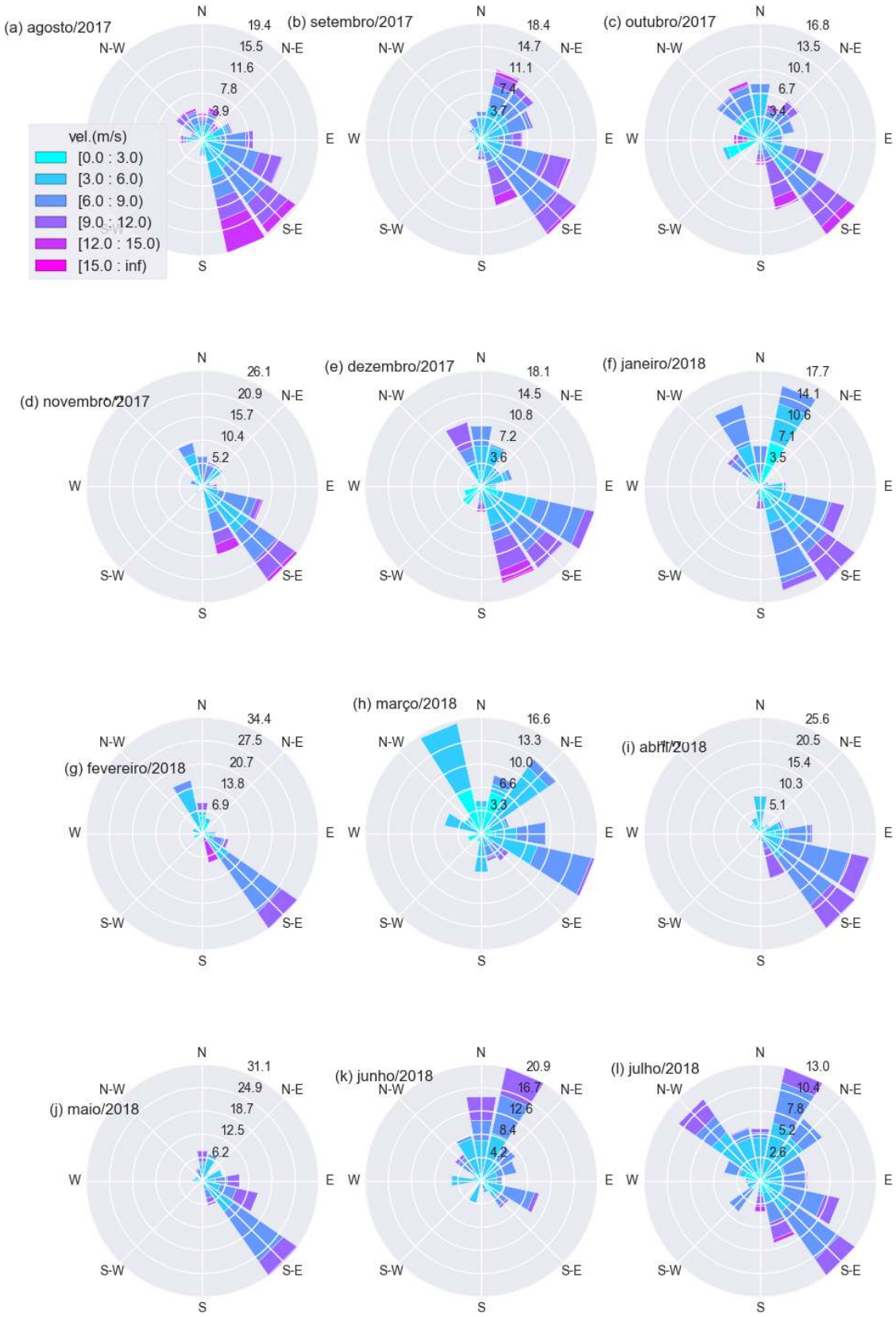
Comparando-se os níveis de 40 e 290 m (Figuras 7 e 8, respectivamente), observam-se diferenças importantes. Além da diferença da velocidade, como já foi destacado nas figuras 5 e 6, verifica-se que existe também cisalhamento direcional, uma vez que os setores apresentam diferentes percentuais nos níveis de 40 e 290 m. Em 290 m, a contribuição é maior nos setores sudeste e leste-sudeste, mas em alguns meses, observa-se importante ocorrência de ventos de norte, norte-nordeste e leste-nordeste. Destaque especial é dado aos meses de junho e julho, devido à alta frequência de ventos dos setores entre oeste-noroeste e nordeste. Julho, inclusive, teve ventos predominantes de norte-nordeste. A causa dessas diferenças merecem ser investigadas detalhadamente em outro trabalho. Em 290 m, ventos mais intensos (> 15 m/s) também ocorrem entre oeste e norte, como em Agosto/2017, ao contrário do nível de 40 m, em que os ventos mais intensos ficaram confinados entre os setores sul e sudeste.

Figura 7 - Rosa dos ventos 40 m



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

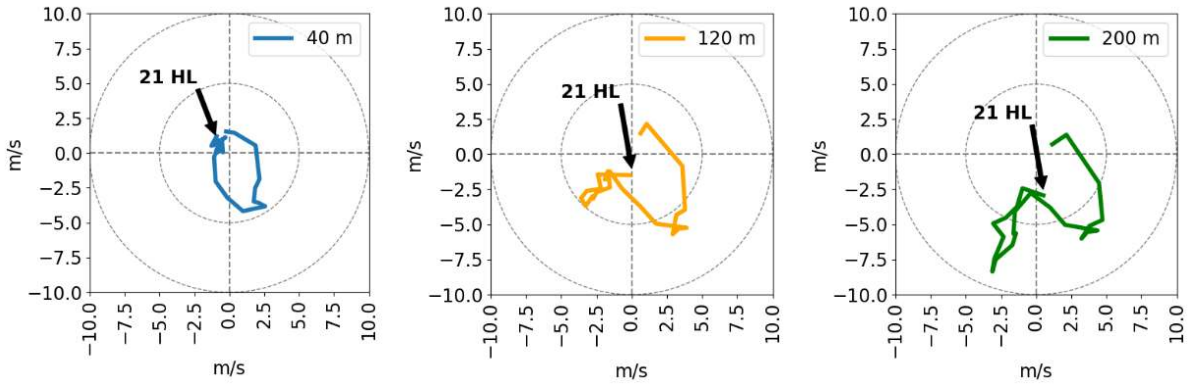
Figura 8 - Rosa dos ventos 290 m



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A hodógrafa de 01/06/2018 (Figura 9) é um exemplo do importante cisalhamento direcional demonstrado pela rosa dos ventos. As hodógrafas foram produzidas a partir da média horária do vento e a altura de observação é indicada na legenda de cada gráfico. Na hodógrafa, cada ponto do gráfico representa a posição do vetor vento a partir da origem. A curva formada pela união dos pontos indica a mudança da direção do vento e a variação da velocidade (círculos concêntricos) com o tempo. Na figura 9, as linhas azul, laranja e verde representam o comportamento do vento ao longo de 24 horas iniciando as 21 hora local (HL). O ponto inicial de cada curva é indicado pela seta. Enquanto na altura de 40 m (linha azul) o vento é aproximadamente de sul, em 120 e 200 m (linhas laranja e verde), no mesmo instante, a direção está defasada em aproximadamente 180º. A partir do ponto inicial, a curva da altura de 40 m gira no sentido anti-horário devido ao efeito da oscilação inercial (MARKOWSKI e RICHARDSON, 2011) e topografia (KARAM, 2002). O vento é inicialmente fraco, em todos os níveis, mas se intensifica com o passar das horas. A curvas das alturas de 120 e 200 m oscilam primeiramente em torno do ponto inicial e depois também giram no sentido anti-horário. Ao fim das 24 horas, os 3 níveis ficam praticamente alinhados na mesma direção.

Figura 9 - Hodógrafa (24 h) iniciando as 21 hl de 01/06/18

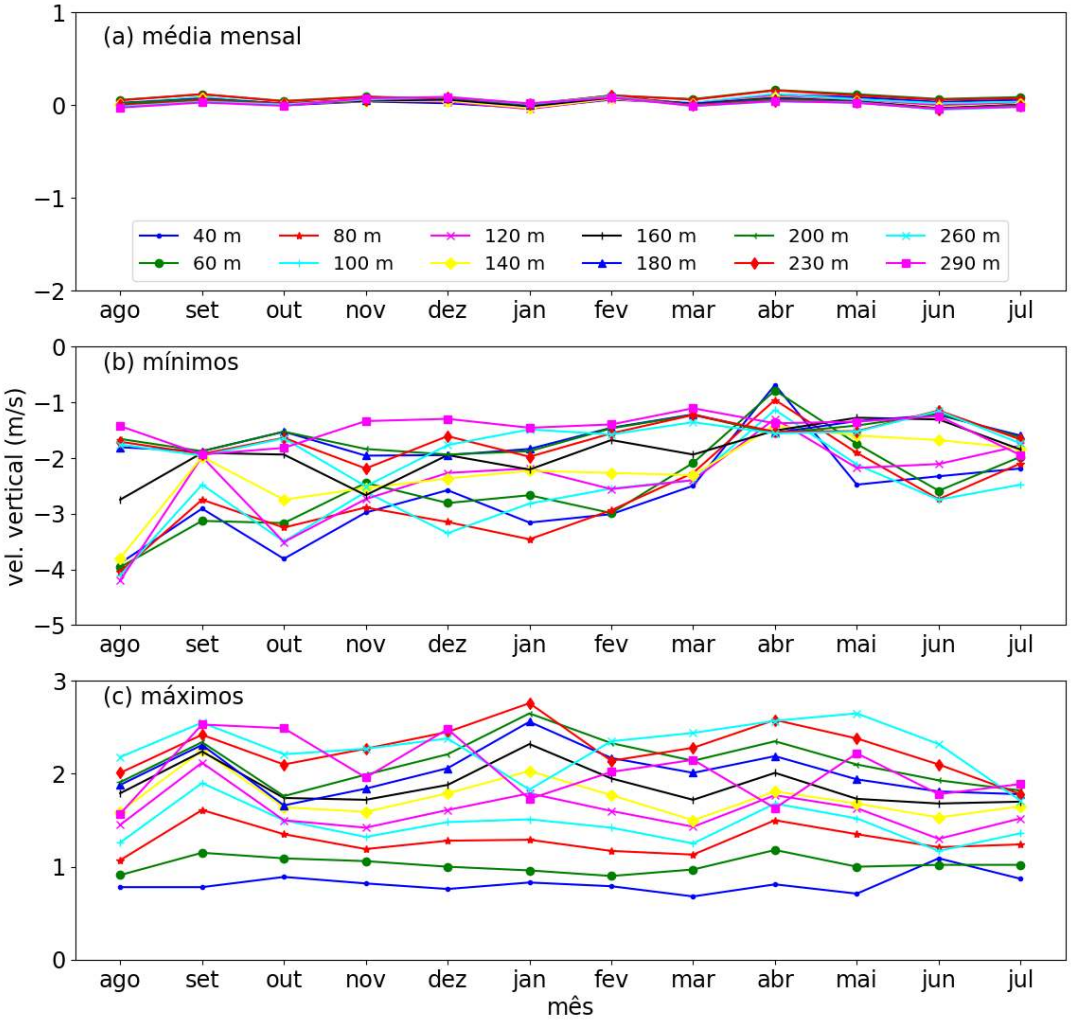


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os ventos verticais são muito fracos e quase nulos na maior parte do tempo, como indicam as médias mensais (Figura 10(a)). No entanto, a variabilidade é alta devido à frequente alternância entre valores positivos e negativos. Apesar dos valores médios serem quase nulos, importantes valores negativos e positivos foram registrados durante a campanha observacional como mostram as figuras 10 (b) e (c). Nestes 3 gráficos, o eixo vertical foi modificado propositalmente para facilitar a visualização dos valores. A figura 10(b) indica que

ao longo do ano foram registrados valores negativos (ventos descendentes) de aproximadamente 4 m/s. Os ventos descendentes mais intensos aconteceram entre agosto/2017 e janeiro/2018. Outra característica marcante desta figura é que os valores mais intensos estão nos níveis mais próximos à superfície (entre 40 e 140 m), enquanto acima de 160 m, os ventos descendentes são mais fracos.

Figura 10 - Velocidade vertical: (a) média, (b) mínimos e (c) máximos mensais

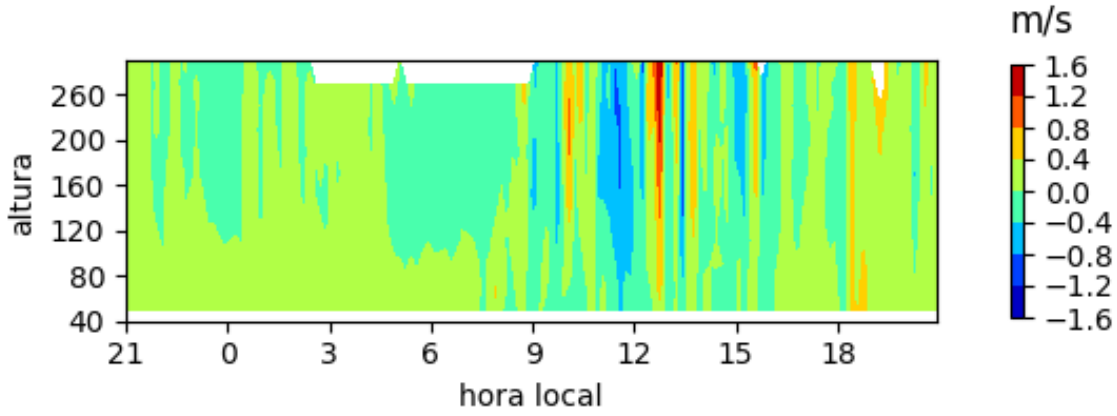


Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

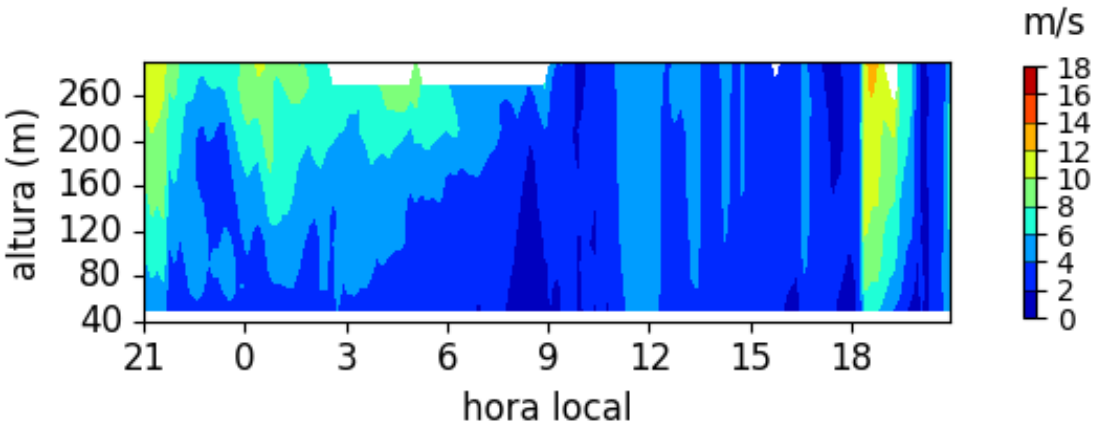
Comportamento oposto é verificado na figura 10(c) que apresenta os valores máximos (ventos ascendentes) registrados ao longo da campanha de campo. Ventos ascendentes mais intensos foram observados nos níveis mais afastados da superfície (acima de 140 m). Os ventos descendentes mais intensos registrados nos níveis mais próximos à superfície estão

associados a eventos de chuva intensa, em que o ar mais frio e mais denso do que o ambiente, ao desentranhar da nuvem, acelera em direção em direção à superfície. Por esse motivo, os episódios mais intensos concentram-se nos meses chuvosos, principalmente.

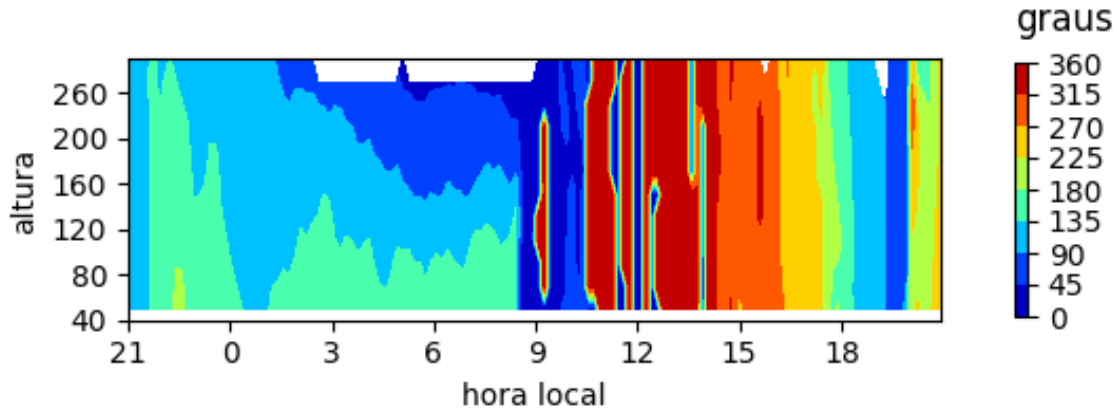
Figura 11 - Perfil do vento entre 10 e 11/10/17, iniciando as 21 hl



(a) vento vertical



(b) vento horizontal



(c) direção do vento horizontal

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Na ausência de perturbações, os ventos verticais são mais fracos, como exemplifica a figura 11(a) para o ciclo de 24 horas iniciando as 21 hl de 10/10/2017. Nesta condição (ausência de perturbações), o vento vertical apresenta ciclo diurno e os valores oscilam em torno de zero antes do nascer (aproximadamente as 6 hl) e depois do pôr do Sol (aproximadamente as 18 hl). Durante o horário convectivo ocorrem movimentos verticais mais vigorosos que se alternam entre correntes ascendentes (cores quentes) e descendentes (cores frias) como é observado no período entre 9 e 18 hl do dia 11/10/17 (Figura 11(a)). As figuras 11 (b) e (c) mostram como a turbulência térmica resultante da incidência de radiação solar altera o perfil da velocidade e da direção do vento horizontal, passando de camadas estratificadas antes do nascer do Sol a uma camada homogênea de ventos fracos e direção constante com a altura. Da mesma forma, observam-se alterações de velocidade e direção associadas à transição de camada limite convectiva para camada limite estável, por volta das 18 hl. O vento horizontal é marcado por aumento da velocidade com a altura, provavelmente originando um JBN e a direção muda bruscamente de oeste-noroeste para sudeste em poucas horas.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram sumarizadas as características do perfil vertical do vento do município de Iperó, interior de São Paulo. O conjunto de dados é resultante de uma campanha observacional com um lidar Doppler que se estendeu entre agosto/2017 e julho/2018. Durante os 12 meses da campanha de campo, o lidar operou quase que continuamente e as curtas interrupções foram feitas propositalmente com o objetivo de ajustar o equipamento. A extensa campanha de campo resultou em mais de 8 mil horas de dados e gerou um valioso banco de dados para investigação da atmosfera próximo à superfície.

A densa quantidade de dados obtidos deve-se às vantagens das técnicas de sensoriamento remoto, neste caso, o lidar Doppler. O modelo usado apresenta como grandes vantagens, a autonomia, que permite ser empregado em locais de difícil acesso sem necessidade de supervisão frequente; e a facilidade de operação, pois a instalação é simples. O lidar Doppler pode ser associado a outros instrumentos de sensoriamento remoto para estimar outras variáveis atmosféricas (temperatura e concentração de gases, por exemplo). Sua alta resolução espacial e temporal e o longo alcance permitem identificar padrões

sazonais. O banco de dados originado pelos experimentos com lidar também serve de parâmetro para validação de modelos numéricos.

Quando comparado com anemômetro tipo concha, o lidar apresentou excelente correlação. Para trabalhos que exigem maior precisão, como a área de energia eólica por exemplo, os dados do lidar Doppler podem ser corrigidos por algoritmos que consideram a topografia do local.

Em Iperó, em média, o vento horizontal é fraco. As médias mensais variam entre 2 e 4 m/s na altura de 40 m e não superam 8 m/s em 290 m. Porém, o ciclo diurno impõe grande variação na intensidade do vento, que permanece fraco nos níveis mais próximos à superfície, mas intensifica-se nos níveis mais altos, dando origem aos JBNs. Assim com a velocidade, a direção do vento também apresenta ciclo diurno, uma vez que está sujeito aos efeitos da oscilação inercial e da topografia, como mostraram trabalhos anteriores. Ciclo diurno também foi observado para o vento vertical e que correntes verticais mais intensas são observadas nos níveis mais próximos à superfície na estação chuvosa.

Alguns eventos isolados analisados superficialmente exemplificaram a complexidade da circulação na região de Iperó, tais como: a oscilação inercial, cisalhamento direcional e a ocorrência de JBN. A correta simulação dessas características são fundamentais para simulações confiáveis de transporte e dispersão atmosférica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BEU, Cássia Maria Leme. **Estudo do jato de baixos níveis em Iperó com a técnica lidar Doppler**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BODINI, Nicola. *et al*. Spatial and temporal variability of turbulence dissipation rate in complex terrain. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 4367-4382–4382, Apr. 2019.

BODINI, Nicola; LUNDQUIST, Julie; NEWSOM, Rob. Estimation of turbulence dissipation rate

and its variability from sonic anemometer and wind Doppler lidar during the XPIA field campaign. **Atmospheric Meas. Tech.**, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 4291– 4302, Jul. 2018.

BONIN, Timothy *et al*. Improvement of vertical velocity statistics measured by a Doppler lidar through comparison with sonic anemometer observations. **Atmospheric Meas. Tech.**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 5833–5852, Dec. 2016.

INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS. Grupo de Micrometeorologia. **Ipero Project**, São Paulo: IAG-USP, 2004. Disponível em: http://www.labmicro.iag.usp.br/projetos/Ipero/index.html. Acesso em: 23 jun. 2020.

KARAM, Hugo Abi. **Estudo do jato de baixos níveis de Iperó e das implicações no transporte de poluentes no Estado de São Paulo**. 2002. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MARKOWSKI, Paul; RICHARDSON, Yvette. **Mesoscale meteorology in midlatitudes**. John Wiley & Sons, 2011.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY; CLIFTON, Andrew. **Remote Sensing of Complex Flows by Doppler Wind Lidar : Issues and Preliminary Recommendations**. Golden: NREL, 2015.

NEWMAN, Jennifer; CLIFTON, Andrew. An error reduction algorithm to improve lidar turbulence estimates for wind energy. **Wind Energ. Sci.**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 77–95, Feb. 2017.

STULL, Rolland. **An introduction to boundary meteorology**. Springer Science & Business Media, 1988.

TOMLINSON, Charlie *et al.* Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: A review. **Meteorol. Appl.**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 296–306, 2011.

WEITKAMP, Claus (Ed.). **Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere**. Springer Science & Business, 2006.