

Desenvolvimento de uma Nova metodologia para a estimativa da cobertura de nuvens

S. L. Mantelli Neto^(1,3), A. v. Wangenheim⁽²⁾, E. B. Pereira⁽³⁾.

(1) Laboratório de Energia Solar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade Florianópolis SC CEP: 88040-900 sylvio@labsolar.ufsc.br (2) LISHA – Laboratório de Integração Software-Hardware, Departamento de Informática e Estatística, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade Florianópolis SC CEP: 88040-900 awangenh@inf.ufsc.br (3) Departamento de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Av. Dos Astronautas 1758 São José dos Campos SP CEP: 12201-970 enio@dge.inpe.br.

ABSTRACT

This work presents a methodology to increase the precision of determination of cloud coverage from surface. To achieve that, we used pictures from a low cost camera, specially developed image processing programs, a neural network application, a physical atmospheric model, surface data from a radiation station¹ and an anisotropic diffusion algorithms. The study concluded that cloud coverage estimation could not be based on a binary or linear scale. This representation scheme could lead to results misinterpretation, due to atmospheric phenomena like Mie scattering and brilliance caused by atmospheric turbidity on automatic cloud detection systems, overestimating the total cloud coverage value.

1. INTRODUÇÃO

O Sol é uma fonte de energia que envia uma média diária ao topo da atmosfera da Terra da ordem de 1367 W/m^2 ². Desde a sua origem (Sol) até chegar à superfície (Terra) a radiação solar sofre influência de fenômenos astronômicos e atmosféricos. Os astronômicos compreendem os fenômenos que alteram os valores da radiação no caminho desde a sua origem até o topo da atmosfera. Os atmosféricos compreendem os que alteram os valores da radiação solar desde o topo da atmosfera até a superfície. Em ambos os casos, ocorrem a modulação da energia solar em primeira ordem (grande influencia na modulação da energia solar) e segunda ordem (pequena influência na modulação da energia solar). A literatura especializada, como por exemplo: Iqbal (1983), Vianello e Alves (1991), Duffie e Beckman (1980), fornece informações mais detalhadas acerca da modulação devido a fenômenos astronômicos de primeira e segunda ordem e atmosféricos de segunda ordem. A seguir será abordada uma descrição sumária da modulação da energia solar somente de primeira ordem devido a fenômenos atmosféricos causado pelas nuvens, restrito ao presente trabalho.

A modulação em primeira ordem da radiação solar devida a fenômenos atmosféricos é causada pelas nuvens. As nuvens apresentam grande diversidade quanto à forma, altitude e densidade. O resultado da interação da luz solar com as nuvens depende do tipo da nuvem, sua espessura e do número de camadas sobrepostas. As nuvens absorvem grande parte da radiação solar aquecendo a atmosfera, refletem uma parte da radiação de volta ao espaço e retransmitem outra parte bem menor à superfície. A absorção da energia solar pelas nuvens também causa um aumento de temperatura da atmosfera. As nuvens também interagem da mesma forma com a radiação refletida pela superfície, influenciando o valor final do albedo, ou radiação refletida retorna ao espaço na mesma faixa de comprimento de onda que a radiação incidente. A natureza aleatória de sua composição e diversidade associada a fatores macro e micro meteorológicos fazem das nuvens a maior fonte de incertezas na determinação da radiação que chega à superfície, nos modelos atmosféricos de primeira ordem que utilizam a energia solar. Por isto um

¹ Baseline Surface Radiation Network-World Radiation Center at Florianopolis SC Brazil

² Fator solar estabelecido pelo WRC (World Radiation Center).

estudo mais aprofundado com a utilização de técnicas alternativas deste agente também está sendo proposto neste trabalho.

PROBLEMAS RELACIONADOS À ESTIMATIVA DA COBERTURA DE NUVENS

Embora a radiação solar possua uma distribuição espectral em várias bandas de energia, as nuvens se distinguem por apresentarem uma variabilidade maior nas bandas infravermelho e visível. Como foco principal do presente trabalho serão considerados apenas aspectos da radiação visível, visando a automatização de um processo de observação comumente realizado por observadores especializados.

O modelo atmosférico com os seus vários fatores, a determinação da cobertura de nuvens, e o efeito das mesmas sobre a radiação solar vem sendo estudado ao longo de vários anos a partir de vários autores. As nuvens podem ser observadas a partir de satélites ou de observadores de superfície. Ambos os métodos possuem limitações e não podem ser assumidos como o mais preciso, e sim complementares. Harrison et al. (1995), Yamanouchi (1993) e Rossow (1982) em um trabalho bem extenso sobre o assunto desenvolvido durante o ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) apontam vários problemas na observação de nuvens a partir de satélites. No presente trabalho serão sumarizadas somente as limitações dos métodos de observação a partir da superfície.

A estimativa da cobertura das nuvens a partir de um observador ao nível do solo apresenta certas restrições. A WMO³, padronizou os critérios de observação das nuvens a partir da superfície. Os critérios da WMO são adotados por praticamente todas as estações contínuas de observação sinópticas nas estações meteorológicas, nos aeroportos etc. Mas as observações estimam somente a quantidade dos vários tipos de nuvens que ocorrem no céu e não fornecem informações acerca das suas propriedades físicas (Rossow). Além do mais, as observações de superfície são baseadas em critérios subjetivos estimados pelos operadores. Portanto ao longo do ano, com o rodízio de vários operadores diferentes, a estimativa da cobertura do céu pode apresentar inconsistências de tal forma que as variações reais da cobertura de nuvens não sejam corretamente observadas Hoyt (1978). Cientes de tais limitações diversos autores tentaram implementar a detecção automática de nuvens utilizando câmeras.

Detwiler (1990) em seu trabalho de análise das nuvens usando câmeras a bordo de balões utiliza fractais para análise das nuvens. Em sua análise, Detwiler chega a conclusão de que as nuvens não se apresentam uniformemente distribuídas no campo de visão, mas tendem a ser agrupadas.

Holle e MacKay (1975) em seu experimento de fotografar o céu para a determinação da cobertura das nuvens descrevem que a estimativa da cobertura das nuvens deve levar em conta que o observador tende a enfatizar mais as nuvens que se encontram sobre o horizonte do que as nuvens que se encontram acima do ponto de observação (bias). Isto acarreta em distorções por que as nuvens nas regiões tropicais tendem a ser mais isoladas e tendem a se desenvolver agrupadas e verticalmente. Holle e MacKay tentam em seu experimento medir a cobertura de nuvens a partir de fotografias com uma câmera de lente de grande abertura angular na superfície. Ele comenta que o método fotográfico se mostrou muito mais confiável do que a observação por um operador na superfície. O operador tende a superestimar a cobertura de nuvens na ordem de 5-15%. Holle e MacKay mencionam que a cobertura de nuvens é difícil de se definir seja por foto ou por observador, por que as nuvens possuem espessura, mudam de forma, se apresentam em diferentes altitudes e ocorrem com a variação angular do sol quando observadas sobre a superfície. Os observadores na superfície que seguem a padronização da WMO determinam a cobertura de nuvens em oitavas. Este método apresenta uma série de distorções:

- a observação de uma nuvem que se encontra acima do observador tem uma ênfase maior do que uma nuvem do mesmo tamanho que se encontra no horizonte;
- a visão lateral de muitas nuvens pequenas no horizonte produz um efeito “pacote”, que dá a impressão ao observador de estar observando uma quantidade de nuvens maior que o existente;
- a observação feita em ângulos próximos ao horizonte tende a superestimar a quantidade de nuvens visualizadas;

³ World Meteorological Organization

- existem grandes variações na determinação da cobertura de nuvens quando diferentes observadores analisam o mesmo céu; mostrando que existem diferenças no critério pessoal de avaliação da mesma cena observada.

A par de todas as limitações que o sistema de observação via satélite e o de superfície possuem é que se propõe o presente trabalho com o intuito de reduzir as incertezas inerentes ao processo de determinação de cobertura de nuvens a partir do solo. Optou-se neste caso pela utilização de câmeras automáticas que podem calcular a porcentagem de cobertura de nuvens existente no céu de forma não subjetiva. Apesar dos algoritmos de processamento de dados poderem detectar a quantidade de nuvens existentes no céu, ainda existem restrições quanto à identificação das nuvens nas diversas camadas e de camadas de nuvens com espessura óptica finas. Por isto optou-se pela investigação de uma metodologia baseada em imagens a partir da superfície e algoritmos de processamento de imagens que permitem a identificação de padrões. As nuvens compõem padrões no céu e foi com este objetivo que se montou um experimento para a determinação dos padrões de nuvens, tentando identificar em uma fotografia a presença de uma nuvem ou não utilizando um classificador parametrizável, implementado como uma rede neural.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada no presente trabalho utiliza uma câmera digital de superfície de baixo custo fotografando o céu, alinhado com o eixo zenital. As imagens foram tiradas do céu em diversos horários diferentes, mas limitadas aos horários que o Sol não aparecia no ângulo de visada da câmera para não danificar o dispositivo CCD⁴ da câmera por excesso de luminosidade. Não se objetivou estimar toda a cobertura existente e sim identificar precisamente o padrão de nuvem no ângulo de visada da câmera.

Como método de classificação optou-se por um modelo de rede neural de Backpropagation (Rummelhart&McLelland, 1984). A rede neural é um modelo matemático de processamento de variáveis, implementado através de programas de computador que de uma forma muito simples simula o funcionamento de um neurônio. Embora a rede neural ainda esteja longe de representar matematicamente a natureza complexa de um neurônio, ela apresenta uma capacidade muito grande de a partir de exemplos controlados reproduzir a classificação de um padrão estabelecido através de um treinamento prévio supervisionado, podendo o resultado ser utilizado como um classificador parametrizado através do conjunto de treinamento apresentado.

Como método de segmentação das imagens obtidas utilizou-se um algoritmo de difusão anisotrópica. A difusão anisotrópica considera a imagem (atmosfera) um meio anisotrópico IQBAL. A implementação é feita calculando a derivada direcional do pixel a partir de uma matriz jacobiana de 3x3 ao seu redor. Após o processo de difusão ocorre um realce nas bordas e uma homogeneização das regiões similares criando superfícies isófonas na imagem.

A partir das imagens, utilizou-se um protótipo computacional desenvolvido em linguagem SMALLTALK⁵ e "C" para executar as seguintes tarefas.

- Carregar as imagens selecionadas que continham céu encoberto, céu claro, e diversas proporções intermediárias entre varias coberturas em horários distintos.

- Gerar um conjunto para parametrização do classificador por treinamento supervisionado determinando manualmente quais píxeis na imagem possuíam nuvens ou não em diversas circunstâncias diferentes.

- Integrar a rede neural obtida através de bibliotecas geradas pelo aplicativo externo SNNS⁶(Stuttgart Neural Network Simulator) em linguagem C.

⁴ CCD Charge Coupled Device

⁵ Para a programação em SMALLTALK foi utilizado o ambiente VISUALWORKS e um conjunto de bibliotecas parcialmente desenvolvido no Laboratório de Integração Software-Hardware da UFSC.

⁶ University of Stuttgart, Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems.

- Integrar um modelo atmosférico gerado a partir do pacote matemático MAPLE V, baseado no modelo paramétrico C semi-empírico sugerido por Iqbal(1983).
- Utilizar dados meteorológicos e solarimétricos da estação BSRN (Baseline Surface Radiation Network) de Florianópolis⁷ como parâmetros de entrada. Os dados meteorológicos foram utilizados para o cálculo da transmitância atmosférica no modelo paramétrico utilizado. Os dados solarimétricos na normalização dos dados calculados no modelo paramétrico do cálculo da radiação.
- Classificar uma imagem de entrada, apresentando como dado de saída um índice de cobertura de nuvens da imagem analisada.
- Visualizar os resultados obtidos comparando-os com a imagem original.

Para um melhor esclarecimento, um diagrama esquemático do sistema implementado pode ser visualizado na fig. 1, e o protótipo desenvolvido em SMALLTALK na fig. 4.

IMPLEMENTAÇÃO DA REDE NEURAL

A implementação rede neural foi feita através de um aplicativo SNNS⁸ que fornecia um ambiente para a configuração, treinamento e geração da rede neural a partir dos conjuntos de treinamento supervisionados.

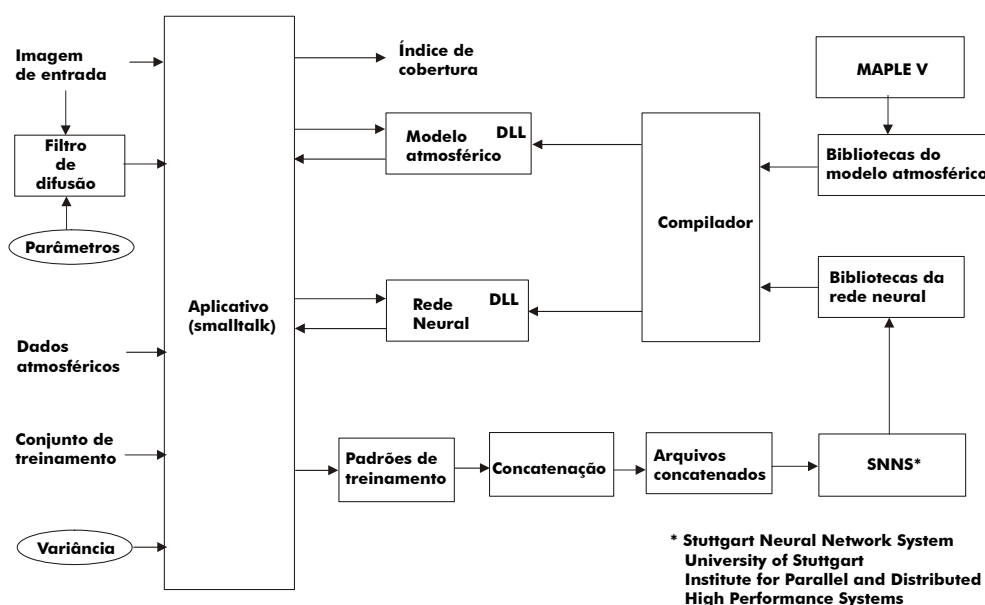


Figura 1. Representação esquemática do sistema utilizado.

Para a configuração utilizou-se uma rede neural do tipo FEED-FORWARD com função de ativação sigmoideal, camada oculta com um número de elementos dez vezes maior que a camada de entrada e dois elementos de saída. Tal configuração se justifica por que a classificação binária da imagem não representa um padrão complexo a ser analisado. Como dados de entrada foram utilizados os valores individuais normalizados dos píxeis da imagem e dos parâmetros físicos que indicavam variabilidade na presença de nuvens. O valor do pixel da imagem foi representado por suas componentes no espaço vetorial RGB em uma resolução de 480x600. Dentre os parâmetros susceptíveis à presença de nuvens disponíveis, foram selecionados os seguintes: radiação global, direta e difusa normalizados com os respectivos valores de radiação obtidos a partir do modelo paramétrico C implementado para céu claro. Além destes parâmetros, foram acrescentados os valores de onda longa descendente, ângulo de elevação solar, temperatura, umidade e pressão atmosférica.

⁷ www.labsolar.ufsc.br, <http://bsrn.ethz.ch>

⁸ <http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/>

Na saída a rede neural apresenta para cada conjunto de entrada analisado um conjunto binário complementar correspondente à entrada indicando a representatividade de nuvem ou céu. Ao final da análise os píxeis seriam divididos na categoria de nuvem ou céu e somados proporcionalmente de forma a representar um índice de cobertura total.

Durante o treinamento foi selecionado um conjunto de imagens controladas que representavam todas as combinações possíveis de imagens do céu em horários distintos e inseridos no aplicativo implementado em SMALLTALK. Um cursor era posicionado sobre a imagem e marcado se o pixel em questão representava uma nuvem ou não. A partir daí foi gerado um conjunto de treinamento com todas as possibilidades de classificação de píxeis disponíveis. Próximo à borda devanecente das nuvens a indicação era feita com o auxílio do cálculo da variância dos píxeis presentes na vizinhança em uma matrix 7x7 ao redor do pixel sendo analisado. Além disto uma ferramenta do tipo “lente” foi implementada ao redor do cursor para facilitar a visualização do pixel que estava sendo examinado para facilitar o posicionamento exato do cursor. O conjunto de treinamento foi alimentado na rede neural de forma cíclica e aleatória; de forma que o erro decorrente da análise atingisse valores abaixo de 1%. A rede então era gerada através de um código computacional em linguagem C.

Depois de pronta a rede neural foi incorporada no aplicativo computacional em SMALLTALK. A utilização da rede no aplicativo era feita através da chamada de uma função em C. Os dados eram passados e os resultados de saída obtidos através da chamada e retorno de parâmetros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após uma análise minuciosa o que se pode concluir é que aplicar simplesmente um mecanismo de segmentação e limiarização utilizando os valores dos píxeis para obter um resultado binário esperando obter céu ou nuvem não é o mais apropriado.

Um problema surge quando observamos uma imagem com o Sol nas proximidades do ângulo de visão da região que está sendo observada. A existência da turbidez na atmosfera faz com que o Sol apresente um halo difuso ao seu redor que fica tanto mais intenso quanto maior for a turbidez. A turbidez forma no céu um gradiente de brilhância que vai desvanecendo a medida que se afasta do Sol. Esta brilhância chega a produzir píxeis, na vizinhança do disco solar, com valores próximos ou até maiores que os que caracterizam os píxeis das nuvens de pequena profundidade óptica. Isto pode induzir a erros na estimativa da cobertura de nuvens, pois o céu claro está sendo caracterizado como nuvem. Uma ilustração acerca deste problema pode ser visualizada na fig. 2. Somente através de uma inspeção visual mais detalhada que se pode distinguir a diferença entre a brilhância por turbidez e as nuvens de pequena profundidade óptica. Na fig. 2 – 03131200 pode-se observar claramente que a imagem é de céu azul, mas a brilhância causada pela turbidez faz com que os píxeis sejam interpretados como nuvens. Problemas adicionais surgem quando o Sol diminui o ângulo de elevação e é mais freqüente o espalhamento Mie nas cores vermelha e amarela.

Um exemplo dessa dificuldade pode ser visualizado na imagem na fig. 3. Não se pode esperar que um sistema automático apresente um resultado binário (nuvem ou céu) ou até mesmo uma escala do índice de cobertura satisfatório na presença dos fenômenos ilustrados nesta figura.

Figura 2. Presença do gradiente causada pela brilhância devido a turbidez atmosférica próxima ao disco solar (parte inferior a esquerda na figura 03032000 e parte inferior a direita na figura 03131200). As figuras em branco e preto à direita foram geradas a partir do filtro de difusão anisotrópica.

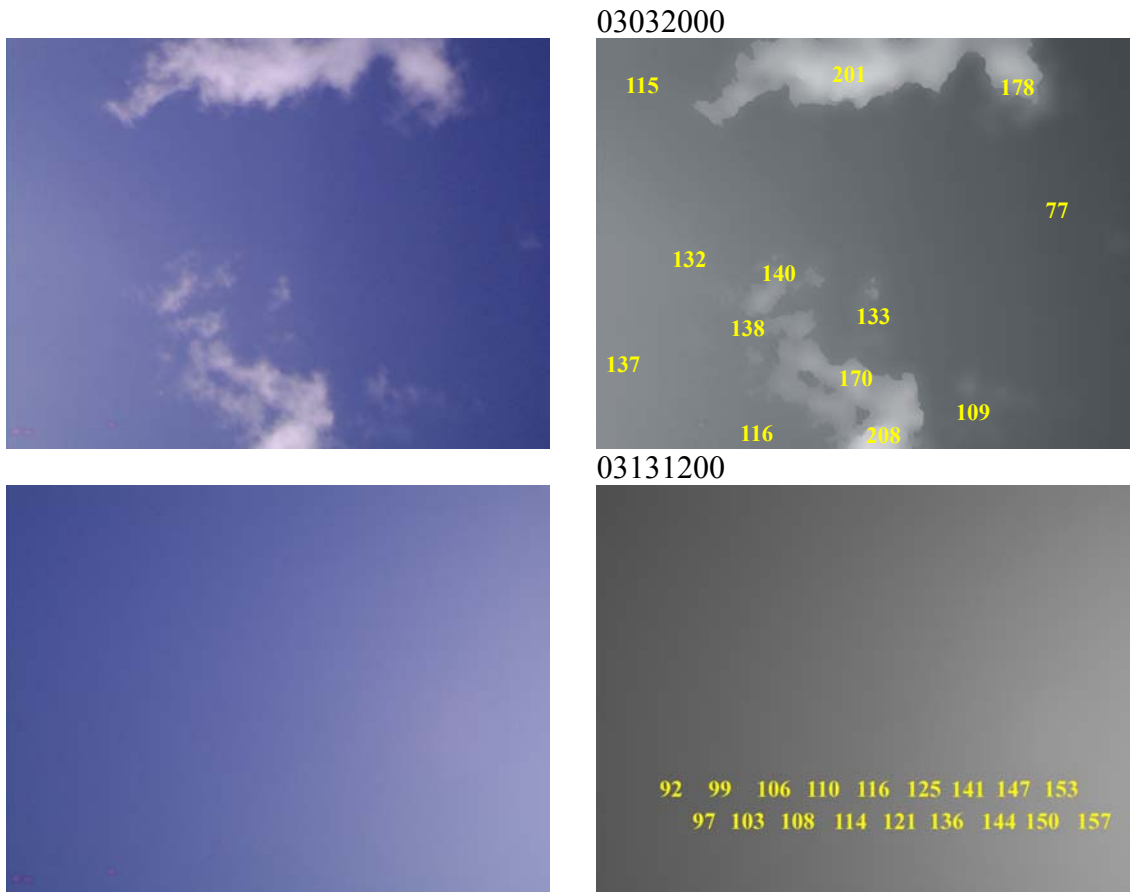


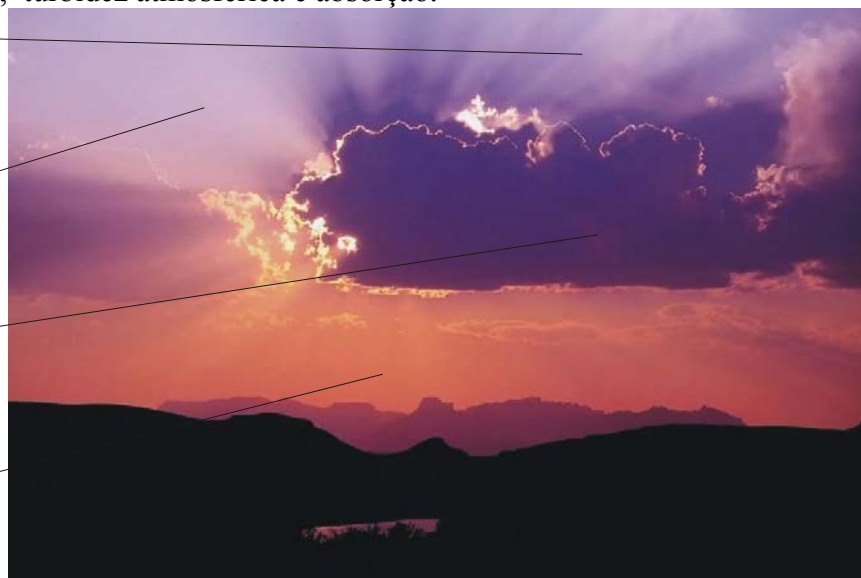
Figura 3. Foto ilustrando alguns dos fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera. Espalhamentos, turbidez atmosférica e absorção.

**Turbidês
(raios de Sol)**

**Espalhamento
Rayleigh (azul)**

Absorção

**Espalhamento Mie
(amarelo e laranja)**

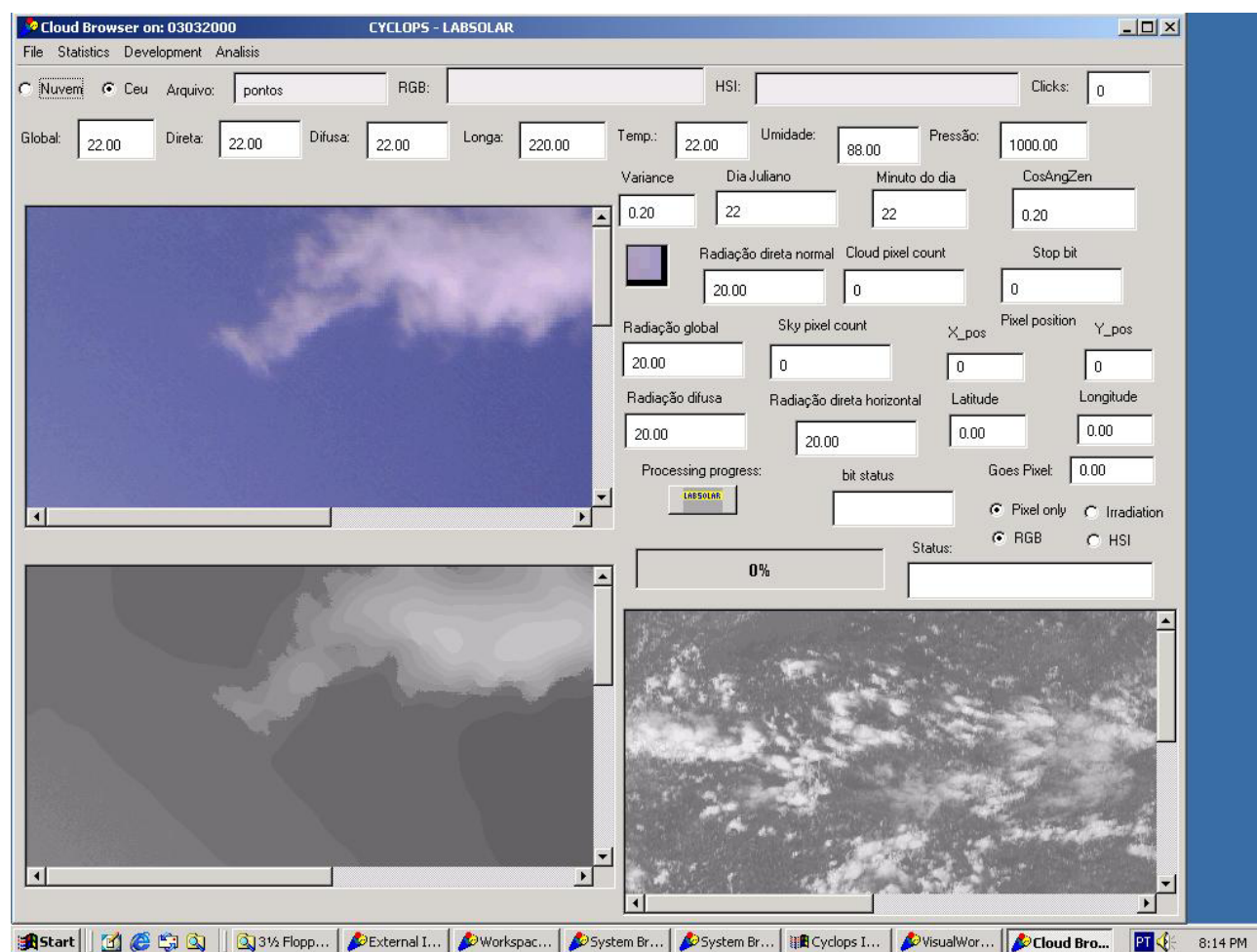


Os efeitos dos fenômenos físicos que induziram ao erro o sistema automático proposto, só puderam ser observados de forma mais acentuada, depois que foi feita uma análise utilizando filtros de difusão anisotrópica em uma versão monocromática das imagens coletadas. Os filtros de difusão foram inicialmente aplicados ao processamento de imagem por Perona e Maralik (1990) em imagens médicas. Depois de aplicado às imagens coletadas, o filtro de difusão efetuou a segmentação e homogeneização de regiões com pequenas diferenças na imagem. Isto permitiu a visualização da turbidez próxima ao Sol e de um gradiente de profundidade óptica das nuvens, segmentando-as em regiões similares de mesma

intensidade (superfícies isófonas). Para uma observação mais detalhada, é necessário que se observe as imagens com um sistema de visualização de imagens com uma interface gráfica mais refinada e de melhor qualidade. Tal interface está presente no aplicativo desenvolvido e permite uma visualização melhor dos resultados, conforme ilustrado na fig. 4.

O filtro de difusão anisotrópico disponível para análise das figuras foi desenvolvido para imagens monocromáticas. Filtro para imagens coloridas ainda não está desenvolvido para a pesquisa em andamento por ser de implementação matemática complexa e utilizar métodos numéricos para resolver equações diferenciais em espaço vetorial tridimensional (espaço de cores). As imagens analisadas em branco e preto são um espaço com valor escalar de pixels em níveis de cinza.

Figura 4 Interface gráfica do protótipo implementado, ilustrando o resultado do filtro de difusão com as superfícies isófonas, nas duas imagens à esquerda



5 CONCLUSÕES

A presença da brilhância próxima ao Sol induz erros de interpretação no índice de cobertura das nuvens. Nuvens próximas ao Sol tendem a ser mais brilhantes das que as longe do Sol. Isto impõe certas dificuldades aos sistemas automáticos de detecção de nuvens causando erros quando se tentar classificar em qual escala de transparência a nuvem se encontra, superestimando o resultado ou classificando o pixel para uma escala errada.

Este problema precisa ser abordado de forma correta para ser minimizado. Ao invés de se classificar os fenômenos presentes no céu como céu ou escalas de nuvem, talvez seja mais apropriado classifica-los em categorias como eles realmente aparecem. Uma sugestão de categorias de classificação poderia ser a seguinte:

- espalhamento Rayleigh,
- espalhamento devido à turbidéz atmosférica com espalhamento Rayleigh ao fundo
- espalhamento Mie
- espalhamento Mie com espalhamento Rayleigh ao fundo
- espalhamento Mie com nuvens ao fundo
- espalhamento devido às nuvens
- absorção devido às nuvens

Após a classificação, poderia se reagrupar as categorias de forma a atender o padrão de observação para nuvens ou céu. Isto traria vantagens de ter um sistema de análise mais controlado e uma estimativa de cobertura mais próxima do real.

Um resultado intermediário surpreendente do presente trabalho foi a segmentação da imagem das nuvens utilizando a difusão anisotrópica. Após a difusão pode-se segmentar com precisão as bordas das nuvens viabilizando um cálculo mais preciso da área de cobertura em diversas escalas de profundidade.

6 REFERÊNCIAS

- Detwiler A.. Analisis of cloud imagery using box counting . International Journal of Remote Sensing. vol. 11, no. 5, p. 887-898 1990.
- Duffie J. A., e Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons 1980. 919 p.
- Harrison E. F., Minnis P., Barkstrom B. R., Gibson G. G.. Radiation Budget a the Top of the Atmosphere. Atlas of Satellite Observations Related to Global Change 1995. 35 p
- Holle L. R. e MacKay S. A.. Tropical Cloudness from all-sky cameras on Barbados and adjacent Atlantic ocean area. Journal of Applied Meteorology. vol. 14 p. 1437-1450. 1975.
- Hoyt D. V. Interannual cloud-cover variations in the contiguous United States. Journal of Applied Meteorology vol. 17 p. 354-357 1978.
- Iqbal, M. Introduction to Solar Radiation. Academic Press, 1983. 390 p.
- Kreyszig, E. Advanced Engineering Mathematics, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc. 1993.1271 pag.
- Lenoble J.. Atmospheric Radiative Transfer. A. Deepak Publishing. 1993. 532p.
- Lillesand T. M., Kiefer R. W.. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons 1994. 750p.
- Mantelli Neto, S. L. Desenvolvimento de metodologia para a estimativa da cobertura de nuvens usando uma câmara de superfície e comparando com as imagens de satélite. Tese de mestrado do

Laboratório de Visão Computacional, Departamento de Informática e Estatística, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. 124 p

- Perona P. and J. Maralik, Scale-Space and edge detection using anisotropic diffusion, in Proceedings of IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. PAMI-12, no. 7, pp.629-639, 1990.

- Rossow W. B. . Clouds. Atlas of satellite observations related to Global change. International Satellite Cloud Climatology Project ISCCP, 1982. p.141-162

- Rummelhart, D.E., and McClelland, J.L., 1986, *Parallel Distributed Processing*, MIT Press.

-Souza, M. P. Desenvolvimento de uma metodologia para determinação de cobertura efetiva de nuvens. Tese de mestrado do INPE -Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999. 106 p.

-SNNS: Stuttgart Neural Network Simulator User Manual version 4.1. University of Stuttgart, report n. 6, 1995, 312 p.

- Vianello, R.L.; Alves, A.R., Meteorologia Básica e Aplicações. Universidade Federal de Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

- Wangenheim A., Introdução à Visão Computacional. Métodos, técnicas, Ferramentas e Aplicações. Apostila do Curso de pós-graduação em Ciências da Computação. Departamento de Informática e Estatística Universidade Federal de Santa Catarina 2000, 133 p.

- Weickert, J. Anisotropic. Diffusion in Image Processing. Ph. D. Thesis from Keiserslautern University, Germany 1996 140 p.

-Yamanouchi,T. Variations of Incidente Solar Flux and snow albedo on the solar Zenith Angleand Cloud Cover at Mizuho Station Antartica. Journal of the Meteorological Society of Japan. v.61,n.6,p.879-893,1993.