

# CICLO DIURNO DE COBERTURA DE NUVENS EM SÃO PAULO OBTIDOS ATRAVÉS DE MEDIDAS UTILIZANDO UM IMAGEADOR DE BAIXO CUSTO

Giovanni Souza<sup>1</sup>, Theotonio Pauliquevis<sup>2</sup>, Fabio Jorge<sup>1</sup> e Henrique de Melo Jorge Barbosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil
<sup>2</sup> Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, Brasil

#### Resumo

A distribuição angular da radiância do céu tem um papel importante na avaliação de sua interação com alvos complexos. Tais medidas podem ser usadas para inferir propriedades microfísicas dos aerossóis e das nuvens. Um instrumento que pode realizar observações da radiância do céu com alta resolução angular e temporal é uma câmara fotográfica digital, devidamente calibrada. Desenvolvemos um modelo de imageador de baixo custo que fotografa o céu a cada 5-min. O imageador possui uma lente olho de peixe, e faz aquisição com um sensor do tipo CMOS. Apresentaremos a caracterização e as primeiras medidas com este instrumento. Para aumentar o intervalo dinâmico, combinamos quatro imagens com diferentes tempos de exposição através de um algoritmo HDR. Como aplicação inicial, analisamos as imagens para calcular a fração de cobertura de nuvens. A análise da fração de cobertura em São Paulo para 2017, mostrou padrões condizentes com o esperado. Durante o verão, a fração de cobertura cresce linearmente de 50% até 85%, entre o nascer do Sol e o meio da tarde. Durante o inverno, a variabilidade da fração de cobertura é muito maior, devido a passagem de frentes frias, mas a mediana da fração de cobertura é sempre menor que 50%.

Palavras-chave: Nuvens; Imageador; Radiância

#### Abstract

The angular distribution of sky radiance is important for the evaluation of the interaction of this radiation with complex targets. This kind of measurements can be used to infer the microphysical properties of aerosols and clouds. An instrument that can perform measurements of sky radiance with high angular and temporal resolutions is an all-sky camera, as long as it has being properly calibrated. We developed a low cost imager model that take pictures of the sky every 5-min. The skyimager has a fisheye lens and is acquired with a CMOS sensor. We will present the characterization and the first measurements with this instrument. To increase the dynamic range, we combine four images with different exposure times using an HDR algorithm. As an initial application, we analysed the images to calculate the cloud cover fraction. The analysis of the coverage fraction in São Paulo for 2017 showed patterns consistent with the expected. During the summer, the cover fraction variability is much higher due to cold fronts, but the median of the cover fraction is always less than 50%.

Keywords: Clouds; Skyimager; Radiance

#### 1. Introdução

As nuvens refletem parte da radiação solar incidente, resfriando o planeta, mas absorvem a radiação térmica que seria perdida para o espaço, aquecendo-o. Estes efeitos no balanço de energia são tão importantes que um aumento de apenas 1% no albedo de nuvens baixas resultaria em uma forçante radiativa negativa que cancelaria aquela do *CO*<sub>2</sub>. Apesar de sua importância, os processos

físicos que controlam as nuvens ainda não são totalmente conhecidos e faltam observações contínuas com alta resolução temporal e espacial para resolvê-los, especialmente em regiões tropicais (ADAM et al., 2007). Um dos instrumentos que pode realizar observações da distribuição espacial de nuvens com alta resolução temporal é um imageador de nuvens.

Os elementos principais de uma câmera fotográfica são a lente, que faz o mapeamento de direção de chegada versus posição na fotografia, e o elemento que registra a imagem, um sensor CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) ou uma CCD (charged coupled device). Além destes dois elementos principais, há também aqueles que controlam a quantidade de fótons coletados. Isto pode ser feito de duas maneiras, o primeiro é variando a abertura do obturador, função realizada pelo diafragma, e a segunda maneira é variando o tempo de exposição. Ao bater uma foto com tempo de exposição muito longo, entretanto, os objetos na foto poderão se mexer durante a aquisição e a imagem ficará borrada. Ao aumentar a abertura, deixamos visível uma porção maior da lente, assim permitindo a entrada de mais luz, contudo, quanto mais longe do centro da lente, maiores são as deformações na imagem e uma parte menor da foto estará em foco.

Neste trabalho, apresentamos a caracterização e as primeiras medidas com um imageador de baixo custo desenvolvido no Laboratório de Física Atmosférica, da Universidade de São Paulo. Na seção 2, damos as características principais do instrumento e do algoritmo utilizado para combinar imagens com diferentes exposições para aumentar o intervalo dinâmico. Em seguida, na seção 3, utilizamos as medidas do imageador para fazer um estudo da fração de cobertura de nuvens para o verão e o inverno na cidade de São Paulo, durante o ano de 2017. As conclusões finais e perspectivas futuras são apresentadas na seção 4.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Sítio Experimental

O sítio experimental fica localizado no interior do instituto de física da universidade de São Paulo (IF-USP), na região oeste da cidade de São Paulo  $(23^{\circ}33'33.6''S, 46^{\circ}44'0.3''W)$ . O imageador foi instalado no topo do edifício pelletron, que é a torre mais alta nas proximidades do instituto. O topo do prédio fica a 34,65 metros do solo, assim as imagens ficam livres de qualquer interferência da paisagem.

O verão na região de São Paulo é caracterizado como sendo de temperaturas elevadas e de grande volume de chuvas. O padrão de formação de nuvens costuma ser de poucas nuvens durante o começo do dia e, devido ao intenso calor, ocorre a convecção e formação de nuvens cumulunimbus a tarde, gerando tempestades intensas após as 14h (LT). Por outro lado, o inverno na região é caracterizado pelas baixas temperaturas e ar seco. Estas condições são desfavoráveis para a formação de nuvens, sendo assim não há muitas nuvens durante os dias de inverno, exceto em condições de frentes frias. Estas duas estações foram escolhidas exatamente por estas características opostas.

### 2.2 Instrumento

A câmera utilizada no imageador é de marca Blackfly, modelo 20E4-color, fabricada pela Point Grey. A câmara tem 29 mm x 29 mm x 30 mm de dimensão e uma massa de 36 g. O sensor CMOS possui uma resolução máxima de 1600 x 1200 e 12 bits. Na configuração atual, a imagem gerada pela lente olho de peixe é projetada em um pedaço menor do sensor, de 1150 x 1150. Para que a câmara seja capaz de fotografar todo o céu, ela possui uma lente do tipo "olho de peixe", com diafragma fixo.

Como a câmara deve ficar ao ar livre para bater fotos do céu, ela está envolvida por uma proteção metálica vedada para evitar danos devido à chuva e ao Sol (figura 1b). A câmara é operada por um programa, escrito em Labview desenvolvido em nosso laboratório, que faz todo o controle da aquisição de imagens. Tipicamente registra-se imagens a cada 5-min, durante o dia, com quatro valores de tempo de exposição.

## 2.3 Algoritmo HDR

Como a quantidade de luz incidente vária bastante ao longo do dia, dependendo da posição do sol e da quantidade de nuvens, não é possível utilizar um tempo de exposição fixo. Para contornar este problema e ao mesmo tempo aumentar o intervalo dinâmico do sensor de 12 bits, foi utilizada



Figura 1 – Na imagem da esquerda temos a câmera utilizada. Na direita vemos o imageador com a lente olho de peixe e a estrutura de metal que o protege das variações climáticas.

a técnica de fotografia HDR (High Dinamic Range). A câmara captura quatro imagens consecutivas com tempos de exposição de  $100\mu s$ ,  $250\mu s$ ,  $750\mu s$  e  $1500\mu s$  (razão 1:2.5:7.5:15). O algoritmo que desenvolvemos recebe os arquivos brutos gerados pela câmara, remove o ruído de fundo e faz um ajuste linear entre os valores registrados com tempos de exposição consecutivos, em cada pixel. Pixels sub- ou super-expostos são excluídos da análise. Os coeficientes angulares obtidos dão a razão efetiva entre os tempos de exposição, que dependem da quantidade de ruído, e podem então ser utilizados para combinar a informação das quatro imagens. A figura 2 mostra um exemplo de uma imagem combinada, que é obtida pela somatória dos valores de cada imagem ( $I_i$ , i=1..4) normalizados pela exposição relativa efetiva de cada imagem ( $E_i$ ):

$$HDR(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{I_i(x,y)}{E_i}$$
(1)



Figura 2 – Exemplo de execução do algoritmo de HDR: (a) quatro imagem com diferentes tempos de exposição e ruídos de fundo, e (b) o resultado da junção das imagens.

## 3. Resultados

### 3.1 Ruído de Fundo

O sensor da câmara é o responsável pela formação das imagens, conforme discutido anteriormente. De maneira simplificada, cada pixel do sensor absorve os fótons incidentes e gera uma corrente elétrica que, em conjunto, formam a imagem. O problema é que não são apenas os fótons que geram corrente para a formação da imagem. Outros fatores como a temperatura do sensor e a qualidade da eletrônica podem produzir uma quantidade não desprezível de corrente escura. Desta maneira é necessário eliminar este ruído de fundo, antes de interpretar cientificamente as imagens.

Para caracterizar o ruído, deixamos o imageador operando durante uma semana com a parte superior coberta por um anteparo com tecido preto na parte interna e um revestimento externo de alumínio. Desta forma garantimos que não haveria entrada de luz no sensor. Ao final deste processo obtivemos uma distribuição média do ruído no sensor (figura 3), em função da temperatura, que é subtraído de todas as imagens analisadas.

## 3.2 Resposta Angular da Lente

A vantagem de se utilizar um lentes olho de peixe é que ela permite registrar imagens de todo o céu simultaneamente. Entretanto, tais lentes necessariamente provocam uma grande deformação



Figura 3 – Exemplo de ruído médio obtido (esquerda) e o desvio padrão (direito) para o canal vermelho.

da imagem, principalmente nas bordas, longe do eixo óptico. Assim, para algumas análises, como da fração de cobertura de nuvens, é importante limitar a área de estudo para ângulos próximos do zênite. Para obter a equação da lente, utilizamos o teto do laboratório como sistema de coordenadas, que é composto por placas retangulares de tamanho uniforme (variação menor que 0,1 cm), para calcular o ângulo real de abertura e comparar com a posição em pixels na imagem. Tomou-se cuidado no momento de alinhar o centro da imagem com a linha escolhida como origem do sistema de coordenadas. O centro do óptico da lente foi determinado analisando uma imagem saturada, e calculando a posição média dos pixels iluminados (figura 4).



Figura 4 – Exemplo de uma imagem utilizada para determinar as coordenadas do eixo óptico da lente (esquerda) e a máscara de pixels saturados (direita). O "x" representa as coordenadas do eixo óptico (centro da imagem em 574,4 e 570,6).

A figura 5a mostra uma das imagens utilizadas para calcular a equação da lente, com os pontos de referência em vermelho, e o centro da lente em verde. O ângulo zenital foi obtido a partir da distância da câmara ao teto e da posição das referências. Para se obter um maior número de medidas, a distância da câmara ao teto foi e a orientação foram variadas. A figura 5b mostra que o ângulo varia linearmente com a posição no sensor, mesmo para ângulos superiores a 60 graus.



Figura 5 – Análise da geometria da lente, mostrando: (a) Exemplo de imagem utilizada na determinação da equação da lente e (b) Gráfico do ângulo de abertura em função da distância em pixels até o centro da lente. O ajuste realizado é do tipo y = ax + b, onde  $a = 0.176(3)^{\circ}/pix$  e  $b = 0.017(1)^{\circ}$ .

## 3.3 Mascara de Nuvens

Para utilizar imagens do céu para calcular a fração de cobertura de nuvens, é necessário separar quais pixels estão observando o céu claro, e quais estão observando uma nuvem. Como

#### XI Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, São José dos Campos-SP, 20-22 de novembro de 2019.

o espalhamento Rayleigh depende do inverso do comprimento de onda a quarta potência, o azul é mais espalhado que o vermelho. As nuvens, por outro lado, espalham todos os comprimentos de onda da luz visível, e é por isso que as enxergamos na cor branca. É possível então distinguir pixels com e sem nuvem analisando a razão entre as intensidades medidas em dois comprimentos de onda extremos, como vermelho e azul (R/B). Espera-se uma razão baixa para o céu claro, por espalhar uma quantidade maior de azul em relação ao vermelho, e uma razão maior onde houver nuvens, por haver um equilíbrio entre o vermelho e o azul espalhados (LONG et al., 2006).



Figura 6 – A imagem da direita mostra uma figura com a razão entre os canais vermelho e azul (R/B), e a imagem da esquerda mostra o histograma feito com os valores de R/B.

A figura 6 mostra uma imagem da razão dos canais R/B, e também um histograma destes valores. É possível ver dois picos e um vale. O pico menor representa os pixels com valores de R/B pequeno, ou seja, céu limpo. O pico maior representa os pixels com R/B alto, ou seja, a região que possui nuvens. Entre esses dois picos vemos um vale, que representa a fronteira onde temos pixels de céu limpo e pixels de nuvem com valores similares da razão R/B. Consideramos então que pixels com valor da razão R/B abaixo deste limite são considerados céu limpo, e pixels com valores acima representam nuvens. Aqui, devemos notar que a sobreposição das duas distribuições implica em uma incerteza na utilização deste critério para a separação de céu limpo e nuvens. Isto ocorre porque a câmara que utilizamos é uma câmera RGB comum, que faz uso de um filtro Bayer em cima do sensor CMOS. Este tipo de filtro é desenhado para separar as cores vermelho, verde e azul de maneira semelhante a visão humana, e assim reproduzir fotos que se parecem com o que vemos. A implicação é que o filtro vermelho também permite a passagem das cores verdes e azuis, mas em menor proporção; e o mesmo ocorre com os filtros verde e azul.

Apesar desta incerteza, muitos trabalhos utilizam este método (e.g. ROY et al., 2001) ou discutem sua acurácia frente a métodos como da variância do sinal (e.g. MARTINS et al., 2002) ou de aprendizado de máquina (DEV et al., 2017). O valor limite que obtivemos para a razão R/B foi 0,58, próximo ao encontrado por Long et al. (2006), que foi de 0,6. É Importante ressaltar que fração de cobertura não é calculada para toda a imagem, pela deformação da imagem, como já discutimos. Neste trabalho, limitamos a análise da fração de cobertura de nuvens em um cone de 60° em torno do zênite, conforme ilustrado na figura 7.



Figura 7 – Máscara de nuvens aplicada ao mesmo exemplo da Figura 2: (a) imagem HDR, e (b) imagem classificada, dentro do cone de  $60^{\circ}$ .

### 3.4 Fração de cobertura

Os dados de fração de cobertura obtidos pelo algoritmo de detecção nuvens durante o verão e inverno de 2017 foram analisados. Para validá-los, foi feita uma intercomparação com outra câ-

mera que opera na faixa do IR térmico ( $10\mu$ m -  $12\mu$ m), um instrumento comercial desenhado para determinação de fração de nuvens no céu (KLEBE et al., 2014), e com acurácia mais elevada. A figura 8 mostra esta comparação para um período de 4 dias.



Figura 8 – Comparação entre a série temporal dos valores de cobertura de nuvem da camêra SONA do laboratório de física atmosférica (lfa) e o instrumento ASIVA, também pertencente ao lfa. Ambos os instrumentos estão posicionados no topo do edificio Pelletron, e os valores comparados são referentes ao período entre 6 e 10 de julho de 2017. A linha vermelha contínua representa a série temporal do ASIVA que possuí bastante valores pois ele faz a aquisição dos dados a cada 5 minutos e durante o período diurno e noturno. Os pontos azuis representam a série temporal da SONA que faz aquisição de dados a cada 15 minutos e somente são considerados os dados do período diurno.

Apesar de serem poucos dias de dados do ASIVA para serem comparados, é possível observar um padrão semelhante nos dois gráficos.

Para se ter uma noção melhor de como é a distribuição de cobertura de nuvens por horário, foi feito um gráfico do tipo boxplot mostrado na figura 9. No verão durante as primeiras horas do dia começa haver um acumulo de vapor na atmosfera, e ao longo do dia este vapor se condensa e há a formação de nuvens, e ao final da tarde costuma haver chuvas rápidas e intensas. É possível observar este padrão de formação de nuvens na figura 9a nos horários entre 16 e 21h (UTC).

Durante o inverno, não acontecem tantas chuvas intensas como no verão, e a formação de nuvens não possuem um padrão tão certo quanto no verão. Vemos isso na figura 9b, onde é muito difícil fazer qualquer previsão sobre a cobertura de nuvens em um dado horário, pois o gráfico mostra que existe uma distribuição larga de cobertura em cada horário.



Figura 9 – Gráfico boxplot dos valores de cobertura de nuvem durante o verão (esquerda) e inverno (direita). O eixo Y representa a fração de cobertura de nuvens [0-1]. O eixo X representa a hora em UTC.

### 4. Conclusão

Neste projeto utilizamos um imageador para estudar a fração de cobertura de nuvens em São Paulo. Para que isso fosse possível desenvolvemos um algoritmo para combinar as imagens LDR em uma imagem HDR. Utilizamos a razão entre os canais vermelho e azul, conforme feito no artigo Long et al., (2006), e a partir desta razão determinamos o limiar entre nuvem e céu limpo, cujo valor encontrado (0,58) é próximo ao valor utilizado no artigo (0,60). Realizamos também a calibração dos seus principias componentes, determinando a equação da lente, e obtendo o ruído médio no sensor. Constatamos que a cobertura de nuvem durante o verão segue o padrão de haver poucas nuvens pela manhã e muitas durante o final da tarde (entre 16 e 18 horas do horário local). Ao contrário do inverno que não segue nenhum padrão em relação a distribuição de nuvens.

Concluímos que um imageador de baixo custo pode ser adequadamente caracterizado para realizar medidas com relevância científica, em especial da fração de cobertura de nuvens. A utilização da distribuição angular da radiação, para obtenção de propriedades microfísicas de aerossóis e nuvens por exemplo, ainda depende da calibração radiométrica do instrumento e será abordada em um trabalho futuro.