

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA MEDIDA DA CONCENTRAÇÃO DOS NÚCLEOS DE CONDENSAÇÃO DE NUVENS

FRANCISCO G. DE M. PINHEIRO*, PAULO C. CORTEZ†, JOÃO C. M. MOTA‡

*Programa de Pós-Graduação em Eng. de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará
Curso de Física da Universidade Estadual do Ceará
Fortaleza, Ceará, Brasil

†Universidade Federal do Ceará
Depto. de Eng. de Teleinformática - DETI
Laboratório de Engenharia de Sistemas de Computação - LESC
Fortaleza, Ceará, Brasil

‡Universidade Federal do Ceará
Depto. de Eng. de Teleinformática - DETI
Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio - GTEL
Fortaleza, Ceará, Brasil

Emails: fgmpinheiro@uece.br, cortez@deti.ufc.br, mota@gtel.ufc.br

Abstract— This paper presents a system for the automatic measure of the concentration of atmospheric aerosols. Digital image processing techniques are used. The process consists of the capture of a sample of the atmospheric air inside a static thermal diffusion chamber supersaturated with water vapor. In this condition, water vapor molecules condense over the aerosols present in the sampled air, producing water drops. When these drops fall due to gravity they cross a LASER light making them visible. A Series of images of this process is digitized and processed to identify and isolate the water drops. After that, these drops are automatically counted. Binarisation by threshold, watershed transform and connected region counting techniques are used. The results indicate that the applied procedures are adequate for the determination of the concentration of the atmospheric aerosols.

Keywords— watershed, digital image processing, atmospheric aerosol, meteorological instrumentation.

Resumo— Este artigo descreve um sistema para a medida automática da concentração de aerossóis atmosféricos. Utiliza-se para tal, técnicas de processamento digital de imagens. O processo consiste na captura de uma amostra do ar atmosférico dentro de uma câmara estática de difusão térmica supersaturada de vapor de água. Nessa condição, as moléculas do vapor de água condensam sobre os aerossóis presentes no ar capturado, produzindo gotículas de água. Estas gotículas ao caírem por gravidade cruzam um feixe de luz LASER, o que as tornam visíveis. Uma série de imagens deste processo é digitalizada e processada para identificação e isolamento das gotas. Em seguida, estas gotas são automaticamente contadas. As técnicas de binarização por limiar, transformada *watershed* e contagem de regiões conectadas são utilizadas. Os resultados encontrados indicam que os procedimentos aplicados são adequados na determinação da concentração dos aerossóis atmosféricos.

Keywords— watershed, processamento digital de imagens, aerossol atmosférico, instrumentação meteorológica.

1 Introdução

O homem, desde os primórdios de sua existência, sempre buscou compreender o comportamento do clima da Terra. Estudos geológicos, em diversas regiões do planeta, mostram, com muita segurança, que o clima não é estável. Grandes regiões que atualmente são desertos já foram, em tempos remotos, regiões tropicais e vice-versa. Pode-se afirmar, portanto, que o clima da Terra tem um comportamento dinâmico.

Na atmosfera da Terra são encontradas partículas e componentes químicos de origem natural e antropogênica. Esses elementos, suspensos na atmosfera, chamados de aerossóis atmosféricos, juntamente com a energia solar, a energia geotérmica e com as condições dos oceanos criam um conjunto de fatores que modulam o clima da Terra (Vianello and Alves, 1991) (Roberts et al., 2001).

Estudos recentes indicam que uma mudança

climática em escala global está ocorrendo em um ritmo jamais observado. Suas conseqüências já são sentidas em diversas partes do planeta. As razões para tal mudança são diagnosticadas e apresentadas no documento “Climate Change 2007: The Physical Science Basis” (Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). A forte presença de aerossóis de origem antropogênica na atmosfera da Terra é apontada como uma importante causa.

Existem diversas classes de aerossóis e, dentre todas as classes, os núcleos de condensação de nuvens (CCN - *Cloud Condensation Nuclei*) são de fundamental importância, pois definem as propriedades radiativas e a evolução das nuvens. Assim sendo, a medida da concentração dos CCNs é fundamental para compreensão do comportamento das nuvens e, consequentemente do clima da Terra (McMurry, 2000).

Diversos contadores de núcleos de conden-

sação de nuvens (CCNC - Cloud Condensation Nuclei Counter) foram desenvolvidos. O desempenho de 4 tecnologias de CCNC foram analisados por Nenes: 1 - A Câmara de difusão estática SDC (*Static Difusion Chamber*), 2 - o espectrômetro de fluxo contínuo de Fukuta (FCNS), 3 - o espectrômetro de fluxo contínuo de Hudson e 4 - o espectrômetro de fluxo contínuo de Caltech (CCNS) (Athanasios et al., 2001). Dentre estes, o CCNC baseado na SDC é o objeto deste trabalho.

De baixa complexidade e de baixo custo esse equipamento vem sendo aperfeiçoado constantemente ao longo do tempo, sendo bastante utilizado nos laboratórios de química da atmosfera e física de nuvens. A Figura 1 mostra o diagrama esquemático da SDC utilizada.

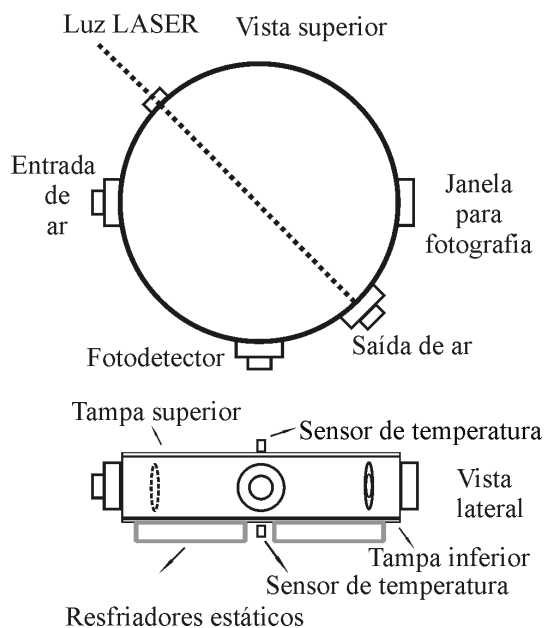


Figura 1: diagrama esquemático da SDC.

A câmara de difusão estática é um cilindro de 10cm de diâmetro com 1cm de altura; sua lateral é feita de um material não condutor de calor e as tampas inferior e superior são de alumínio e possuem um sensor de temperatura cada uma. A tampa inferior está em contato direto com resfriadores estáticos e juntamente com a tampa superior são mantidas úmidas através da presença de papéis mata-borrão alimentados por um reservatório de água.

Atravessando a SDC, a meia altura, uma luz produzida por um LASER cruza o interior da SDC definindo um volume de amostragem na forma de um cilindro.

O princípio de funcionamento da SDC utiliza os resfriadores termoelétricos, em conjunto com os sensores de temperatura, formando um circuito fechado que, por sua vez, mantém uma diferença de temperatura pré-definida entre as tampas. Esta situação garante a difusão de vapor de água, criando uma atmosfera supersaturada den-

tro da SDC.

Estabelecida a supersaturação, uma bomba é acionada por 30 segundos fazendo com que o interior da SDC seja preenchido com uma amostra do ar atmosférico contendo uma indeterminada concentração de aerossóis. A partir deste momento, o vapor de água presente na SDC condensa sobre os aerossóis fazendo com que gotas de água cresçam e precipitem. No trajeto da queda, algumas gotas de água atravessam o cilindro de luz LASER, o que as tornam visíveis. A partir da contagem das gotas de água presentes no cilindro é possível calcular a concentração de aerossóis presentes na atmosfera. (Lala and Jiusto, 1977).

Nos primeiros modelos da SDC, a concentração era obtida contando-se as gotas presentes dentro do volume de amostragem definido pela luz LASER, a partir de registros fotográficos. Isto é, a concentração C era obtida pela relação entre o número de gotas Ng e o volume de amostra Va segundo a expressão:

$$C = \frac{Ng}{Va}$$

Posteriormente, um método indireto de contagem de gotas foi implementado. Este método era baseado na relação entre a intensidade de luz espalhada pelas gotas, ao cruzarem a luz LASER, e a sua concentração. Desta forma, sua medida automática foi possível através da instalação de um fotodetector na SDC (Lala and Jiusto, 1977).

Também foi descrito uma metodologia para obtenção dos coeficientes de uma equação capaz de representar esta relação (Oliveira and Vali., 1995). Contudo, a determinação dos coeficientes de calibração da relação entre a saída do fotodetector e a concentração de CCN é uma tarefa complexa, árdua e necessita ser realizada periodicamente. Isto exige uma análise visual de milhares de imagens incorporando no resultado final erros devido a este processo que é totalmente subjetivo. Além disso, a intensidade de luz espalhada é proporcional a integral do número de gotas multiplicada pela seção transversal das gotas e não somente ao número de gotas o que adiciona uma importante incerteza neste procedimento (Oliveira and Vali., 1995).

Com a evolução da eletrônica e de técnicas de processamento digital de sinais e imagens, o valor da concentração de CCN pode ser obtido pela contagem automática e direta das gotas de água formadas dentro da SDC, dispensando desta forma o tedioso trabalho de calibração. Capturando-se as imagens dentro da SDC por meio de câmeras digitais é possível contar as gotas formadas e, a partir desta contagem, calcular a concentração de aerossóis.

O presente trabalho descreve uma metodologia, utilizando técnicas de processamento digital de imagens, para contagem automática de gotas

de água formadas dentro da SDC. Isto possibilita a determinação da concentração dos núcleos de condensação de nuvens de forma absoluta, eliminando as imprecisões decorrentes do processo de calibração manual.

Nas seções seguintes são detalhados os princípios básicos utilizados neste trabalho, o algoritmo e os resultados. Por fim, as conclusões são apresentadas.

2 Metodologia

A seguir são introduzidos os principais conceitos envolvidos neste trabalho bem como o sistema proposto.

2.1 Conceitos básicos de processamento digital de imagens

O elemento básico de uma imagem digital é o *pixel* (*picture element*). Este representa uma intensidade radiométrica dentro de uma escala, que dependendo do elemento sensor de imagem, varia por exemplo de 0 (preto) a 255 (branco) nas imagens representadas em níveis de cinza. Outro parâmetro importante na definição de um *pixel* é a sua localização no plano. Assim sendo, uma imagem digital consiste de uma função $f(x,y)$ em que x e y são as coordenadas de um valor de intensidade radiométrica. A partir desta definição de imagem digital diversas operações matemáticas podem ser perfeitamente aplicadas, podendo resultar na melhoria de contraste, identificação de descontinuidades, equalização de histogramas entre outros atributos (Gonzalez and Woods, 2001).

Em uma imagem digital, a vizinhança de um pixel é importante na definição de várias propriedades e conceitos, dentre outras o conceito de região conectada. Considerando-se uma imagem digital como sendo uma grade retangular, um conjunto de *pixels* pode ser, em relação a um *pixel* central e adjacente, um vizinho tipo 4 ou tipo 8. Chama-se vizinhança 4 de um *pixel* P todos os *pixels* adjacentes a P localizados fora da diagonal que passa por P , e de vizinhança 8 de um *pixel* P todos os *pixels* que são adjacentes a P . Nos dois casos, ainda é necessário que os *pixels* obedeam a algum critério de similaridade referente a seus níveis de intensidade e ou cor. Assim sendo, uma região (objeto) é dita conectada quando todos os seus *pixels* são adjacentes segundo a vizinhança 4 ou vizinhança 8. A Figura 2a mostra uma estrutura de vizinhança 4, a Figura 2b mostra uma estrutura de vizinhança 8 e a Figura 2c mostra um caso que, dependendo do tipo de vizinhança escolhida, considera-se como sendo 1 região conectada (1 objeto com *pixels* de vizinhança 8) ou 2 regiões conectadas (2 objetos com *pixels* de vizinhança 4) (Jahne, 1997).

Como dito anteriormente as operações

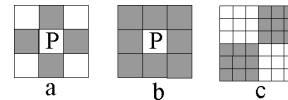


Figura 2: exemplos de vizinhança tipo 4, tipo 8 e elemento conectado

matemáticas, ou em outras palavras transformações, também são aplicáveis a imagens digitais. A transformação de distância, uma das quais é utilizada neste trabalho, consiste em converter uma imagem digital binária em uma outra representada em níveis de cinza. A transformação consiste em substituir um pixel branco (valor 1) por outro cujo valor representa a distância deste pixel a um pixel preto (valor 0) mais próximo. A Figura 3 mostra o resultado desta transformação aplicada a uma imagem binária.

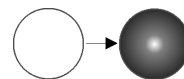


Figura 3: transformação de distância

Um dos problemas mais complexos em PDI é a segmentação de imagens digitais. Segmentar uma imagem consiste em identificar objetos presentes nesta imagem. Existem várias técnicas de segmentação e neste trabalho são utilizadas duas técnicas: a binarização por limiar e a transformação que define a linha divisora de bacias hidrográficas ou *Watershed* (Digabel and Lantuéjoul, 1978; Lantuéjoul, 1978; Beucher and Lantuéjoul, 1979; Vincent and Soille, 1991).

A binarização por limiar é uma técnica simples que consiste em gerar uma imagem binária $f'(x,y)$ a partir de uma imagem em tons de cinza, $f(x,y)$, considerando um valor de limiar K segundo a relação a seguir.

$$f'(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) > k, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A transformada *Watershed* consiste em considerar os tons de cinza da imagem como sendo um terceiro eixo. Isto é, para cada posição de *pixel* é associada uma profundidade ou elevação cujo valor corresponde ao nível de cinza deste *pixel*. Assim sendo, considera-se a imagem com seus objetos como sendo a superfície de um terreno com vales e montanhas. Ao se promover a inundação dos vales, a partir de seus mínimos locais, e construindo-se diques sempre que necessário para evitar-se transbordamento, destacam-se as linhas divisoras de bacias (*Watershed*) produzindo desta forma a segmentação dos objetos presentes na imagem.

A idéia básica da transformada *Watershed* é mostrada na Figura 4. Esta figura apresenta

uma sequência de inundação de dois discos que encontram-se superpostos. Deve-se considerar que, a partir das bordas dos discos e na direção de seus centros, existe um declive formando 2 poços. Desta forma, cada centro é um mínimo local. A inundação ocorre a partir do centro na direção das bordas como se em cada centro existisse um furo e os poços estivessem sendo afundados em um lago. Quando a inundação atinge um nível suficiente para formar uma única superfície, um dique é construído nesta posição, identificando a intercessão dos discos. A inundação continua até atingir as bordas dos discos quando o dique final é construído ao redor de todo o disco. Este dique final tem como objetivo impedir que a superfície do lago forme uma única superfície em relação aos poços. O resultado final deste procedimento é a segmentação (separação) dos objetos.



Figura 4: transformada *Watershed* - inundação em andamento.

2.2 Sistema proposto

O sistema proposto consiste nos processos mostrados no diagrama de blocos na Figura 5.



Figura 5: diagrama de blocos do sistema proposto

Para captura das imagens utiliza-se uma câmera de vídeo com uma resolução de 640×480 pixels instalada na janela de fotografia da SDC. Em seguida, um recorte desta imagem inicial é realizado automaticamente, produzindo uma outra imagem de 356×60 pixels, conforme mostrado na Figura 6. Este recorte leva em consideração que o LASER, a SDC e a câmera de vídeo estão sempre na mesma posição. A imagem obtida contém apenas a informação a ser processada.

Na Figura 6 percebem-se gotas de água de diferentes tamanhos e com diferentes níveis de



Figura 6: imagem capturada e recortada.

cinza. Essa é uma situação comum e dificulta bastante a análise visual da imagem, principalmente no processo de contagem das gotas. Somente as gotas com maior intensidade de luz são de interesse para obtenção da concentração de CCN, pois estas são as que estão dentro do cilindro de amostragem produzido pela luz LASER.

O LASER utilizado é um HeNe de 5mW de potência com um diâmetro de 0,12 cm e o comprimento considerado é de 2,8 cm gerando, portanto, um cilindro de amostragem de $0,031667 \text{ cm}^3$ dentro da SDC. As gotas com pouco brilho (baixa intensidade de espalhamento) estão acima, abaixo, na frente ou atrás do cilindro de luz e são iluminadas indiretamente pelo espalhamento difuso da luz LASER provocado pelas gotas que estão dentro do cilindro.

A seleção de quais gotas são consideradas e quais são descartadas é realizada a partir da operação de binarização por limiar. Assim sendo, um nível de cinza mínimo (intensidade de luz) deve ser definido de modo a garantir que aquele sinal é oriundo de dentro do volume de amostragem. A definição deste nível de cinza mínimo é feita medindo-se o valor médio das intensidades de gotas próximas a luz LASER. Gotas de pouco brilho e, portanto longe da linha central da imagem são referências de gotas fora do volume de amostragem. Este limiar de referência é utilizado para descartar gotas que estão a meia altura da imagem, mas certamente à frente ou atrás da luz LASER. O valor médio encontrado é de 40 (em uma escala de 0 a 255) considerando-se a potência do LASER de 5mW. Os pixels de intensidade variando de 0 a 40 são substituídos por zero (preto) e acima deste valor são admitidos iguais a 1 (branco). Desta forma, obtém-se uma imagem binarizada conforme mostra a Figura 7, produzida pelo processo de binarização por limiar descrito.



Figura 7: imagem binarizada.

A etapa seguinte consiste na construção de mínimos locais artificiais nas gotas identificadas no processo anterior. Isto é feito utilizando-se a transformação de distância. A Figura 8 mostra o resultado deste processamento.

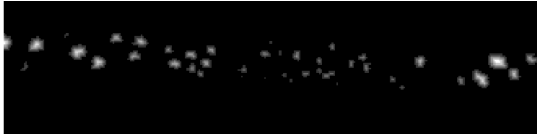


Figura 8: imagem com mínimos locais artificialmente construídos.

A partir da construção dos mínimos locais a transformada *Watershed* é aplicada ao resultado mostrado na Figura 8, produzindo uma imagem segmentada como mostra a Figura 9.



Figura 9: imagem segmentada.

Na última etapa do processamento é feita a contagem do número de grupos de *pixels* totalmente conectados considerando-se vizinhança tipo 8.

3 Resultados

Os resultados apresentados são obtidos a partir da geração de aerossóis sob condições controladas. A concentração média produzida é de 1200 partículas por cm^3 com um tamanho médio de 175 nm. Os aerossóis são gerados a partir de uma solução de sulfato de amônia e são produzidos de acordo com o esquema da Figura 10.

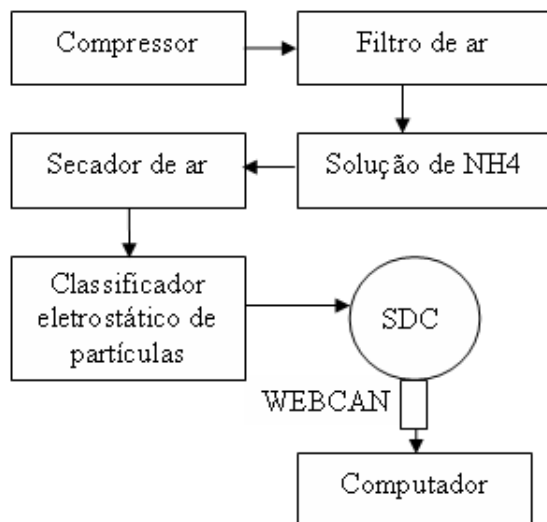


Figura 10: esquema do gerador artificial de aerossol.

O resultado final do processamento das imagens pelo algoritmo descrito na seção anterior é

mostrado na Figura 11, onde destaca-se o comportamento cíclico da concentração. Este aspecto está totalmente de acordo com o fenômeno físico que ocorre na SDC (formação das gotas de água e precipitação). O valor máximo de cada ciclo é tomado como o valor da concentração (Oliveira and Vali., 1995).

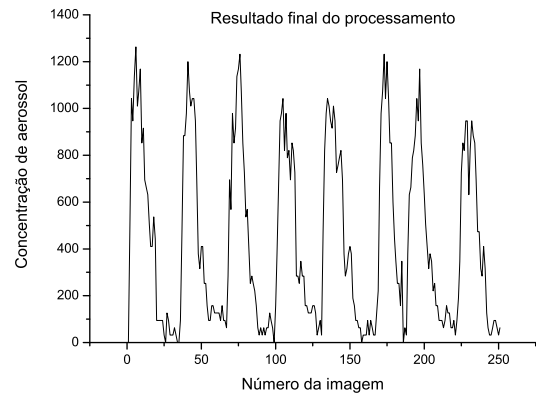


Figura 11: resultado final do processamento.

Os resultados do processamento de 252 imagens obtidas e referentes aos 8 ciclos mostrados na Figura 11 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Concentrações medidas			
Ciclo	Gotas	Gotas/ cm^3	Erro
1	40	1263,1	5,3
2	38	1200,0	0,0
3	39	1231,6	2,6
4	33	1042,1	-13,2
5	33	1042,1	-13,2
6	39	1231,6	2,6
7	37	1168,4	-2,6
8	30	947,4	-21,1

Nesta Tabela são mostrados apenas os valores máximos de concentração para 8 ciclos de medida, sendo que um ciclo compreende: 1- ajuste da temperatura diferencial entre as placas inferior e superior, 2- troca do ar interior da SDC por uma amostra do ar atmosférico, 3- formação das gotas dentro da SDC e sua precipitação. É importante também destacar que esta Tabela mostra um experimento de concentração elevada de aerossóis, em que a contagem visual é praticamente impossível. Assim sendo, o erro calculado refere-se a um valor médio da concentração de aerossóis produzido pelo gerador e não a concentração calculada a partir da contagem visual de gotas. No caso de baixas concentrações, na qual a sobreposição de gotas é rara e é possível a contagem visual das gotas, o erro de contagem do algoritmo é zero.

4 Conclusões

Este artigo propõe um sistema para a medida automática da concentração de aerossóis atmosféricos. Utiliza-se para tal, técnicas de processamento digital de imagens. Os resultados obtidos e apresentados mostram que o sistema proposto é eficiente na determinação da concentração dos núcleos de condensação de nuvens a partir da câmara de difusão estática. Além disso possui vantagens significativas em relação à técnica que realiza a medida de forma indireta. A primeira vantagem é que o processo proposto elimina aspectos subjetivos presentes nos procedimentos para determinação dos coeficientes de calibração da relação *intensidade de luz espalhada* \times *tensão de saída do circuito de fotodetecção*. A segunda vantagem consiste em uma importante redução da dependência da medida da concentração em relação potência do LASER. No processo anterior, uma sistemática rotina de calibração é necessária uma vez que o parâmetro diretamente medido (intensidade de luz) depende da potência do LASER. Outra vantagem igualmente importante está no fato de que a condensação de vapor de água que normalmente ocorre nas superfícies interiores da SDC, e aí inclui-se as janelas de fotografia, não mais atrapalha a medida da concentração pois, não é mais medido a potência do sinal de luz que chega a um fotodetector mas sim, ao invés disto, são contados objetos (gotas) através de suas detecções. Assim sendo, o equipamento torna-se menos dependente de intervenções humanas.

Como trabalho futuro pretende-se determinar a concentração máxima de aerossóis em que esta técnica tem um erro aceitável levando-se principalmente em conta os problemas decorrentes de sobre-posições de gotas nos casos de concentrações elevadas de aerossóis.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Química da Partícula do Instituto Max-Planck e ao Laboratório de Teleinformática da UFC pelos apoios técnico e financeiro.

Referências

- Athanasios, N., Chuang, P. Y., Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H. (2001). A theoretical analysis of cloud condensation nucleus (ccn) instruments, *Journal of Geophysical Research* **106**: 3449–3474.
- Beucher, S. and Lantuéjoul, C. (1979). Use of watersheds in contour detection, *International Workshop on Image Processing, Real-Time Edge and Motion Detection/Estimation*, Rennes.
- Digabel, H. and Lantuéjoul, C. (1978). Iterative algorithms, in J.-L. Chermant (ed.), *2nd European Symposium on Quantitative Analysis of Microstructures in Material Science, Biology and Medicine*, Riederer Verlag, Stuttgart FRG, pp. 85–99.
- Gonzalez, R. C. and Woods, R. (2001). *Digital Image Processing*, 2 edn.
- Jahne, B. (1997). *Digital Image Processing: Concepts, Algorithms and Scientific Applications*, 4 edn.
- Lala, G. and Jiusto, J. (1977). An automatic light scattering ccn counter, *Journal of Applied Meteorology* **16**: 413–418.
- Lantuéjoul, C. (1978). *La squelettisation et son application aux mesures topologiques des mosaïques polycristallines*, PhD thesis, Ecole des Mines, Paris.
- McMurry, P. H. (2000). A review of atmospheric aerosol measurements, *Atmospheric Environment* **34**: 1959–1999.
- Oliveira, J. and Vali, G. (1995). Calibration of a photoelectric cloud condensation, *Atmospheric Research* **38**: 237–248.
- Roberts, G. C., Andreae, M. O., Zhou, J. and Artaxo, P. (2001). Cloud condensation nuclei in the amazon basin: Marine conditions over continent?, *Geophysical Research Letters* **28**(14): 2807–2810.
- Vianello, R. L. and Alves, A. R. (1991). *Meteorologia Básica e Aplicações*, Universidade Federal de Viçosa.
- Vincent, L. and Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(6): 583–598.
- Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Climate change 2007: The physical science basis, *Technical report*, World Meteorological Organization and United Nations Environment Programme.