

# A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados

*(The significance of the cloud cover data and its variability - Methodology to data acquisition)*

M.P. de Souza Echer<sup>1,2</sup>, F.R. Martins<sup>3</sup> e E.B. Pereira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Faculdade de Tecnologia Thereza Porto Marques (FAETEC), Jacareí, SP, Brazil*

<sup>2</sup>*Divisão de Geofísica Espacial (DGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil*

<sup>3</sup>*Divisão de Meio Ambiente e Clima (DMA), Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil*

Recebido em 13/3/2006; Aceito em 9/5/2006

Este trabalho apresenta uma revisão dos aspectos ligados à influência das nuvens sobre o clima como também seus impactos no desenvolvimento científico, tecnológico e econômico de diversos setores da atividade humana. Conceitos básicos da física de nuvens são discutidos. Também são apresentadas as metodologias mais modernas para a determinação da cobertura de nuvens a partir de medidas feitas na superfície e por satélite.

**Palavras-chave:** nuvens, clima, radiação solar, observação de nuvens, instrumentação meteorológica.

This work is a review on the clouds influence on the weather/climate as well as on its impacts in applied sciences, technology and economic sectors. Basic concepts on cloud physics and its role in the climate system are presented, followed by current methods to determine the cloud cover amount from satellite images. A new method to determine the sky cloud cover, developed by the authors is also presented with its first results.

**Keywords:** clouds, weather, solar radiation, cloud observation, meteorological instruments.

## 1. Introdução

O crescente interesse pelo estudo do tempo e do clima pode ser compreendido como resultado da conscientização da sociedade em relação às conseqüências das atividades humanas sobre o meio ambiente. Nesse quadro de interesse direto de todos os níveis da sociedade, o pesquisador atua na divulgação do conhecimento numa linguagem acessível, que possibilite a participação de todos na discussão dos rumos que a sociedade deve tomar no sentido de preservar o meio ambiente e manter o desenvolvimento crescente do país. Neste artigo procuramos apresentar uma revisão do conhecimento sobre o papel das nuvens sobre o clima com especial ênfase no que se refere aos efeitos sobre a radiação solar.

Na tentativa de compreender o regime do tempo e a evolução do clima, a ciência vem estudando diversos parâmetros atmosféricos e tem conseguido grandes avanços na previsão do tempo e do clima. O termo “previsão” foi aplicado na meteorologia pelo almirante inglês Robert Fitzroy, significando um enunciado antecipado das condições meteorológicas e climáticas para um determinado lugar, área, ou rota durante um

período específico de tempo cronológico [1].

Nosso planeta funciona de forma análoga a uma máquina térmica que é alimentada pela fonte de energia oriunda da radiação solar nos trópicos e o radiador nos pólos. Sob a influência do movimento de rotação, essa máquina térmica natural impulsiona correntes de circulação na atmosfera e nos oceanos. Foi sob essa organização natural que se deu a origem e o desenvolvimento da vida na Terra [1]. O clima próximo à superfície deve ser compreendido como a síntese da permutação de massa e energia entre os domínios globais (atmosfera, hidrosfera, litosfera, criosfera e biosfera).

Nossa atmosfera, que é naturalmente uma camada fina de gases presa a Terra pela força da gravidade, tem o oxigênio e o nitrogênio como gases majoritários abaixo de 25 km de altitude. O argônio, dióxido de carbono, ozônio e vapor d’água são chamados gases minoritários. Desde a Revolução Industrial, que se deu na Europa do século XVIII, a atmosfera tem sofrido forte impacto causado pelo homem, através da inserção de gases e aerossóis<sup>2</sup> resultantes da queima de combustíveis fósseis; da construção de grandes centros ur-

<sup>1</sup>E-mail: mariza@dge.inpe.br.

<sup>2</sup>Aerossóis são constituídos por partículas pequenas (da ordem de alguns microns), sólidas ou líquidas, maiores que as moléculas, encontradas em suspensão na atmosfera. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, 1986.

banos e da alteração do uso do solo, como por exemplo, a transformação de florestas em pastagens ou do alagamento de grandes áreas para a construção de usinas hidroelétricas. Enfim, o homem tem provocado a modificação da composição da atmosfera e com isso tem interferido nas relações entre os domínios globais citados acima. Essa interferência leva às alterações significativas no clima com conseqüências diretas ou indiretas nas condições e na qualidade de vida.

Os avanços tecnológicos das últimas décadas levaram ao desenvolvimento de sistemas de computação com enorme capacidade de processamento, bem como houve um crescimento nos lançamentos de satélites destinados à observação da Terra e à previsão do tempo. A confiabilidade da previsão do tempo e do clima está relacionada ao conhecimento de diversos parâmetros atmosféricos necessários para alimentar os modelos computacionais de circulação atmosférica. Esses dados podem ser obtidos através das plataformas de coleta de dados em superfície, através de dados fornecidos por radiossondagens empregando balões meteorológicos e por equipamentos de sensoriamento remoto da atmosfera, tais como radar meteorológico, sistemas ópticos que operam raios lasers, fotômetros, entre outros. Os satélites artificiais fornecem muitas informações relevantes que são utilizadas na parametrização dos processos físicos que ocorrem na atmosfera. A utilização de satélites tem aumentado a qualidade e o detalhamento das informações sobre a distribuição global das nuvens e o papel desempenhado por elas no balanço radiativo da Terra [2-5]. No entanto, dados coletados em superfície continuam sendo essenciais tanto para a alimentação dos modelos como para validação dos resultados fornecidos pelos mesmos.

Neste trabalho, discutiremos a importância do conhecimento de informações sobre a cobertura de nuvens, uma vez que elas atuam como principal agente modulador da principal fonte de energia em nosso planeta: a radiação solar. Neste artigo vamos considerar o termo cobertura de nuvens como o parâmetro que caracteriza a quantidade de nuvens presente no céu em um determinado instante de tempo. Utilizando observações em plataformas orbitais constatou-se, que essa cobertura de nuvens, embora variável, pode atingir a aproximadamente 50% do planeta. Esse percentual de cobertura aliado ao potencial de reflexão que pode chegar a 23% para radiação solar incidente, tornam as nuvens, os agentes mais significativo para o balanço radiativo da Terra.

Inicialmente destacaremos a importância da informação sobre a cobertura de nuvens em diversas áreas do conhecimento, apresentando uma discussão sucinta de alguns estudos em desenvolvimento. A seqüência deste trabalho fornecerá uma breve descrição sobre a constituição e formação das nuvens, a classificação das nuvens, a determinação da cobertura de nuvens através da inspeção visual e através do emprego de satélites; e, finalmente, os esforços para o desenvolvimento de

instrumentação para a determinação automática da fração de cobertura de nuvens em superfície.

## 2. A importância do conhecimento da cobertura de nuvens

Dentre os componentes da atmosfera, a cobertura de nuvens é o principal agente nos processos de absorção e espalhamento da luz solar que incide sobre a Terra, seguido pelos gases e pelos aerossóis. Devido a isso, informações contínuas sobre a cobertura de nuvens são de grande importância e auxiliam na compreensão de várias questões ainda em aberto em diversas áreas das ciências atmosféricas e meio ambiente.

A Terra está envolta quase que permanentemente por uma cobertura de nuvens que pode chegar a 50% de sua área total, o que torna as nuvens uma componente atmosférica de grande relevância nos processos de absorção e espalhamento da radiação solar. A radiação solar em sua trajetória em direção à superfície terrestre encontra-se com as nuvens, cuja constituição básica são os cristais de gelo e gotículas de água. A radiação solar na região visível ( $0,39-0,77 \mu\text{m}^3$ ) do espectro eletromagnético (*Short Wave - SW*) ao interagir com uma nuvem, penetra em seu interior. Parte da radiação consegue “atravessar” a nuvem enquanto outra parte é retida na nuvem ou refletida de volta ao espaço em decorrência dos sucessivos processos radiativos de espalhamento e absorção que ocorrem entre a radiação solar e os cristais e gotículas. A componente da radiação que é transmitida através da nuvem atinge à superfície terrestre, podendo ser percebida em dias nublados. A superfície da Terra absorve a radiação solar incidente e reemite a radiação na faixa espectral do infravermelho ( $0,77-1000 \mu\text{m}$ , *Long Wave - LW*). As nuvens funcionam como agentes que aprisionam a radiação infravermelha que é emitida pela superfície e pela atmosfera, um efeito semelhante ao efeito estufa. O efeito combinado de retenção-reflexão-transmissão da radiação em toda a faixa do espectro eletromagnético (*SW-LW*) pelas nuvens é conhecido como forçante das nuvens (do Inglês: *cloud forcing*). Diversos estudos sobre esse efeito e suas implicações no clima foram publicados mostrando a importância do *cloud-forcing* para o planeta [6-8].

As nuvens podem fornecer informações importantes ao estudo das relações Sol-Terra-Clima. Um dos mecanismos propostos para explicar a relação que se observa entre mudanças no clima da Terra e a atividade solar é a modulação da cobertura de nuvens por íons atmosféricos, produzidos por raios cósmicos [9-12]. O Sol possui um ciclo de aproximadamente 11 anos, e durante sua fase de máxima atividade, a radiação cósmica (radiação de fundo da galáxia) é bastante atenuada nas camadas superiores de nossa atmosfera por uma espécie de bloqueio magnético. Quando o Sol entra em um período de menor atividade, esse bloqueio é en-

<sup>3</sup> $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ .

fraquecido e ocorre maior incidência de raios cósmicos até a região da alta troposfera [13]. Alguns estudos indicam que a radiação cósmica pode produzir íons que atuam como núcleos para condensação de nuvens.

Estudos desenvolvidos nas áreas de Física e Medicina mostram que a exposição exagerada à radiação ultravioleta B (comprimentos de onda na faixa 0,28-0,32  $\mu\text{m}$ ), pode trazer malefícios à saúde humana. Malefícios que vão desde o eritema ao câncer de pele [14, 15]. Compreendendo a importância de adotar uma medida de proteção contra os efeitos da exposição exagerada à radiação ultravioleta foi criado o Índice UV, para informar ao público leigo sobre os riscos associados à essa exposição. Silva [16] propõe em seu trabalho um algoritmo de previsão para o índice de UV-B em todo território brasileiro, com 24 horas de antecedência, sendo assim possível o conhecimento prévio do nível de radiação em um determinado ambiente. Um dos parâmetros de entrada utilizado por esse modelo é a cobertura de nuvens. A confiabilidade do Índice UV está vinculada à precisão da informação de cobertura de nuvens disponível.

A cobertura de nuvens também desempenha papel relevante na arquitetura e construção civil, uma vez que o conhecimento da dinâmica da luz natural auxilia no desenvolvimento de projetos que maximizam o conforto térmico de ambientes e levam a maior eficiência do aproveitamento da luminosidade nas construções. As condições de luminosidade variam de acordo com as condições de céu e da cobertura de nuvens, criando assim diferentes efeitos no ambiente projetado [17].

O aproveitamento da energia da radiação solar é uma das áreas de pesquisa de grande interesse econômico e ambiental. Sua utilização atenderia a demanda da sociedade por uso de fontes renováveis de energia em substituição ao uso de combustíveis fósseis reduzindo assim a emissão de gases do efeito estufa ( $\text{CO}_2$ , CO, etc.). As nuvens são o principal fator de modulação da radiação solar que atravessa nossa atmosfera e, dessa forma, informações confiáveis sobre a cobertura de nuvens são dados essenciais para a obtenção de estimativas precisas do fluxo de radiação solar incidente na superfície.

Além disso, o conhecimento da cobertura de nuvens tem outras aplicações importantes na área energética, com destaque na otimização do despacho de carga em linhas de transmissão e otimização da operação de sistemas de iluminação pública [18].

### 3. Formação das nuvens

A característica visual principal da Terra, quando observada do espaço, é sua cobertura de nuvens. As nuvens são volumes com alta concentração de gotículas de água e/ou cristais de gelo em suspensão na atmosfera, podendo ocorrer em qualquer região da Terra entre a superfície e a tropopausa. Na formação das nuvens, a condensação do vapor d'água em gotículas exige a presença de vapor d'água na atmosfera e de núcleos de condensação em quantidade suficiente. Núcleos de

condensação são partículas em torno das quais o vapor d'água se condensa. Tais núcleos são constituídos, geralmente, de substâncias higroscópicas, ou seja, material ou substância que tem afinidade pelo vapor d'água sendo capazes, portanto, de absorvê-lo da atmosfera ou de uma mistura gasosa. Como exemplo pode-se citar os sulfatos de origem marinha, cuja presença pode ser facilmente percebida pelo seu cheiro característico de maresia em regiões litorâneas. O processo de condensação ocorre quando o ar se resfria pela ascensão adiabática. A umidade relativa aumenta, mas antes de atingir 100%, inicia-se o processo de condensação em torno dos núcleos de condensação mais ativos para a formação das nuvens. Na ausência de núcleos de condensação, a atmosfera pode atingir um estado de supersaturação e as nuvens não são formadas [19, 20].

### 4. Processos radiativos em nuvens

A radiação solar ao atravessar a atmosfera em direção à superfície terrestre pode ser absorvida e/ou espalhada pela atmosfera. A Fig. 1 apresenta os espectros de radiação eletromagnética da radiação solar desde sua emissão no Sol até sua incidência na superfície. O espectro de radiação emitido pelo Sol assume a hipótese da aproximação de corpo negro com temperatura de 5900 K. A absorção da radiação ocorre devido à presença de moléculas ou átomos que compõem a atmosfera. Por exemplo, o  $\text{O}_2$  e o  $\text{O}_3$  apresentam fortes bandas de absorção na região ultravioleta (0,001-0,39  $\mu\text{m}$ ) do espectro eletromagnético, e outras espécies como  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  absorvem fortemente na região do infravermelho (0,7-1000  $\mu\text{m}$ ), como pode ser visto na Fig. 1. A região do visível apresenta-se como uma janela atmosférica, pois não ocorrem bandas de absorção neste intervalo espectral. Por esta razão, todo o sistema biótico adaptou-se para o aproveitamento da energia situada exatamente nessa faixa do espectro da radiação [21].

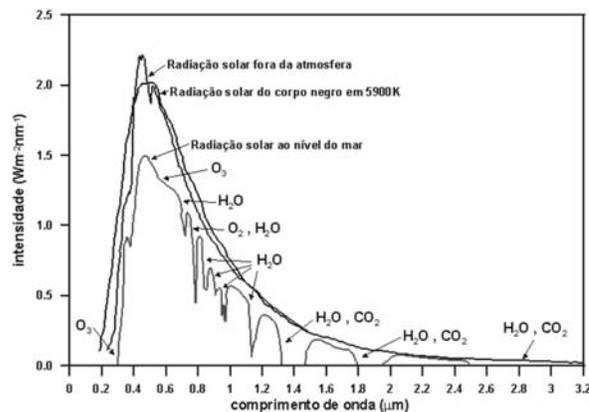


Figura 1 - Curvas do espectro de emissão de radiação pelo Sol assumindo a aproximação de corpo negro à uma temperatura de 5.900 K; da irradiação solar que atinge o topo da atmosfera e da irradiação solar incidente na superfície ao nível do mar apresentando as bandas de absorção da radiação incidente pelos diferentes gases constituintes da atmosfera. Fonte: modificada de Martins [37]

As nuvens desempenham um papel importante na transmitância atmosférica da radiação de ondas curtas e ondas longas e seus efeitos radiativos no balanço energético do planeta tem sido estudado extensivamente durante os últimos anos [6, 22-24]. A influência das nuvens, na transmissão da radiação solar de ondas curtas através da atmosfera é dominada pelo processo de espalhamento da radiação. A absorção da radiação de ondas curtas (SW) pela água líquida ou por cristais de gelo pode, na maioria das situações, ser desprezada [25-27]. O espalhamento da radiação de ondas curtas por nuvens depende da espessura óptica das mesmas, da distribuição de tamanhos das gotículas, do conteúdo e do estado físico da água [22]. As propriedades ópticas de espalhamento da radiação nas nuvens podem ser determinadas pela teoria de Mie que descreve todos os processos de difração e refração que ocorrem em cada centro espalhador [28-30].

Com relação à interação com a radiação de ondas longas, as nuvens funcionam como agentes que aprisionam a parte da radiação emitida pela superfície e pela atmosfera. Ao efeito total decorrente da absorção-reflexão da radiação solar pelas nuvens dá-se o nome

de forçante das nuvens (*cloud-forcing*), visto anteriormente. O efeito da cobertura de nuvens na transmitância atmosférica da radiação solar dependerá do tipo de nuvem que compõem a cobertura.

A Fig. 2 apresenta a média anual no território brasileiro da distribuição climatológica da nebulosidade e da irradiação solar global na superfície. Os dados de nebulosidade são fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a partir de observações de campo realizadas no período de 1931 a 1990 [31]. O mapa de irradiação solar global foi obtido a partir de valores médios das estimativas de total diário da irradiação solar global fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR no período 1995-2002. Essas estimativas foram validadas por meio de comparação com medidas de campo realizadas em diferentes regiões do país a fim de avaliar sua confiabilidade [32]. Uma descrição mais detalhada do modelo BRASIL-SR bem como das parametrizações por ele adotadas e os resultados de comparações das estimativas fornecidas com valores medidos em superfície foram apresentados neste mesmo periódico [33].

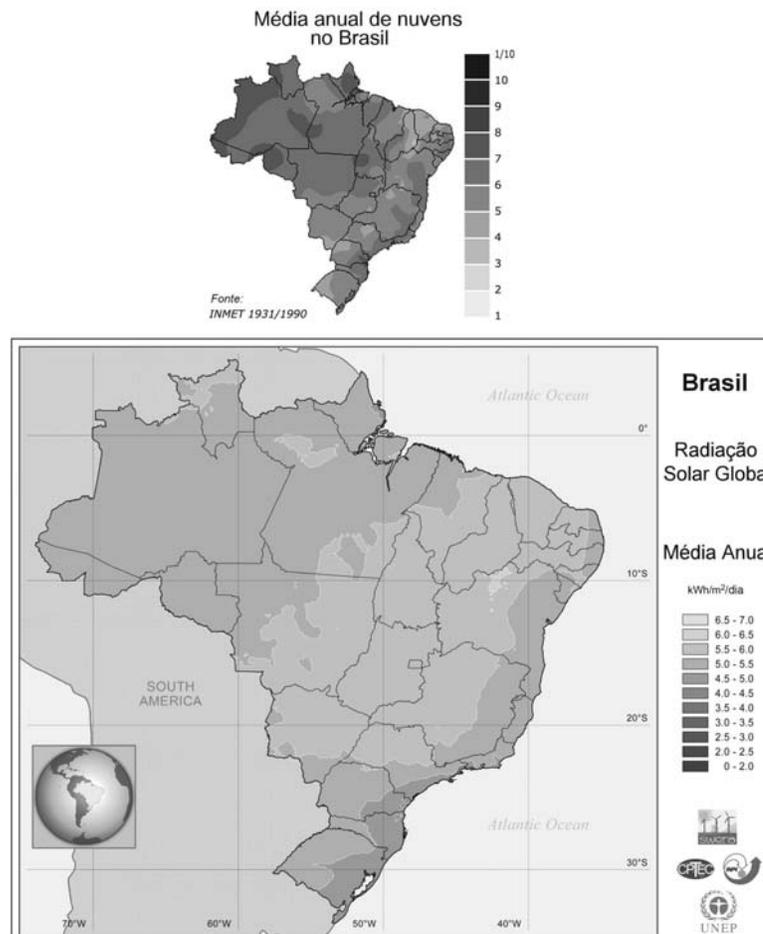


Figura 2 - Distribuição da nebulosidade e da radiação solar ao longo do território nacional.

Pode-se observar a partir da análise dos mapas apresentados que apesar das diferentes características climáticas apresentadas entre as regiões norte e sul do Brasil, a média anual do total diário de irradiação solar global é bastante homogênea em todo o território brasileiro. O valor máximo de irradiação solar ocorre no norte do estado da Bahia próximo à fronteira do Piauí - cerca de  $6.5 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ . Essa área apresenta um clima semi-árido com baixa precipitação (em torno de  $300 \text{ mm}$  anuais) e a menor nebulosidade apresentada no Brasil. O valor mínimo de irradiação solar (cerca de  $4.25 \text{ kWh/m}^2 \text{ day}$ ) foi obtido para o nordeste do estado de Santa Catarina que é caracterizada por uma precipitação elevada em comparação com o restante do país. Estudos mostram que a região sul está sujeita durante o verão (dezembro a março) a uma irradiação solar média superior a irradiação solar incidente na região norte apesar de sua proximidade ao Equador [32]. Isso é explicado pelas características climáticas da região amazônica: elevada precipitação e cobertura de nuvens persistente durante os meses de verão devido à forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ). As regiões norte e central do Brasil recebem a maior irradiação solar do que as demais regiões do país durante a estação seca (junho a setembro) quando a precipitação é baixa e ocorre a predominância de dias de céu claro. Vale ressaltar aqui que os efeitos de espalhamento e absorção da radiação solar por aerossóis emitidos nos eventos de queimada que acontecem predominantemente durante a estação seca não foram considerados na confecção do mapa apresentado na Fig. 2. Dessa forma, a irradiação solar estimada para as regiões norte e central do Brasil, mais afetadas pela ocorrência de queimadas, durante o período de maio a setembro

apresenta desvios que podem atingir até 30% em relação aos valores médios medidos em superfície. Nas demais regiões os desvios apresentados são da ordem de 6%.

## 5. Classificação de nuvens

A classificação internacional de nuvens foi publicada em 1896, e tem sido, desde então, revisada periodicamente. A última revisão define e descreve dez tipos de nuvens, que são classificadas de acordo com características físicas como altitude e forma: *Cirrus*, *Cirrocumulus* e *Cirrostratus* (nuvens altas), *Altostratus*, *Altostratus*, *Nimbostratus* (nuvens médias), *Stratus*, *Stratocumulus*, *Cumulus*, *Cumulonimbus* (nuvens baixas) [19]. A Fig. 3 apresenta os tipos nuvens conforme estabelecido na classificação internacional de nuvens da Organização Mundial Meteorológica (OMM). Estudos realizados determinaram que a cobertura de nuvens, tanto sobre áreas continentais quanto em áreas oceânicas, é constituída principalmente por nuvens *Stratus*, *Altostratus* e *Cirrus* [34]. Cada tipo de nuvem possui propriedades ópticas diferentes em função de sua composição (conteúdo de água, distribuição de tamanhos das gotículas, estado físico da água, etc.), de modo que a transmitância da radiação solar para a superfície está relacionado ao tipo de nuvem presente na cobertura de nuvens sobre o local de estudo.

Existem duas formas básicas para o trabalho de observação do céu, com o objetivo de determinar a fração de cobertura de nuvens (nebulosidade) e sua classificação: através da inspeção visual realizada por observadores na superfície terrestre e através do uso de satélites.

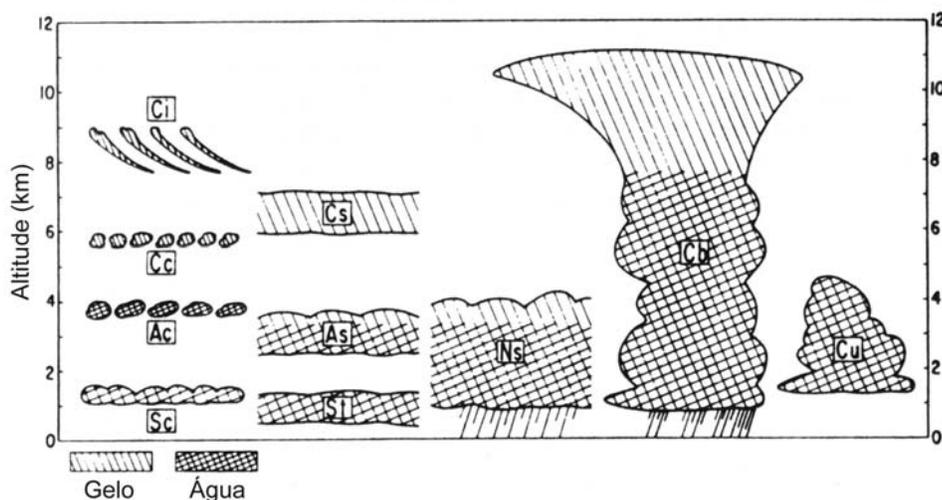


Figura 3 - Representação esquemática da classificação de nuvens segundo forma e altitude. As siglas apresentadas na figura representam: Ci - cirrus; Cs - cirro stratus; Cc - cirrocumulus; Ac - alto-cumulus; Sc - stratocumulus; As - altostratus; St - stratus; Ns - Nimbostratus; Cu - cumulus; e Cb - cumulonimbus. Fonte: Modificado de Lenoble (1993).

## 6. Determinação da cobertura de nuvens através da observação visual

A observação da cobertura de nuvens pode ser realizada através da inspeção do céu por técnicos treinados que trabalham em estações meteorológicas, conforme padrões definidos pela OMM. No procedimento usado durante a observação, o observador deverá colocar-se num ponto que ofereça o máximo de desobstrução da visão do céu em todas as direções. A estimativa deverá ser feita supondo-se que a nebulosidade existente esteja distribuída em uma só camada contínua. A observação poderá ainda ser facilitada, dividindo-se a abóbada celeste em metades ou quadrantes. A seguir, soma-se o total das metades ou dos quadrantes [35]. A quantidade parcial ou total de nuvens é expressa por uma fração proporcional à área encoberta e com aproximações em oitavos ou décimos. Quando a quantidade de nuvens for grande, será mais fácil estimar a área descoberta e, por diferença, obter a área encoberta. Na observação visual é recomendado ignorar a parte do céu próximo ao horizonte, pois nesta região as nuvens aparentam estar mais agrupadas, em função do efeito da perspectiva, parecendo o total de nuvens ser maior do que o real. Se existir mais de uma camada na hora da observação, somente a porção visível de cada uma deve ser consi-

derada, a fim de se obter um total máximo de 8/8. Nas ocasiões de nevoeiros densos, o estado do céu deve ser retratado como completamente nublado. Caso o Sol ou as estrelas possam ser vistos através do nevoeiro e não haja nenhuma evidência de nuvem acima dele, o estado de céu deve ser relatado como claro. Pelo método aplicado, percebe-se que a observação visual realizada por técnicos em superfície, embora amplamente aceita, possui um caráter bastante subjetivo.

A Fig. 4 apresenta três gráficos com a avaliação de dois experientes observadores de superfície. Cada observador realizou isoladamente o trabalho de inspeção das imagens que foram coletadas ao longo do dia, em presença de vários cenários de luminosidade. As imagens foram coletadas utilizando um equipamento digital com sensor CCD modelo PCS20232 acoplado a um micro computador responsável pelo acionamento do equipamento e armazenamento das imagens. Em uma tabela foram marcados os percentuais de céu claro e de nuvens que encontraram na análise das imagens feitas do céu na ilha Rei George na Estação Brasileira Comandante Ferraz ( $62^{\circ}05' S$   $58^{\circ}23.5' W$ ). Os observadores atribuíram uma classificação denominada “Indeterminado” para a fração da área da foto que não conseguiram classificar como céu claro ou céu encoberto [36].

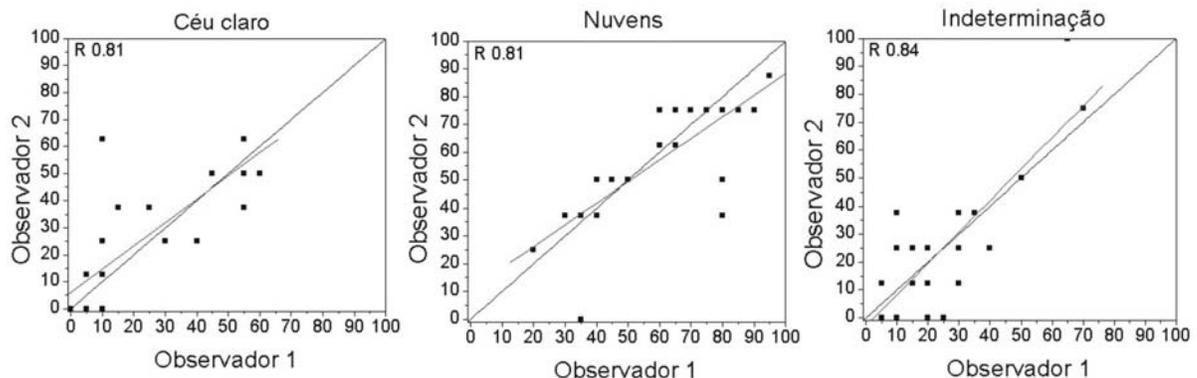


Figura 4 - Respostas da inspeção visual de dois observadores para um grupo de fotos digitais. O campo de visão utilizado para a captura das imagens foi de  $36^{\circ}$ .

O fator de correlação igual a 0,81 mostra que houve uma grande concordância entre a classificação de céu claro apresentada pelos 2 observadores. No entanto, é possível observar na Fig. 4a um ponto isolado dos demais, onde o observador 2 descreve uma das imagens com 60% de céu claro enquanto que o observador 1 classifica apenas 10% da imagem na mesma condição. Esse ponto é um exemplo de como fatores subjetivos e associados ao observador podem interferir na precisão das medidas de superfície realizadas por inspeção visual.

A correlação entre os valores fornecidos pelos obser-

vadores também foi igual a 0,81 para a fração de céu encoberto. Entretanto, é possível observar na Fig. 4(b) a ocorrência de um segmento com sete pontos para os quais o observador 2 classificou 75% em condição de céu encoberto enquanto que a classificação apresentada pelo observador 1 apresentou uma variação entre os valores de 60% e 90%. Essas discrepâncias confirmam que a descrição visual da cobertura de nuvens, embora amplamente aceita, é um método bastante subjetivo. A fração de indeterminação mostrou a melhor correlação entre os resultados apresentados pelos observadores de

0,84 [36].

Alguns fatores que podem ter contribuído para uma boa correlação entre as avaliações dos observadores. Dentre eles, podemos citar a experiência dos observadores que participaram do experimento e o fato de que o campo de visão era inferior a 180° uma vez que todo o trabalho foi realizado com o emprego de imagens e não em tempo real no campo. Dentro deste contexto, os índices de incerteza devem ser maiores quando a avaliação é realizada levando em consideração todo o céu, pois a presença de nuvens no horizonte pode causar equívocos de classificação devido ao efeito de perspectiva.

## 7. Determinação da fração de cobertura de nuvens através do emprego de imagens de satélite

Diversas técnicas foram publicadas ao longo dos anos para a determinação dos valores da irradiância visível para determinação de céu claro e céu encoberto. O objetivo no desenvolvimento dessas técnicas é estudar as propriedades ópticas das nuvens e sua influência no balanço radiativo da Terra. As técnicas desenvolvidas podem ser agrupadas da seguinte forma: a) técnicas que estabelecem valores limiares para a detecção de nuvens e avaliam pixel a pixel da imagem de um ou mais canais espectrais fornecidos pelo satélite; b) técnicas que analisam propriedades estatísticas das irradiância visível e/ou infravermelha em grupos de píxeis<sup>4</sup> ou em parte de imagens.

No Brasil, diversos estudos sobre o assunto vêm sendo publicados. Martins [37] desenvolveu um algoritmo que utiliza a razão entre as radiâncias medidas nos canais infravermelho e visível pelo satélite GOES-8 para a determinação do coeficiente de cobertura de nuvens. Neste estudo a refletância medida pelo satélite em condição de céu claro é identificada através dos maiores valores de razão entre as radiâncias infravermelha (IR) e visível (VIS) uma vez que um pixel sem nuvens apresenta características associadas à superfície da Terra: temperatura elevada e albedo planetário reduzido. Por outro lado, píxeis encobertos por nuvens apresentam características inversas, baixas temperaturas e albedo elevado quando comparado com a cobertura do solo, na ausência de neve ou gelo. Ceballos *et al.* [38] emprega uma metodologia baseada em análise de conjuntos (clusters) com o emprego de quatro variáveis obtidas com o uso do satélite GOES-8: as radiâncias e as texturas dos canais 1(VIS) e 4(IR). As texturas representam a variabilidade espacial das radiâncias nos dois canais

determinadas a partir da variância das mesmas numa área de 3x3 píxeis das imagens do satélite.

Todas as técnicas desenvolvidas e propostas na literatura apresentam problemas semelhantes: dificuldade na definição da ocorrência de contaminação por nuvens em um pixel da imagem em razão da presença de nuvens com diferentes emissividades e a dependência que apresentam em relação às propriedades da superfície. Um estudo realizado pelo *ISCCP* concluiu que a avaliação dos algoritmos de nuvens está limitada por dois fatores: a) as características dos dados de satélite disponíveis, tais como resolução espacial e espectral; b) a falta de um banco de dados de “verdade terrestre” que permita a comparação entre os resultados dos diversos algoritmos e a avaliação do desempenho de cada um deles [37].

Wielick e Parker [39] analisaram seis técnicas para a determinação de cobertura de nuvens com uso de satélites. As duas primeiras eram técnicas de bandas monoespectrais que verificam pixel a pixel se a refletância (espectro visível) ou temperatura (espectro infravermelho) atingem o limiar que define o pixel como sendo de céu claro ou nublado. As duas técnicas seguintes eram bi-espectrais, ou seja, utilizam imagens de bandas no espectro visível e infravermelho para caracterizar o pixel como claro ou nublado. As duas últimas técnicas baseiam-se na variabilidade espacial dentro de um campo da imagem para determinar a cobertura de nuvens. Os autores concluíram que a precisão dos resultados obtidos com qualquer uma das técnicas empregadas apresenta uma forte dependência em relação à resolução espacial das imagens de satélite. Além disso, não foi possível identificar qual técnica apresentou melhores resultados.

As dificuldades apresentadas para validação das técnicas propostas na literatura através do emprego de imagens de satélites deixam clara a grande necessidade de resultados de dados contínuos de verdade terrestre sobre cobertura de nuvens. Contudo, como visto no item anterior, a base de dados de verdade terrestre, neste caso, é produto de observações visuais realizadas pelos operadores de estações meteorológicas e aeroportos. Os valores catalogados resultantes da aquisição dos dados em superfície por observadores, podem estar sujeitos a variações que dependem da área coberta pelo observador, da visibilidade no momento da observação e ainda do efeito de perspectiva entre a posição relativa do observador e as nuvens. Além das imprecisões mencionadas, existem fatores que estão relacionados aos diferentes campos de visão do observador na superfície e através do imageador do satélite, a imprecisão no processo de navegação das imagens de satélite, e a dife-

<sup>4</sup>Definição de pixel: elemento de imagem. O “vocabulário ortográfico da língua portuguesa” não registra o verbete “pixel”. O Dicionário Michaelis (1998) o registra como uma palavra inglesa, assim como o dicionário Houaiss o registra e o seu plural em inglês como “pixels”. A palavra não existe oficialmente na língua portuguesa, entretanto devido à dificuldade de encontrarmos um termo equivalente em português tornou-se inevitável seu uso no presente trabalho. Neste caso, usaremos o verbete pixel e seu plural como seguiria a regra geral de paroxítonas terminadas em “el”: pixel → píxeis

rença de escalas do tempo de observação e do horário da observação da cobertura de nuvens realizadas visualmente e por varredura do satélite. Até o presente momento, não existe uma maneira simples de comparar os resultados dos algoritmos que utilizam imagens de satélites e valores medidos em superfície, tão pouco existe uma padronização para determinação automática da fração de cobertura de nuvens a partir da análise de imagens digitais coletadas em superfície.

Outro aspecto importante que diferencia as observações com o uso de satélite das observações feitas em superfície é a possibilidade de estimar a espessura óptica das nuvens. Nenhuma das metodologias para a

determinação da fração de cobertura de nuvens a partir da superfície em uso atualmente é capaz de fornecer essa estimativa que é de grande utilidade na avaliação do fluxo de radiação solar que incide na superfície [40].

A Fig. 5 apresenta duas imagens do satélite GOES-8 a primeira (a) no canal visível e a segunda (b) no infravermelho, um quadrado em vermelho demarca a região de Florianópolis, local utilizado pelo grupo da Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA/CPTEC/INPE) para experimentos de instrumentação de superfície para captura de imagens digitais, como será visto na próxima seção do trabalho.

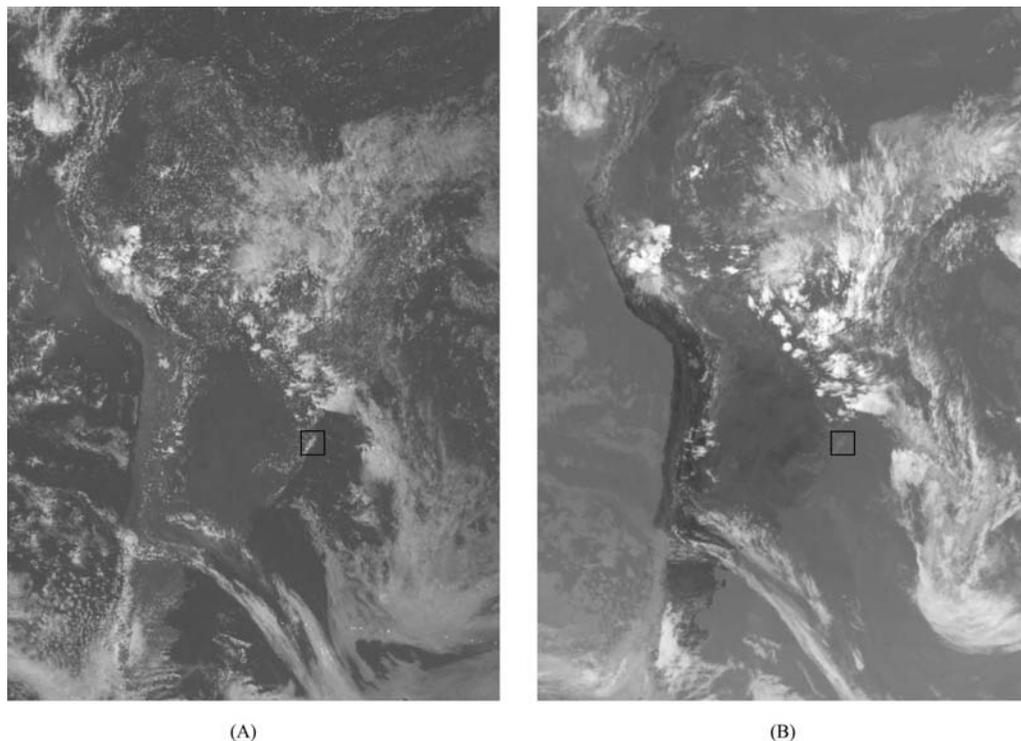


Figura 5 - Imagens do satélite GOES-8 em 08/01/2002-17h45UTC (a) imagem no espectro visível ( $0,52-0,72 \mu\text{m}$ ) e (b) no espectro infravermelho termal ( $11,5-12,5 \mu\text{m}$ ). Região de Florianópolis está demarcada pelo retângulo.

## 8. Instrumentação de superfície para determinação da cobertura de nuvens

Trabalhos desenvolvidos por Santos [41], Holle e MacKay [42] entre outros, mostram a persistência na busca de obter informações sobre a cobertura de nuvens através de imagens de todo o céu, adquiridas com câmeras e lente grande angular do tipo “olho de peixe” e chapas fotográficas. Após a revelação das chapas fotográficas a fração da cobertura de nuvem era realizada com o auxílio de uma grade para planificação das

imagens e posterior mapeamento das nuvens. Shields *et al.* [43], Feister *et al.* [44] propõem metodologia para determinação da cobertura de nuvens utilizando câmera digital e algoritmos que utilizam a razão entre o vermelho e o azul do sistema RGB de cores. Os esforços empregados por diversos grupos de pesquisas para obtenção da fração de cobertura de nuvens em superfície são motivados, pela importância desse tipo de informação para a comunidade científica internacional.

Comercialmente ainda é extremamente restrito o mercado produtor de sistemas comerciais para a observação de nuvens em superfície. Entre os sistemas mais

conhecidos existe um equipamento fabricado pela *Yankee Environmental System*, chamado *Total Sky Imager (TSI)* em duas versões (modelo 440 e modelo 880) para fornecer a cobertura de nuvens em superfície. Esse equipamento pode ser visualizado na Fig. 6. O sistema possui uma calota convexa polida sobre uma base aquecida que evita a condensação de água. Fixo à base existe um braço que sustenta uma câmera apontando para o centro da calota. O sistema do *TSI-880* permite o armazenamento de imagens enquanto que, o *TSI-440* necessita da transferência das imagens capturadas para outro dispositivo. O custo desse tipo de equipamento é elevado (cerca de quatorze mil dólares) para que entre em operações de rotina nas estações de superfície. Além disso, o sistema processa imagens capturadas em *RGB* para análises da fração de cobertura de nuvens, o que pode comprometer os resultados uma vez que o céu claro se caracteriza por tons azuis, com matizes que vão do verde ao vermelho e as nuvens, por sua vez, possuem cor branca com matizes de cores que vão do azul ao vermelho.



Figura 6 - Imageador TSI 440 em uso nas estações da rede de coleta de dados SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais).

Souza [45] desenvolveu um algoritmo capaz de reconhecer pixels contaminados por nuvens em imagens do céu captadas por câmeras digitais. O objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um método de processamento digital de imagens, para determinação da cobertura efetiva de nuvens, a partir de imagens obtidas

na superfície com um imageador digital de baixo custo construído para o experimento. O trabalho foi proposto para ser aplicado primordialmente à Antártica com o intuito de ser empregado como “verdade terrestre” para validação dos dados de satélites que geram informações relevantes para estudo sobre o clima. É nessa região que ocorrem as maiores dificuldades para os atuais algoritmos de monitoração da extensão do gelo marinho em função da semelhança entre as respostas espectrais das nuvens e das superfícies glaciadas à incidência de radiação solar [24]. O continente antártico e os oceanos a ele associados não dispõem de uma rede de observação adequada para esse tipo de estudo, devido à extensão de sua área e sua inacessibilidade. O uso de sensores a bordo de satélites permite, em princípio, suplantando essa dificuldade logística. Mas, para isso, existe a necessidade de se estabelecer uma rede mínima de estações de observação em superfície que servirão de base de intercomparação e validação para os dados obtidos pelos satélites.

A aquisição de imagens foi feita no sistema *RGB* de cores (vermelho, verde e azul), sendo as imagens posteriormente transformadas para o espaço de atributos *IHS* - Intensidade (*Intensity*), Matiz (*Hue*) e Saturação (*Saturation*). A principal característica desta metodologia está baseada na diferença existente entre os níveis de saturação do céu claro e das nuvens. As nuvens apresentam alta refletância e tons pastéis, o que revela a mistura de vários comprimentos de onda da luz visível. Por outro lado, o céu apresenta uma alta saturação revelando um padrão menos variado de comprimentos de onda na sua composição - “uma cor mais pura” [36, 46].

Um exemplo do resultado obtido com este algoritmo pode ser visualizado na Fig. 7. O painel no canto superior-esquerdo é a imagem original coletada em *RGB*, o painel inferior-esquerdo apresenta a resposta da saturação para a imagem original. O painel superior-direito apresenta a resposta da classificação realizada pelo programa, utilizando a componente da saturação do espaço *IHS*. O último painel apresenta o resultado com a classificação dos pixels como céu claro, céu encoberto e indeterminado.

Os resultados obtidos com a aplicação deste algoritmo mostraram a adequação da metodologia proposta e incentivaram a continuidade do seu desenvolvimento [36, 46]. Souza Echer [8] junto ao grupo da Divisão de Clima e Meio Ambiente do (DMA/CPTEC/INPE) desenvolveu um sistema imageador de nuvens composto basicamente por uma câmera digital marca Pixera, modelo PCS20232, com sensor do tipo *Charge Coupled Device (CCD)* especificada para a faixa visível do espectro de radiação solar (0,39 a 0,77  $\mu\text{m}$ ), com uma lente grande angular com um campo de visão de 183°. O processamento das imagens adquiridas com o sistema é realizado com o algoritmo descrito por Souza [45]. O trabalho teve como finalidade desenvolver um protótipo de baixo custo capaz de produzir dados de alta quali-

dade sobre a fração a de cobertura de nuvens no céu Souza Echer *et al.* [46]. O fluxograma do sistema pode ser visualizado na Fig. 8.

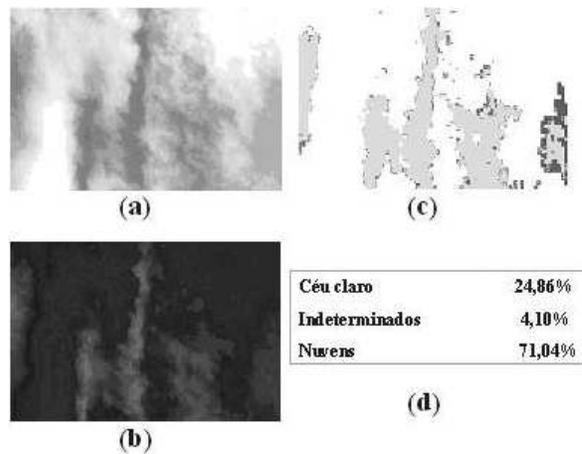


Figura 7 - Exemplo da classificação de imagens. (a) imagem em RGB coletada pela câmera PIXERA. (b) mapa de saturação da imagem original. (c) mapa de cores falsas. (d) percentual de pixels em cada classificação da condição de céu (claro, encoberto e indeterminado).

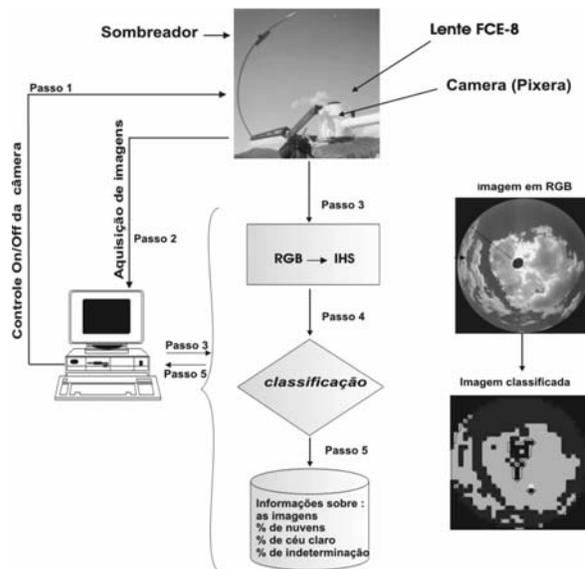


Figura 8 - Fluxograma de operação do sistema mapeamento automático da fração de cobertura de nuvens.

A Fig. 9 apresenta uma imagem fornecida pelo sistema proposto por Souza Echer [8] para determinação da fração de cobertura de nuvens em superfície, o sistema encontra-se em operação em Florianópolis-SC (27°28' S, 48°29' W, 15 m). A aquisição automática dos dados teve seu início no segundo semestre de 2002, com

<sup>5</sup>A radiação direta medida, é obtida numa superfície normal ao feixe solar e deve ser corrigida pelo co-seno do ângulo solar zenital para determinar-se a radiação direta sobre uma superfície horizontal. Desta forma radiação global = (radiação difusa + radiação direta horizontal).

imagem coletadas a cada 15 minutos. O início da rotina diária de aquisição é às 08:45 UTC e sua finalização às 20:45 UTC. Cada imagem coletada e armazenada no formato *Joint Photographic Expert Group* (JPEG). Em paralelo a aquisição de imagens, dados de radiação solar são coletados com padrão estabelecido para *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) da OMM. A estação solarimétrica é administrada pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC). Os dados de radiação solar são utilizados como parâmetros de avaliação para as informações geradas pelo sistema de aquisição de imagens.

Os primeiros resultados produzidos pelo protótipo mostraram que o outono de 2002 apresentou maior quantidade de dias claros. O inverno/2002 apresentou uma maior variação na nebulosidade que o outono, entretanto, não apresenta ocorrência de baixa nebulosidade (fração de cobertura de nuvens da ordem de 5%). A primavera de 2002 foi marcada pela presença de nuvens de modo mais acentuado, com fração de cobertura de nuvens apresentando maior variabilidade do que as demais estações do ano. Os verões de 2002 e 2003 apresentaram 45% dos dias com uma fração de cobertura de nuvens em torno de 25%.

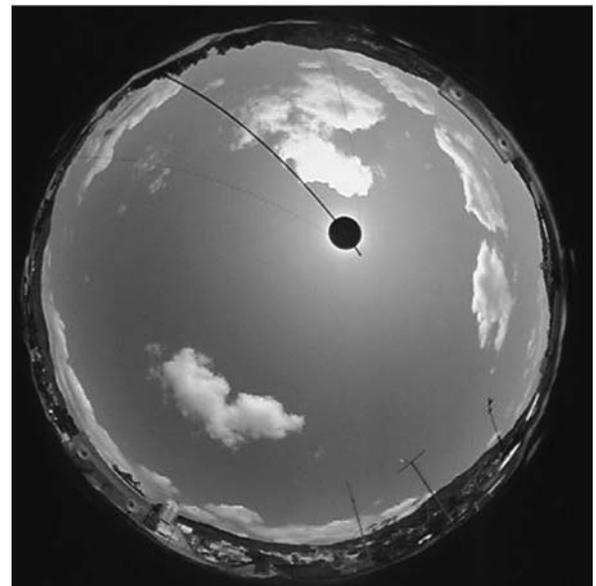


Figura 9 - Imagem do dia 08/01/2002 às 16:10h (hora local) coletada com sistema de captura de imagem desenvolvido na Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA/CPTEC/INPE).

A Fig. 10 mostra o efeito da fração de cobertura de nuvens sobre a radiação solar medida em superfície, apresentando dois gráficos para os dias 4, 5 e 6 de outubro de 2002. O primeiro gráfico mostra as curvas da

radiação solar global, difusa e direta horizontal<sup>5</sup>. O segundo gráfico apresenta a fração de cobertura de nuvens para os mesmos dias. É possível visualizar três cenários típicos de condições de céu: céu claro, céu totalmente encoberto e céu parcialmente encoberto. O dia 4 de outubro é um dia típico de céu claro. O dia 5 de outubro representa um cenário com o céu totalmente encoberto por nuvens. O dia 6 de outubro representa um cenário de céu parcialmente encoberto. Neste último caso a evolução da radiação solar pode ser acompanhada para o período do dia em que o céu esteve encoberto e para a segunda metade do dia em que a nebulosidade cede espaço ao céu claro. A feição da diminuição da nebulosidade dando lugar a céu claro fica bastante evidente no exemplo para fração de nuvens do dia 6 de outubro de 2002.

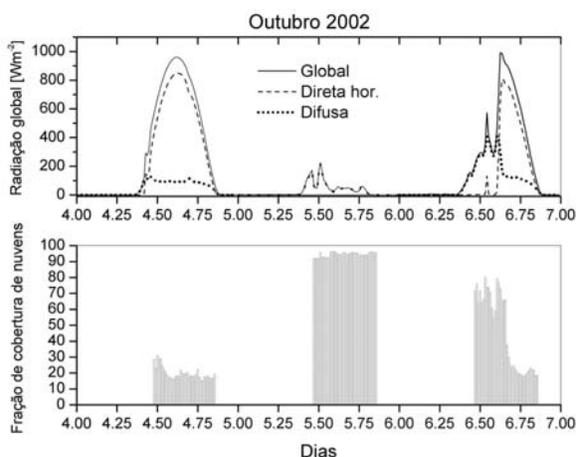


Figura 10 - Gráfico superior apresenta a radiação global, difusa e direta para os dias 4, 5 e 6 de Outubro de 2002. Gráfico inferior apresenta fração da cobertura de nuvens para o mesmo período observado com o imageador desenvolvido na DMA/CPTEC/INPE.

## 9. Considerações finais

Sabe-se que a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra dependerá: dos efeitos astronômicos; da quantidade de radiação emitida pelo Sol que é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia, bem como da variabilidade natural da transmitância atmosférica. A transmitância atmosférica da radiação solar é um processo físico de complexa descrição, devido ao grande número de propriedades físicas que compõem nossa atmosfera e a influenciam. Dentre os constituintes atmosféricos as nuvens são os agentes que apresentam maior variabilidade no tempo e maior impacto sobre a energia radiante do Sol. Elas interagem com a radiação solar tanto na faixa espectral do visível, quanto no infravermelho, por isso desempenham um papel de grande importância dentro do balanço radiativo do planeta. A relevância das investigações sobre as

nuvens e o papel que elas desempenham no clima e conseqüentemente na vida que se desenvolve na Terra tem motivado muitos estudos na tentativa de conhecer melhor esse agente tão eficiente no mecanismo de extinção da radiação solar. Importantes questões ainda estão sendo investigadas como, por exemplo, a variabilidade da nebulosidade ao longo do ano, quais as implicações dessa variabilidade para o clima do planeta, ou ainda a influência que as nuvens nas relações existentes entre Sol-Terra-Clima que hoje vivenciamos. Pesquisadores de vários países têm investido em pesquisa e aplicação do conhecimento científico no desenvolvimento de uma instrumentação que seja capaz de monitorar a cobertura de nuvens a partir da superfície com o intuito de gerar uma base de dados atualmente imprescindível aos diversos setores sociais.

O Brasil também tem apresentado sua contribuição por meio do desenvolvimento do Sistema de Mapeamento Automático da Fração de Cobertura de Nuvens [46]. Espera-se que este seja o primeiro passo em direção a soluções viáveis para o trabalho de aquisição de imagens do céu em superfície que apresente simplicidade de operação e baixo custo. O sistema mencionado foi fomentado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do Edital Universal ano - 2002 e da concessão de uma bolsa de doutorado.

Observando nosso presente, vislumbramos o futuro com muitas alternativas para a questão do conhecimento sobre as nuvens e sobre as ciências de um modo geral no Brasil. Possuímos todos os quesitos para o desenvolvimento científico e tecnológico, temos a matéria prima para tal realização - recursos humanos altamente qualificados. O que precisamos como país, é perceber que investir em ciência e tecnologia é um projeto viável técnica e economicamente para uma nação.

## Referências

- [1] J.O. Ayoade, *Introdução à Climatologia para os Trópicos* (Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2003), 332 p.
- [2] W.B. Rossow, C.L. Brest and L.C. Journal of Climate **2**, 214 (1989).
- [3] W.B. Rossow, L.C. Garder and A.L. Lacis, Journal of Climate **2**, 419 (1989).
- [4] D.L. Hartmann, in P.V. Hobbs (ed) *Aerosol-Cloud-Climate Interactions* (Academic Press, San Diego, 1993), cap. 6, p. 151-173.
- [5] J.J. Simpson and J.I. Gobat, Remote Sensing Environment **52**, 36 (1995).
- [6] M.D. King, in P.V. Hobbs, (ed) *Aerosol-Cloud-Climate Interactions* (Academic Press, San Diego, 1993), cap. 5, p. 123-149.
- [7] E.B. Pereira e S. Colle, Ciência Hoje **22**:130, 24 (1997).
- [8] M.P. Souza Echer, *Desenvolvimento de um Sistema de Mapeamento Automático de Fração de Cobertura de*

- Nuvens*. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004
- [9] H. Svensmark and E. Friis-Christensen, *Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **59**, 1225 (1997).
- [10] N. Marsh and H. Svensmark, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 5004 (2000).
- [11] N. Marsh and H. Svensmark, *Journal Geophys. Res.* **18**:D6, 4195, doi:10.1029/2001JD001264 (2003).
- [12] N. Marsh and H. Svensmark, *Journal Geophys. Res.* **109**:D14205, doi:10.1029/2003JD004063 (2004).
- [13] D.V. Hoyt and K.H. Schatten, *The Role of the Sun in Climate Change* (Oxford University Press, New York, 1997).
- [14] V.W.J.H. Kirchhoff and N. Nasser, in *Seminário de Interações Geomédicas*, Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1996.
- [15] V.W.J.H. Kirchhoff, C.A.R. Casiccia, and F. Zamorano, *Journal of Geophysical Research* **102**:D7, 8945 (1997).
- [16] A.A. Silva, *A Espessura Óptica de Aerossóis na Banda do UV-B*. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.
- [17] M.G.V. Amaral, *Iluminação Natural: Revisão da Legislação Construtiva de Florianópolis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [18] F.R. Martins, E.B. Pereira e K. Longo, in *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, 2004.
- [19] R.L. Vianello e A.R. Alves, *Meteorologia Básica e Aplicações* (Imprensa Universitária, Belo Horizonte, 1991), 449 p.
- [20] M.L. Salby, *Fundamentals of Atmospheric Physics* (Academic Press, New York, 1995), 624 p.
- [21] G. Brasseur and S. Solomon, *Aeronomy of the Middle Atmosphere* (D. Reidel Publishing, Dordrecht, 1986). 452 p.
- [22] A. Arking, *World Climate Programme Research* **399**, 1 (1990).
- [23] M. Rieland and R. Stuhlmann, *Journal of Applied Meteorology* **32**, 825 (1993).
- [24] E.F. Harrison, P. Minnis, B.R. Barkstrom and G.G. Gibson, in *Atlas of Satellite Observations Related to Global Change* (Cambridge University Press, San Diego, 1993), cap. 2, p. 19-38.
- [25] G.L. Stephens, *Journal of Atmospheric Science* **35**, 2111 (1978).
- [26] G.L. Stephens, *Journal of Atmospheric Science* **35**, 2123 (1978).
- [27] R.T. Pinker and I. Laszlo, *Journal of Applied Meteorology* **31**, 194 (1992).
- [28] L.W. Carrier, G.A. Cato and K.J. Von Essen, *Applied Optics* **6**, 1209 (1967).
- [29] J.H. McCartney, *Optics of the Atmosphere - Scattering by Molecules and Particles* (John Wiley and Sons, New York, 1975).
- [30] W.J. Wiscombe, *Applied Optics* **19**, 1505 (1980).
- [31] INMET, *Normais Climatológicas*, 2005, [http://www.inmet.gov.br/climatologia/combo\\_climatologia\\_C.html](http://www.inmet.gov.br/climatologia/combo_climatologia_C.html)
- [32] F.R. Martins, E.B. Pereira, S.L. Abreu and S. Colle, in *Proceedings of ISES Solar World Congress 2005 - Bringing Water To The World*, Orlando, 2005.
- [33] F.R. Martins, E.B. Pereira e M.P. Souza Echer, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **26**, 145 (2004).
- [34] S.G. Warren, C.J. Hahn, J. London, R.M. Chervin and R. Jenne, DOE/ER/60085-H1, NCAR/TN-273+STR, NCAR Technical Notes, 1986.
- [35] T.A. Blair, *Meteorologia* (Centro de Publicações Técnico de Aliança, Rio de Janeiro, 1964), 374 p.
- [36] M.P. Souza Echer, E.B. Pereira, L.S. Bins and M.A.R. Andrade, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **23**, 437, (2006).
- [37] F.R. Martins, *Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR*. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001
- [38] J.C. Ceballos, M.J. Bottino and J.M. Souza, *Journal of Geophysical Research* **109**, D2, D02211, doi:10.1029/2003JD003531 (2004).
- [39] B.A. Wielicki and L. Parker, *Cloud Properties Observed Using Landsat Satellite Data. IRS 88 Current Problems* (Editora Elsevier, Londres, 1988), p. 161-165.
- [40] F.R. Martins, E.B. Pereira and M.P. Souza Echer, *Advances in Space Research* **32**, 2275 (2003).
- [41] J.M. Santos, *Contribuição aos Estudos de Albedo*. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1957.
- [42] R.L. Holle and S. Mackay, *Journal of Applied Meteorology* **14**, 1437 (1975).
- [43] J.E. Shields, M.E. Karr, T.P. Tooman, D.H. Soble and T.S. Moore, *The Whole Sky Image - A Year of Progress*, [http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf\\_9803/shields-98.pdf](http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_9803/shields-98.pdf), 1998.
- [44] U. Feister, J. Shields, M. Karr, R. Johnson, K. Dehne and M. Woldt, in *Proceedings Climate Monitoring - Satellite Application Facility Training Workshop*, 2000, <http://www.mpl.ucsd.edu/people/jshields/publications/publications.htm>
- [45] M.P. Souza, *Desenvolvimento de uma Nova Metodologia para Determinação de Cobertura Efetiva de Nuvens*. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- [46] M.P. Souza Echer, E.B. Pereira, S.L. Mantelli Neto, T. Pereira, R.V.G. Souza e S. Colle, *Revista de Física Aplicada e Instrumentação* **18**, 10 (2005).
- [47] M.P. Souza, E.B. Pereira, M.A.R. Andrade e S.L. Mantelli Neto, in *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2002, Foz do Iguaçu, Sociedade Brasileira de Meteorologia.