

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA  
COMPUTAÇÃO**

**Sylvio Luiz Mantelli Neto**

**Desenvolvimento de metodologia para a estimativa da  
cobertura de nuvens usando uma de câmera de  
superfície e comparando com as imagens de satélite.**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos  
requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação

Aldo Von Walgenhein  
Enio Bueno Pereira

Florianópolis, Dezembro de 2001.

**Desenvolvimento de metodologia para a estimativa da  
cobertura de nuvens usando uma de câmera de superfície e  
comparando com as imagens de satélite.**

Sylvio Luiz Mantelli Neto

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação Área de Concentração Sistemas de Conhecimento e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.



---

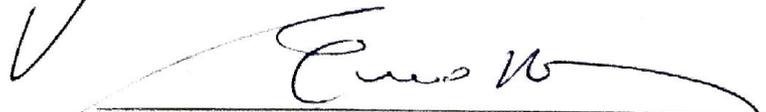
Prof. Fernando A. O. Gauthier  
Coordenador do Curso.

Banca Examinadora.



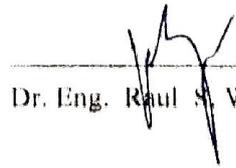
---

Dr. Reg. Nat. Aldo Von Walgenhein.  
Orientador



---

Ph.D. Enio Bueno Pereira.



---

Dr. Eng. Raul S. Waslawick .

Com a sua voz troveja Deus maravilhosamente;

faz grandes cousas que nós não compreendemos.

Porque ele diz à neve: Cai sobre a Terra,

e à chuva e ao aguaceiro: Sede fortes.

Assim torna ele inativas as mãos de todos os homens,

para que reconheçam as obras dele.

Jó 37:5-7

É tudo o que fizerdes, seja em palavra, seja em ação, fazei-o em nome do Senhor Jesus, dando por ele graças a Deus Pai.

Cl. 3:17

À minha esposa Marcia amor da minha vida, ponto de apoio, equilíbrio e motivação em todas as horas.

Aos meus filhos Pedro e Fabio pela paciência e compreensão da minha ausência em alguns momentos de suas vidas.

Aos meus pais Sylvio e Maria pela vida, amor, carinho, pelos primeiros passos e o encaminhamento de meu futuro, ensinando-me responsabilidade e integridade.

As minhas irmãs Rita, Sylvania e Cecília, que durante a minha infância e adolescência me mostraram o caminho do carinho, respeito e convívio do ambiente familiar.

## **Agradecimento**

Ao Prof. Aldo von Walgenhein pela orientação segura e paciente do encaminhamento da presente dissertação.

Ao Pesquisador Dr. Enio Bueno Pereira do INPE, pela sugestão do tema e a orientação na parte física da dissertação.

Ao Prof. Raul pelas contribuições para a melhoria da qualidade da dissertação.

Ao Prof. Sergio Colle pela utilização dos equipamentos e infra-estrutura do LABSOLAR/NCTS – EMC – UFSC.

Ao INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio e suporte financeiro durante a execução da presente dissertação.

Ao Departamento de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, por ter cedido os dados de observação sinóptica das nuvens e ter esclarecido diversas dúvidas por intermédio do Sr. Rosângelo.

Ao pessoal do LISHA (Laboratório de Integração de Software e Hardware) do Departamento de Informática e Estatística UFSC, especialmente ao Herculano De Biasi, Paulo Delani, Caju, Euclides, Charles e tantos outros pela ajuda com o SMALLTALK.

A todos os amigos que infelizmente eu possa ter esquecido de mencionar e contribuíram direta ou indiretamente com o meu trabalho.

## Sumário

Lista de Figuras .....	ix.
Lista de Tabelas .....	xi.
Resumo .....	xii.
Abstract .....	xiii.
<b>1 Introdução .....</b>	<b>1.</b>
1.1 Modulação da Energia Solar devido a fenômenos Astronômicos .....	2.
1.2 Modulação da Energia Solar devido a fenômenos Atmosféricos .....	3.
<b>2 Objetivos .....</b>	<b>4.</b>
2.1 Objetivos Gerais .....	4.
2.1 Objetivos Específicos .....	5.
<b>3 Requisitos .....</b>	<b>6.</b>
<b>4 Revisão da Literatura .....</b>	<b>9.</b>
<b>5 Materiais e Métodos .....</b>	<b>16.</b>
5.1 Câmera Digital e fotos .....	17.
5.2 Dados radiométricos de Superfície .....	18.
5.3 Modelo Atmosférico .....	19.
5.3.1 Irradiação Solar no Topo da Atmosfera .....	20.
5.3.2 Irradiação Solar na Presença da Atmosfera sem Nuvens .....	21.

5.3.2.1 Espalhamento da Energia Solar Devido às Moléculas de Ar Seco (Rayleigh scattering) -----	26.
5.3.2.2 Absorção da Energia Solar Devido às Moléculas de Ozônio -----	27.
5.3.2.3 Absorção da Energia Solar Devido a Mistura de Gases Combinados --	27.
5.3.2.4 Absorção da Energia Solar Devido ao Vapor de Água -----	28.
5.3.2.5 Fórmula de Turbidez de Angstron para os Aerossóis -----	29.
5.3.2.5 Albedo Terrestre e Albedo devido às Múltiplas Reflexões -----	30.
5.3.3 Cálculo da Irradiação Direta na Superfície -----	32.
5.3.4 A Irradiação Difusa na Superfície -----	32.
5.3.4.1 Componente da Radiação Difusa Devido ao Espalhamento Rayleigh -	33.
5.3.4.2 Componente da Radiação Difusa Devido a presença dos Aerossóis ---	33.
5.3.4.3 Componente da Radiação Difusa Devido a Múltipla Reflexão na Atmosfera -----	34.
5.3.4.4 Cálculo da Radiação Difusa Total na Superfície -----	34.
5.3.5 Cálculo da Irradiação Global na Superfície -----	34.
5.3.6 Irradiação Solar na Presença da Atmosfera com Nuvens -----	35.
5.4 Observação Sinótica dos Meteorologistas a Partir da Superfície -----	36.
5.5 Imagens de Satélite -----	38.
5.6 Implementação da Rede Neural -----	39.
5.7 Intercomparação com os Dados de Satélite -----	40.
5.8 Filtro de Difusão Anisotrópica -----	41.

6 Implementação -----	43.
6.1 Metodologia Utilizada e Aplicativos -----	44.
6.2 Implementação do Modelo Atmosférico -----	47.
6.3 Estimativa da Cobertura de Nuvens a Partir da Superfície -----	48.
6.4 Implementação da Rede Neural -----	49.
6.5 Conjunto de Análise -----	52.
7 Resultados -----	53.
8 Análise dos Resultados -----	58.
9 Sugestões Para Trabalhos Futuros -----	63.
10 Conclusão -----	64.
11 Glossário -----	67.
12 Referências Bibliográficas -----	69.
Anexo A1.Tabelas de Todos os Dados Diários Coletados das Nuvens -----	73.
Anexo A2.Tabelas de Dados das Nuvens Agrupadas por Similaridade de tipos distintos de nuvens observadas -----	101.
Anexo A3.Tabelas de Dados das Nuvens Agrupadas por Similaridade na Mesma faixa de Altitude -----	105.
Anexo B.Relação das Imagens de Satélite Utilizadas -----	106.
Anexo C.Modelo Atmosférico Utilizando o Programa MAPLE V -----	109.
Anexo D.Tabela dos Dados de Treinamento Levantados para a Normalização -----	117.

Anexo E. Tabela descrevendo os Dados Obtidos para o Conjunto de Análise -----	119.
Anexo F. Tabela descrevendo os Resultados Gerais -----	120.
Anexo G. Difusão Anisotrópica -----	121.
Errata -----	124.

## Lista de Figuras

Figura 1. Balanço da radiação Solar na Terra -----	10.
Figura 2. Foto ilustrando a estação BSRN do LABSOLAR -----	19.
Figura 3. Variação da energia solar no topo da atmosfera ao longo do ano.-----	21.
Figura 4. Relação entre a radiação direta normal e horizontal.-----	22.
Figura 5. Esfera celeste e as coordenadas do Sol relativas a um observador na Terra -	23.
Figura 6. Foto ilustrando alguns dos fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera.-----	24.
Figura 7. Distribuição da radiação solar direta, difusa e absorvida -----	25.
Figura 8. O processo de múltipla reflexão solar entre a atmosfera e a superfície -----	31.
Figura 9. O espectro de radiação solar antes e depois de atravessar a atmosfera, devido somente à mistura e gases, nas condições indicadas -----	32.
Figura 10. Representação esquemática de vários gêneros de nuvens -----	37.
Figura 11. Evolução do realce de uma borda genérica depois do tratamento de imagem com o filtro de difusão anisotrópica -----	41.
Figura 12. Resultado típico de uma análise de difusão anisotrópica -----	42.
Figura 13. Diagrama em blocos da metodologia empregada para a solução do problema -----	44.
Figura 14. Interface gráfica do protótipo implementado -----	45.
Figura 15. Gráfico ilustrando o erro e o menu de treinamento durante o treinamento da rede neural -----	50.

Figura 16. Presença do gradiente causado pela brilhância devido a turbidez atmosférica próxima ao disco solar -----	59.
Figura 17. Resultado típico de uma análise de difusão anisotrópica -----	42.
Figura B1. Imagem do canal visível do satélite GOES-8, mostrando de dados disponíveis somente abaixo da linha do equador -----	107.
Figura B2. Imagem do canal visível do satélite GOES-8, recebida pelo convênio celebrado entre o INPE e a UFSC -----	108.
Figura G1. Ilustração da Aplicação do filtro de difusão anisotrópica em uma imagem --- -----	123.

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1. Razão do espalhamento adiante em relação ao total da energia espalhada</b>	<b>--30.</b>
<b>Tabela 2. Ilustração dos códigos numéricos utilizados na classificação das nuvens adotada pelos observadores das estações meteorológicas</b>	<b>-----37.</b>
<b>Tabela 3. Implementações incorporadas ao aplicativo desenvolvido</b>	<b>-----45.</b>
<b>Tabela 4. Resultado do cálculo do índice de cobertura para as observações sinópticas feitas pelos meteorologistas somente para o conjunto de análise</b>	<b>-----40.</b>
<b>Tabela 5. Imagens do conjunto de treinamento utilizado</b>	<b>-----51.</b>
<b>Tabela 6. Resultados obtidos a partir da técnica desenvolvida</b>	<b>-----53.</b>
<b>Tabela 7. Razão do espalhamento à frente em relação ao total da energia espalhada</b>	<b>--30.</b>
<b>Tabela B1. Descrição das imagens do satélite GOES-8, com o valor dos pixels para a latitude -27.62 e longitude -48,525 de Florianópolis para o mês de março de 2000</b>	<b>-107.</b>
<b>Tabela B2. . Descrição da imagens do satélite GOES-8, com o valor dos pixels para a latitude -27.62 e longitude -48,525 de Florianópolis para o mês de fevereiro de 2000</b>	<b>-----108.</b>

## Resumo

O presente trabalho visa apresentar um método para aumentar a precisão da estimativa da cobertura de nuvens realizada a partir da superfície e compara-lo com imagens de satélite. Para a implementação do método serão utilizados: uma câmera digital de baixo custo a partir da superfície, algoritmos de processamento de imagens, um modelo físico atmosférico para o cálculo da radiação solar na superfície, dados de irradiação solar oriundos de uma estação de referência de medida de energia solar do LABSOLAR – EMC – UFSC (Laboratório de Energia Solar – Departamento de Energia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina), dados sinópticos fornecidos pelo Departamento de Proteção ao Voo do Ministério da Aeronáutica e imagens do satélite GOES-8. A metodologia proposta conclui que a interpretação da estimativa da cobertura de nuvens não pode ser binária, atribuindo a um pixel de uma imagem a correspondente representatividade de uma nuvem ou não, mesmo com uma escala de valores intermediários de transparência. Tal classificação pode induzir a erros de interpretação, por que existem no céu uma série de manifestações físicas como espalhamento e a turbidez atmosférica que, apesar de representar céu claro, podem confundir um sistema de interpretação automatizado devido a proximidade de valores de intensidade com uma nuvem de pequena profundidade óptica (como cirrus e as bordas de outros tipos de nuvens), superdimensionando o valor da cobertura de nuvens final. Esta constatação foi possível somente depois de utilizar a difusão anisotrópica nas imagens das nuvens.

## Abstract

The current work intend to present a methodology to increase the precision of determination of cloud coverage, and compare it with satellite images. To achieve that, it was used pictures from a low cost ground camera, data processing programs, a physical atmospheric model, data from a reference monitoring irradiation station LABSOLAR-UFSC (Solar Energy Laboratory - Federal University of Santa Catarina), synoptic cloud observation data from Department of Fligth Security from the Brazilian Ministry of Air Force at Hercílio Luz Airport in Florianopolis and GOES-8 satellite images. The proposed methodology concludes that cloud coverage estimation could not be binary result, assigning to a pixel a value that means its value represents a cloud or not, or values in between. That interpretation could lead to misinterpretation, because there are atmospheric phenomena like scatering and turbidity that can mislead an automatic system resulting in the same values as clouds with low optical depthness (like cyrrus and other cloud type borders), overestimating the total cloud coverage value. That conclusion was done after using anysotropic diffusion algorithms on cloud images.

# 1 Introdução

O Sol é aparentemente uma fonte de energia inesgotável que envia uma energia média diária ao topo da atmosfera da Terra da ordem de  $1367 \text{ W/m}^2$ <sup>1</sup>. 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 no caminho desde o topo da atmosfera até a superfície. Em ambos os casos, ocorrem a modulação da energia solar em primeira ordem (grande influência na modulação da energia solar) e segunda ordem (pequena influência na modulação da energia solar). A seguir será abordada uma descrição sumária de cada fenômeno.

## 1.1 Modulação da energia solar devido a fenômenos astronômicos

A modulação devido a fenômenos astronômicos em segunda ordem da energia solar é devida ao Sol não ser uma fonte de energia uniforme, possuir movimento de rotação, manchas com dimensão variável e explosões localizadas. Uma constatação acerca destes fenômenos pode ser observada ao vivo pela internet através da página da internet do SOHO (Solar Heliospheric Observatory) <http://sohowww.nasa.org/>. Os fenômenos de modulação da energia solar em segunda ordem possuem periodicidade variável de acordo com a sua natureza e podem apresentar variabilidade desde mensal até na ordem de alguns anos (ciclo solar). Os aspectos da modulação em segunda ordem não serão considerados na presente dissertação por que são típicos da área de astrofísica, possuem pequena amplitude, necessitam de períodos de monitoração longos, sensores mais precisos e foge ao escopo do presente trabalho.

A modulação devido a fenômenos astronômicos em primeira ordem é resultante do interposicionamento entre o Sol e a Terra devido aos movimentos de rotação, translação

1- Este valor é chamado de constante solar. É correspondente à taxa de energia solar total em todos os comprimentos de onda que incidem em uma superfície unitária normalmente exposta aos raios solares a uma distância de uma unidade astronômica - AU. Iqbal (1983).

e precessão da Terra. Tais movimentos ocasionam variações diárias e sazonais na radiação que atinge a superfície ao longo do ano, que é o período de tempo que a Terra leva para completar uma órbita completa ao redor do Sol. Esta energia pode ser quantificada teoricamente, a partir das leis básicas da Física Newtoniana, para qualquer ponto situado no topo da atmosfera terrestre., bastando para isto apresentar os dados adicionais do dia, mês, horário desejado, latitude e longitude. A partir dessas estimativas, pode-se empregar modelos empíricos e semi-empíricos da atmosfera para se transferir essas estimativas de radiação para a superfície da Terra. Outros parâmetros de interesse que podem ser calculados facilmente são os seguintes: o ângulo de elevação solar, horário de sol nascente e poente, horas de insolação solar durante o dia e o posicionamento do Sol a cada minuto em relação as superfícies horizontais ou inclinadas. Para isto basta consultar uma grande variedade de literatura especializada, como por exemplo: Iqbal (1983), Vianello e Alves (1991), Duffie e Beckman (1980), etc. No presente trabalho será utilizada a referência Iqbal (1983), que é uma referência clássica e bem completa acerca dos fenômenos que atuam sobre a energia solar.

## **1.2 Modulação da energia solar devido a fenômenos atmosféricos**

Entre o topo da atmosfera e a superfície também existe a modulação em primeira ordem e segunda ordem da radiação solar. Esta modulação está intimamente ligada à variação das condições atmosféricas ligadas ao clima local ou a fatores antropogênicos. Apesar de existirem equações que permitam a determinação da radiação solar que chega ao topo da atmosfera com boa precisão, a grande variabilidade dos parâmetros atmosféricos causam também uma grande incerteza na determinação da quantidade da radiação solar que chega à superfície.

A modulação em segunda ordem da radiação solar devida a fenômenos atmosféricos tem origem na interação da radiação solar com a matéria que constituem as camadas atmosféricas até atingir o solo. Os principais agentes são os elementos constituintes do ar, as nuvens e os aerossóis, seja por espalhamento ou por absorção da radiação incidente. Além das causas naturais mencionadas anteriormente existem também os

fatores antropogênicos (como a queima da biomassa e dos combustíveis fósseis) que vêm degradando o meio ambiente, alterando progressivamente a composição química da atmosfera e acrescentando incertezas cada vez maiores à quantidade de radiação solar que atinge a superfície. Vale a pena salientar que a soma de todos os fenômenos atmosféricos individualmente de segunda ordem torna-se tão intenso que pode ser considerado no total como uma modulação de primeira ordem.

A modulação em primeira ordem da radiação solar devido a fenômenos atmosféricos é causada pelas nuvens. As nuvens apresentam grande diversidade quanto à forma, altitude e densidade. A interação da luz solar com as nuvens depende do tipo da nuvem, sua espessura e do número de camadas sobrepostas. As nuvens bloqueiam (espalham e absorvem) grande parte da radiação solar aquecendo a atmosfera, refletindo uma parte da radiação de volta ao espaço e retransmitindo outra parte bem menor à superfície. A presença das nuvens também causa um aumento de temperatura da atmosfera pela absorção e de parte da radiação vinda do Sol ou refletida pela superfície. O 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 de primeira ordem que utilizam a energia solar. Por isto um estudo mais aprofundado com a utilização de técnicas alternativas deste agente também está sendo proposto neste trabalho.

## 2 Objetivos

Os objetivos do presente trabalho estão divididos em gerais e específicos.

### 2.1 Objetivos Gerais

Desenvolver uma metodologia que pretende servir como uma fase intermediária para a implementação de um modelo computacional mais avançado e também tentar determinar o índice de cobertura de nuvens a partir da superfície, utilizando imagens de uma câmera digital de baixo custo, dados solarimétricos e meteorológicos e comparar os resultados obtidos com as imagens de satélite. Nos modelos desenvolvidos até o presente momento que determinam a radiação solar a partir de imagens de satélite e são validados por estações de superfície Colle (1998), existe uma incerteza muito grande devido à presença de nuvens, quanto a sua distribuição espacial. O problema é maior quando existem nuvens localizadas somente sobre o ponto de observação de superfície, quando a sombra de uma nuvem isolada encobre o sensor. Neste caso em especial o satélite apresenta uma distribuição de radiação maior que o da estação de observação. Outro ponto abordado é quando existem nuvens de espessura óptica fina (cirrus) que atenuam levemente a radiação solar, mas não podem ser facilmente detectadas pelo satélite. O presente trabalho apresenta técnicas computacionais para reduzir as incertezas relacionadas às nuvens e contribui com dados mais precisos para a utilização da energia solar e a determinação dos seus efeitos na vida do cidadão comum.

A presente tese não tem a pretensão de esgotar o assunto e sim acrescentar maior precisão nas pesquisas que vem sendo desenvolvidas.

A escolha do tema do presente trabalho e a metodologia empregada é a extensão de um conjunto de técnicas que vem sendo empregadas para o cálculo do índice de cobertura de nuvens para a determinação mais precisa da radiação solar que chega à superfície INMET (1998).

## **2.2 Objetivos específicos**

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer uma metodologia para a determinação da estimativa da cobertura de nuvens de uma determinada região geográfica e a sua inter-relação com os dados solarimétricos e meteorológicos. Adicionalmente, foi realizada a comparação dos resultados obtidos com os dados obtidos através do uso de imagens de satélite.

Durante o trabalho foram coletados dados meteorológicos, solarimétricos, de observação sinóptica, imagens de satélite e fotos a partir da superfície. Os dados foram utilizados de forma a tentar determinar uma relação com a cobertura efetiva das nuvens. Um protótipo computacional foi implementado para auxiliar o cumprimento dos objetivos propostos.

Avaliação dos resultados obtidos, sugestões e encaminhamento para trabalhos futuros ou aprofundamento da técnica para trabalhos futuros foram levantados para dar continuidade ao aperfeiçoamento da técnica.

### 3 Requisitos

Dentre os requisitos propostos no presente trabalho estão os seguintes:

- Montar um aparato experimental para acomodar a câmera que foi disponibilizada pelo INPE, para tomar as fotos em ambiente externo. Um dispositivo de proteção da câmera e outro de sombreamento foram adaptados à câmera.

- Estimar a transmitância da atmosfera, através de um modelo teórico, para verificar quais os efeitos da mesma sobre a radiação solar sobre a superfície. O modelo tem como objetivo efetuar um cálculo teórico da radiação solar incidente na superfície horizontal representada pela câmera na ocasião da foto a partir dos dados meteorológicos.

- Medir a radiação solar no instante da foto e correlacionar no aplicativo a ser desenvolvido as diferenças entre os valores calculados e os medidos da irradiação solar e utiliza-los como parâmetros de entrada na rede neural a ser implementada.

- Obter os dados oriundos das observações sinópticas da estação meteorológica do DPV (Departamento de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica do Aeroporto Hercílio Luz de Florianópolis), e também utiliza-los como parâmetro de entrada do aplicativo a ser desenvolvido. Os dados sinópticos são gerados pela observação sistemática dos meteorologistas da Aeronáutica, e fornecem dados acerca do tipo de nuvem e quais camadas estão presentes na ocasião da observação. A observação segue padrões estabelecidos pela WMO (World Meteorological Organization) nos horários sinópticos.

- Efetuar a segmentação das imagens, tentando identificar as regiões com nuvens distintas no céu.

- Tentar identificar o tipo de nuvem presente no céu e em qual camada justaposta ela se encontra no campo visível da câmera.

- Implementar um aplicativo com uma rede neural para identificar os padrões de nuvens existentes baseados nos dados de entrada e a partir de um conjunto de treinamento controlado para a rede neural.

- Efetuar a comparação do dados de superfície com as estimativas realizadas através de imagens de satélite obtidas a partir do convênio entre o LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar de Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina) e o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

- Analisar os resultados obtidos, e a confiabilidade do aplicativo desenvolvido.

Convém salientar que no presente trabalho, foi utilizada somente a faixa de luz visível do espectro, pois a determinação das nuvens a partir da superfície é feita utilizando uma câmera comum sensível somente ao espectro de luz visível. A análise multiespectral na superfície depende de sensores mais sofisticados e de custo proporcionalmente mais alto e foge ao escopo do presente trabalho. Além do mais são utilizados dados restritos ao espectro visível, como por exemplo, a visualização das nuvens e a sua classificação a partir de um meteorologista que torna a análise multiespectral (neste caso) sem sentido. A análise multiespectral, ou em uma região complementar do espectro, poderá ser abordada futuramente e fica como sugestão para a extensão do presente trabalho em um estudo mais amplo e abrangente. Porém como os instrumentos utilizados (radiômetro para radiação global e difusa e o pirheliômetro para a radiação direta) medem a radiação solar na totalidade de seu espectro um pequeno detalhe deverá ser observado. Os cálculos teóricos foram conduzidos de forma a considerar todo o espectro de radiação solar (broadband). Em seguida foi retirado, na devida proporção relativa, somente o espectro visível das medidas nos cálculos.

Conforme abordado anteriormente, o presente trabalho faz parte de um conjunto de técnicas para a determinação da energia solar que chega à superfície. É necessária a sua determinação da forma mais precisa possível para reduzir não somente as incertezas da quantidade de energia disponível envolvida, mas também reduzir as incertezas dos custos dos investimentos associados ao setor Colle (1999). Trabalhos preliminares já foram realizados no conjunto e técnicas do desenvolvimento do modelo computacional, utilizando a determinação da cobertura de nuvens a partir de imagens, utilizando limiarização simples Souza (1999). Pesquisas sobre nuvens e a determinação da sua influência no clima em geral vem sendo alvo de pesquisas há muitos anos. Porém existem certas limitações inerentes ao processo de observação das nuvens que precisam

ser superados ou contornados, conforme poderá ser observado mais adiante. O presente trabalho poderá servir e base para a correção de imagens de satélite, a partir de um ponto de observação validado na superfície, melhorando a precisão da determinação da estimativa da cobertura de nuvens em modelos de cálculo da radiação, que apresentam incertezas maiores na presença das nuvens.

## 4 Revisão da Literatura

Neste capítulo serão descritas as referências bibliográficas utilizadas para basear o desenvolvimento do presente trabalho. O modelo da atmosférico com os seus vários fatores, a determinação da cobertura de nuvens, e o efeito da mesma sobre a radiação solar vem sendo estudado ao longo de vários anos a partir de vários autores.

A referência mais clássica sobre a radiação solar e a sua interação com a atmosfera, é o trabalho desenvolvido por Iqbal (1983) em seu livro. Iqbal inicia o seu trabalho descrevendo as principais equações trigonométricas de interposicionamento entre o Sol, a Terra e os planos localizados sobre a superfície. Aborda aspectos térmicos da radiação emitida pelo Sol e a sua dependência angular. Descreve a constante Solar, sua distribuição espectral e a divisão em várias bandas de energia.

Em seguida Iqbal caracteriza a atmosfera sob o ponto de vista óptico descrevendo os principais elementos que interagem com a luz solar até a sua incidência na superfície. Ele descreve a atmosfera como um meio de propagação que possui propriedades variáveis de acordo com as condições atmosféricas. Em seu caminho até a superfície a radiação solar interage com a atmosfera através de fenômenos espalhamento e absorção gerando uma componente difusa da Radiação Solar.

E finalmente em sua análise, Iqbal fornece os principais parâmetros para o modelo atmosférico para o céu claro e na presença e nuvens; determinando o balanço de energia solar (global e difusa) incidente nas superfícies horizontais e inclinadas na superfície.

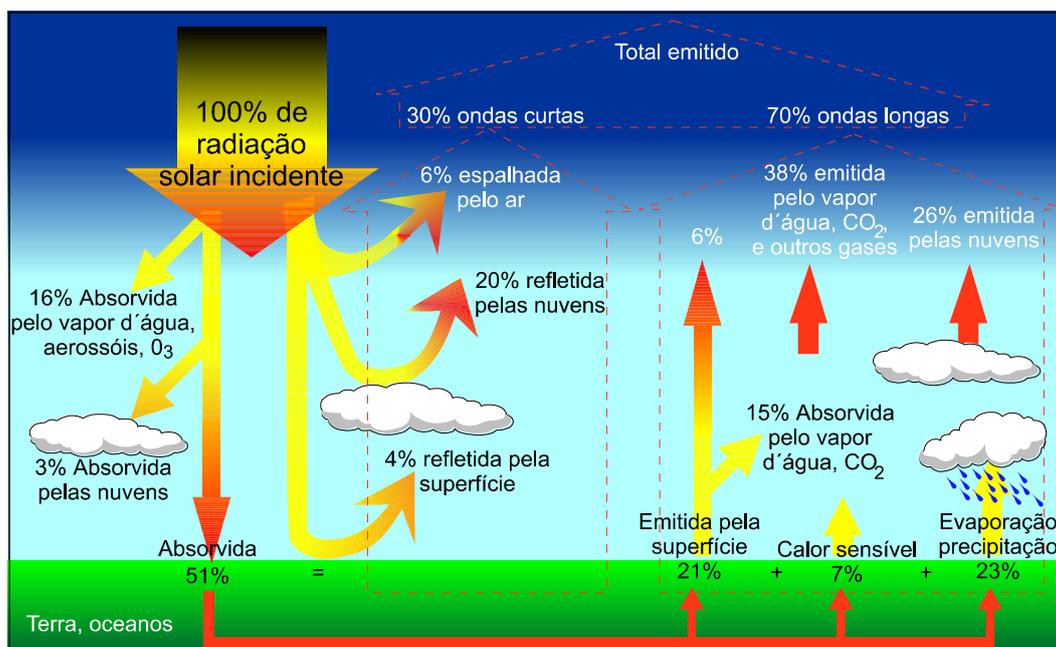
O livro de Iqbal apresenta uma metodologia que será utilizada no presente trabalho para o modelo atmosférico. Maiores detalhes acerca e como será este modelo poderá ser apreciado nos capítulos subseqüentes.

O modelo atmosférico e o balanço de radiação solar bem como os fatores que atuam na radiação solar, também são analisados por outros autores.

Harrisson et al. (1995) analisa a atmosfera, a Terra e a interação com o Sol sob o ponto de vista de balanço de energia. A energia da Terra em si deve ser considerada como uma constante ao longo do ano, em contrapartida a energia da atmosfera muda ao longo do ano para satisfazer as leis da termodinâmica. O aquecimento desigual pelo Sol

do sistema Terra-Atmosfera concomitantemente com a rotação do planeta causa gradientes de temperatura regionais que movimentam a circulação atmosférica e as correntes oceânicas. A Terra se mantém em equilíbrio térmico absorvendo parte da energia e emitindo a radiação Solar de volta ao espaço em diferentes comprimentos de onda. O balanço de energia é feito considerando que a radiação total que chega ao topo da Atmosfera é igual à absorvida (SW) menos a emitida pelo sistema Terra-Atmosfera (LW). Aproximadamente 30 % da energia radiante do Sol é refletida de volta ao espaço, 20 % é absorvida pela atmosfera e 50 % absorvida pela superfície da Terra, conforme pode ser observado na ilustração da fig. 1. A energia refletida de volta ao espaço é denominada de albedo. A maior fração do albedo é devida à reflexão da energia do Sol pelas nuvens que são altamente variáveis no tempo e no espaço. A fração do albedo que cabe à atmosfera é causada pelos gases que a compõem e pelo material particulado em suspensão e varia de acordo com a concentração relativa desses componentes e o ângulo zenital do Sol. E por fim a porção do albedo cabida à superfície apesar de pequena é significativa no impacto da absorção da energia Solar na superfície, cuja propriedade pode variar desde florestas, e oceanos até superfícies desérticas e congeladas.

Figura 1. Balanço da radiação solar na Terra. Adaptada do Atlas of Satellite Observations Related to Global Change (1995, p.20).



Harrison menciona que os componentes do balanço da radiação atmosférica são parâmetros de primeira ordem e devem ser calculados precisamente em qualquer modelo de análise climática. Harrison sugere que os modelos de balanço de energia não são suficientes por si próprios. Eles devem encontrar na observação de campo uma conexão necessária para a verificação dos modelos climáticos. A precisão dos modelos climáticos melhora à medida que se refina a resolução temporal e espacial do balanço de radiação. Esta preocupação no detalhamento é um objetivo fundamental na medida do balanço de energia utilizando imagens de satélite.

Harrison descreve o trabalho de monitoração desenvolvido no NOAA acerca do balanço de energia utilizando satélites. Harrison menciona que a atmosfera (e conseqüentemente as nuvens), também reflete de volta a energia re-emitada pela superfície contribuindo para o aumento de temperatura no solo no chamado efeito estufa. Entretanto Yamanouchi (1993) encontrou que a presença de nuvens resfria fortemente a atmosfera sobre a Antártica, e que existem ainda muitas incertezas acerca dos efeitos radiativos das nuvens especialmente na Antártica.

Harrison também menciona que estudos envolvendo o NOAA e satélites geostacionários revelaram que variações semi-regulares e distribuídas na cobertura de nuvens podem causar erros substanciais no levantamento do balanço de radiação derivado a partir de satélites. Analisando os resultados parciais do trabalho de monitoração do NOAA, Harrison menciona que as diferenças entre o sistema modelado e o medido foram resultantes da parametrização inadequada das nuvens e que a melhoria do modelo que ele utiliza aguarda por maiores avanços no entendimento básico do processo através de programas combinados de medida de nuvens e radiação Solar.

Yamanouchi (1993) aponta que existe uma ausência de confiança na climatologia das nuvens. Yamanouchi reporta que a radiação de onda longa é sensível à variação dos parâmetros meteorológicos. Em suas observações ele percebeu que a radiação de onda longa no sentido descendente (downward longwave) aumenta na ordem de  $80\text{W/m}^2$  para nuvens baixas e médias e  $40\text{W/m}^2$  para nuvens altas para a região Antártica. A razão entre o fluxo de onda longa ascendente e descendente pode ser relacionada à temperatura e a pressão de vapor da superfície. Os pirgeômetros são altamente sensíveis

as variações da temperatura ambiente e à incidência do Sol sobre o vidro do filtro de domo. Por isto as incertezas das medidas mudam quando o pirgeômetro é operado a uma temperatura mais alta nas estações de latitude mais alta.

Rossow também apresenta um trabalho bem extenso sobre o assunto desenvolvido durante o ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project). Rossow menciona na introdução de seu trabalho que a quantidade total a luz do Sol absorvida pela superfície da Terra e a quantidade de radiação que é re-emitida, é determinada em grande parte pelas propriedades das nuvens. Ele menciona os tipos mais comuns de satélites existentes e as várias regiões espectrais disponíveis para o uso nos satélites de observação. Em seu trabalho Rossow menciona o uso de imagens de dois tipos diferentes de satélites. Um que opera na faixa do visível e infravermelho e outro para remover os efeitos da temperatura, vapor de água e ozônio atmosféricos nas imagens. Outro parâmetro utilizado na análise das imagens foi a caracterização de cada localização da Terra de acordo com o tipo da superfície, i.e. altitude média e a sua variabilidade, tipo e cobertura dos oceanos pelo gelo e tipo de cobertura da terra de acordo com o tipo de vegetação etc. Rossow caracterizou as nuvens em três passos. O primeiro passo examina os espectros visível e infravermelho para saber se as nuvens estão presentes em cada pixel em questão, classificando-os como dois tipos de população nuvens ou claro. O segundo passo compara as medidas da radiação com os cálculos dos modelos de transferência e radiação das nuvens, atmosfera e da superfície. O terceiro passo sumariza as informações coletadas e medidas acerca das nuvens, da atmosfera, da superfície e sua variação temporal, e mapeia todas estas informações montando uma resolução espacial. Mensalmente são preparados sumários das variabilidades mensais. A detecção das nuvens envolve uma série de testes estatísticos da radiação que “indicam” a presença de nuvens ou não. Os pressupostos utilizados por Rossow no projeto ISCCP para a separação dos dados como nuvem ou claro foram os seguintes.

1. As nuvens causam uma variabilidade espacial maior na radiação na faixa IR (Infra Red) e VIS (Visible) do que a superfície do planeta.
2. As nuvens causam uma variabilidade temporal maior na radiação IR e VIS do que a superfície do planeta.

3. As nuvens são mais frias (menos IR irradiada para o espaço), e mais brilhantes (maior radiação Solar de ondas curtas emitida para o espaço) que a superfície.

Rossow menciona que das afirmações acima não são verdadeiras ao mesmo tempo em um local e as combinações válidas que indicam a presença das nuvens variam com a localização, hora do dia e estação do ano. Rossow menciona que, na prática, a determinação das nuvens é feita assumindo que geralmente a superfície é menos variável do que as nuvens (embora nem sempre isto aconteça), e que as nuvens são responsáveis pelas variações relativas nos espectros IR e VIS que não correspondem às condições de céu claro. Como as condições que indicam céu claro podem também variar de alguma forma, somente as mudanças na radiação maiores do que a variação de valores típicos de céu claro ou as incertezas relativas ao céu claro podem ser chamadas de nuvens. Rossow aponta que existem limitações nos métodos de detecção das nuvens no projeto ISCCP e que algumas são inerentes às observações de imagens via satélite e que deverão ser objeto de melhorias no futuro.

As observações via satélite são complementares às observações de superfície. A maioria das observações de satélite ou são completamente insensíveis às nuvens (microondas) ou são tão sensíveis que não se consegue penetrar na maioria delas. Para as faixas VIS e IR as camadas de nuvens que ocorrem entre outras camadas não podem ser observadas. Por outro lado, a partir da superfície, as camadas de nuvens superiores ficam encobertas por camadas de nuvens mais baixas. Portanto as observações das nuvens somente a partir de satélites ou somente a partir da superfície ficam limitadas na quantidade de informações que elas contem devido à distribuição vertical da quantidade de massa de água das nuvens. Além do mais o tamanho do pixel de uma imagem de satélite para alguns casos, pode ser maior ou menor que as nuvens individualmente. Ou seja, as nuvens podem ocorrer em uma distribuição de tamanhos que os satélites não podem resolver em pequenas escalas espaciais.

Outra limitação apontada por Rossow é a variação na visualização geométrica do satélite que possui uma resolução espacial limitada e causa uma determinação superestimada na quantidade de nuvens na ordem de 5 a 10 %. Parte deste efeito é causado pela variação na projeção do tamanho do pixel sobre a superfície causada pela sensibilidade a nuvens opticamente finas. Rossow prossegue neste trabalho descrevendo

a observação nas variações na distribuição das nuvens sobre a Terra, sob o ponto de vista geográfico, diário, sinóptico, de acordo com as estações do ano e interanual das nuvens em uma profundidade tal que apesar de interessante, vai além do foco da presente dissertação.

A estimativa da cobertura das nuvens a partir de um observador ao nível do solo apresenta certas restrições. A WMO, 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 meteorológicas sinópticas dos aeroportos etc. Todos os aeroportos de porte possuem um grupo de meteorologistas que efetuam observações sinópticas acerca das nuvens a cada meia hora durante 24 horas. O grupo de meteorologistas faz parte do Departamento de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica. 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 descreve 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 se desenvolver agrupadas e verticalmente. Holle tenta 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 menciona 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 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 produzem um efeito chamado pacote, que dá a impressão ao observador que parece uma quantidade de nuvens maior;
- a observação feita em ângulos próximos ao horizonte tendem a superestimar a quantidade de nuvens visualizadas;
- 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.

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. 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.

## 5 Materiais e métodos

A presente dissertação tem por objetivo desenvolver e testar uma nova metodologia para ser aplicada futuramente na estimativa da cobertura de nuvens de uma determinada região geográfica e a sua intercomparação com os dados solarimétricos e meteorológicos.

A utilização de equipamentos de baixo custo é indispensável para a implementação do método. Para a conclusão do trabalho, foram utilizados os seguintes recursos:

- Uma câmera digital de baixo custo, e as fotos tiradas nos horários sinópticos.
- Dados radiométricos oriundos de uma estação solarimétrica de referência pertencente ao programa BSRN-WRMC-WMO (Baseline Surface Radiation Network -World Radiation Monitoring Center -World Meteorological Organization).
- Um modelo atmosférico semi-empírico baseado no modelo paramétrico C proposto por Iqbal. No modelo será determinando a radiação no topo da atmosfera e radiação na superfície para o horário da foto para céu claro (sem nuvens). Os dados do modelo servem para normalizar os valores medidos.
- Dados meteorológicos oriundos da estação BSRN do LABSOLAR, e os de observação de nuvens obtidos junto ao Departamento de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica do Aeroporto Hercílio Luz.
- Imagens do satélite GOES-8 obtidos junto ao LABSOLAR que recebe imagens através de um convênio com o INPE.
- Redes neurais, algoritmos de suporte e de processamento de imagens.

Nas sub seções a seguir, será descrito com maiores detalhes como cada recurso descrito anteriormente contribuiu na viabilização do presente trabalho.

## 5.1 Câmera fotográfica digital e fotos

Foi utilizada uma câmera fotográfica digital marca PIXERA modelo PCS20232 com resolução 516(H) x 492(V) e campo de visada 36° que foi disponibilizada pelo INPE para a execução do experimento. A câmera foi apontada para a posição ZENITAL do ponto de observação do céu, apoiada em um tripé. As fotos foram coletadas através de um programa fornecido pelo fabricante da câmera. A câmera gera fotos coloridas no espectro visível, e possui ajustes de brilho, contraste saturação, etc. automáticos ou pré-estabelecidos também no programa do fabricante. A orientação da câmera foi feita de tal forma que a parte inferior da fotografia apontou sempre para a direção norte, de forma a manter a origem da fonte de luminosidade constante. A câmera foi colocada no mesmo nível que os radiômetros da estação solarimétrica do LABSOLAR no topo do edifício (bloco A) da Engenharia Mecânica de forma a minimizar as interferências das edificações, árvores ou montanhas ao redor.

As fotos foram tomadas nos horários sinópticos padrão (GMT Greenwich Mean Time), conforme estabelecido pela WMO para observações meteorológicas. Tais horários são adotados mundialmente pela comunidade de observação meteorológica ao redor do mundo. A coincidência com o horário sinóptico permitiu uma simultaneidade da imagem de satélite com a foto retirada na superfície. Além disso durante os horários sinópticos também são realizadas as observações sinópticas feitas pelos meteorologistas. O relógio do computador utilizado para a obtenção das fotos foi acertado nos mesmos valores que um aparelho GPS (Global Positioning System) a fim de reduzir diferenças no horário local e padrão do satélite para se obter as fotos.

Uma tabela com a relação das fotos retiradas para o presente trabalho está presente no anexo A (A1, A2 e A3).

## 5.2 Dados radiométricos de superfície

A luz solar é um dos principais pontos envolvidos no processo. Na presente seção serão definidos como os dados de radiação solar foram utilizados no presente trabalho. As fotografias de superfície e as imagens de satélite foram tomadas de forma instantânea. Por isto não faz muito sentido a utilização de valores médios horários históricos da energia solar que chega à superfície para o cálculo da luminosidade na presença de nuvens, conforme utilizado por Iqbal no modelo de radiação para o céu encoberto, e sim o seu valor instantâneo na ocasião em que a foto é retirada. O parâmetro utilizado é a irradiância solar, que significa a taxa de energia solar que chega a uma superfície por unidade de tempo e por unidade de área em  $\text{Wm}^{-2}$  (densidade de fluxo radiante ou simplesmente fluxo). Os dados utilizados são os medidos pelos sensores de radiação solar global, direta, difusa e onda longa. Os dados são amostrados a cada segundo, e durante um minuto são armazenados os valores médios, determinados os valores máximo e mínimo além do erro médio quadrático de cada um dos valores de radiação medidos no período de amostragem. Estes valores foram retirados do banco de dados do LABSOLAR. Uma foto ilustrando os sensores de radiação da estação BSRN pode ser apreciada na fig. 2.

Figura 2. Foto ilustrando a Estação solarimétrica BSRN do LABSOLAR.



Os dados solarimétricos e meteorológicos correspondentes às fotos retiradas estão presentes no anexo B.

### **5.3 Modelo atmosférico**

O modelo atmosférico descrito por Iqbal(1983) (modelo paramétrico C) utiliza em parte dados teóricos e de campo para modelar a atmosfera. Ele é determinado em duas partes. Uma calculando a radiação até o topo da atmosfera e outra do topo da atmosfera até o solo. A determinação de cada uma será abordada nas duas próximas sub seções.

### 5.3.1 Irradiação solar no topo da atmosfera

O valor da radiação solar que chega ao topo da atmosfera é conhecido como fator solar. Iqbal (1983) menciona que o fator solar foi estabelecido pela WMO e corresponde à taxa de energia solar de todos os comprimentos de onda incidentes em uma área unitária exposta normalmente aos raios do Sol a uma distância média entre o Sol e a Terra (1AU – Astronomical Unit). O fator solar varia na ordem de alguns décimos de porcentagem no período de alguns anos. O valor adotado no presente trabalho será o seguinte:

$$I_{sc}=1367 \text{ Wm}^{-2}.$$

A porção do espectro relativo à luz visível (0.390 a 0.770  $\mu\text{m}$ ) corresponde a 46.41% do fator solar.

Teoricamente o valor da irradiância solar extraterrestre em uma superfície normal à incidência solar é dado pela seguinte expressão:

$$I_{on} = I_{sc} \left( \frac{r_o}{r} \right)^2 = I_{sc} E_0 \quad \text{onde:} \quad (1)$$

$I_{on}$  = Irradiância extraterrestre em uma superfície normal aos raios do Sol.

$I_{sc}$  = Fator solar.

$r_o$  = Distância média entre o Sol e a Terra 1 AU unidade astronômica =  $1.496 \cdot 10^8$  km.

$r$  = Distância entre o Sol e a Terra no instante calculado.

$E_0$  = Fator de correção de excentricidade da órbita da Terra dado pela seguinte expressão:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221\cos \Gamma + 0,001280\sin \Gamma + 0,000719\cos 2\Gamma + 0,000077\sin 2\Gamma \quad \text{onde:} \quad (2)$$

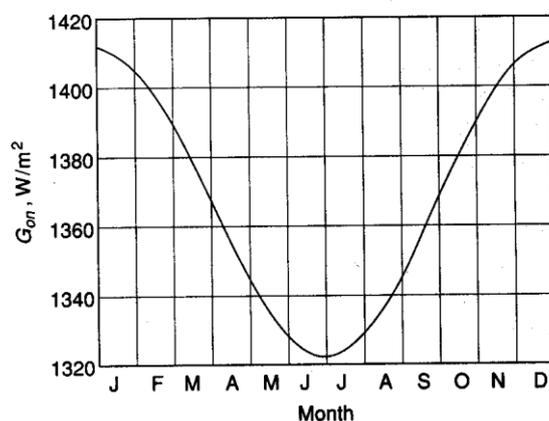
$\Gamma$  = dia angular expresso em radianos dado pela seguinte expressão:

$$\Gamma = 2\pi \frac{dn-1}{365} \quad \text{onde:} \quad (3)$$

$dn$  = dia juliano do ano variando de 1 em primeiro de janeiro a 365 em 31 de Dezembro.

Nota: Os cálculos acima são feitos considerando fevereiro com 28 dias. O erro decorrente desta aproximação é muito pequeno. A fig. 3 ilustra a variação da energia solar que chega ao topo da atmosfera ao longo do ano.

Figura 3. Variação da energia solar no topo da atmosfera ao longo do ano. Adaptada de Duffie e Beckman(1991) fig 1.4.1.



Conforme pode ser observado na fig. 4 a irradiância solar extraterrestre em uma superfície horizontal é diferente de uma superfície normal à incidência dos raios solares, e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$I_o = I_{on} \cos \theta_z, \text{ onde:} \quad (4)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

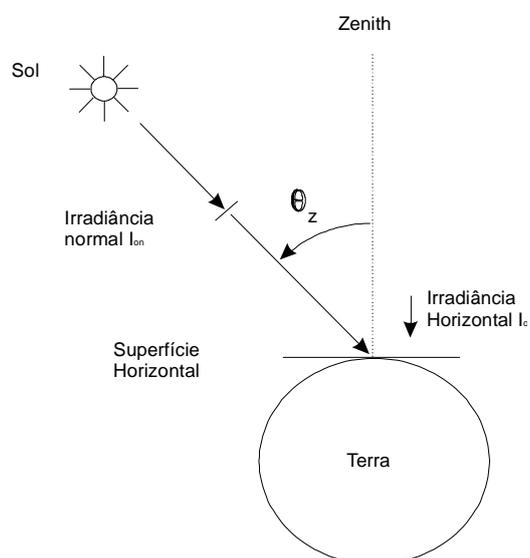
$\theta_z$  = ângulo zenital (ângulo entre a posição zenital e o sol)

$\delta$  = declinação

$\phi$  = latitude local da observação

$\omega$  = ângulo horário

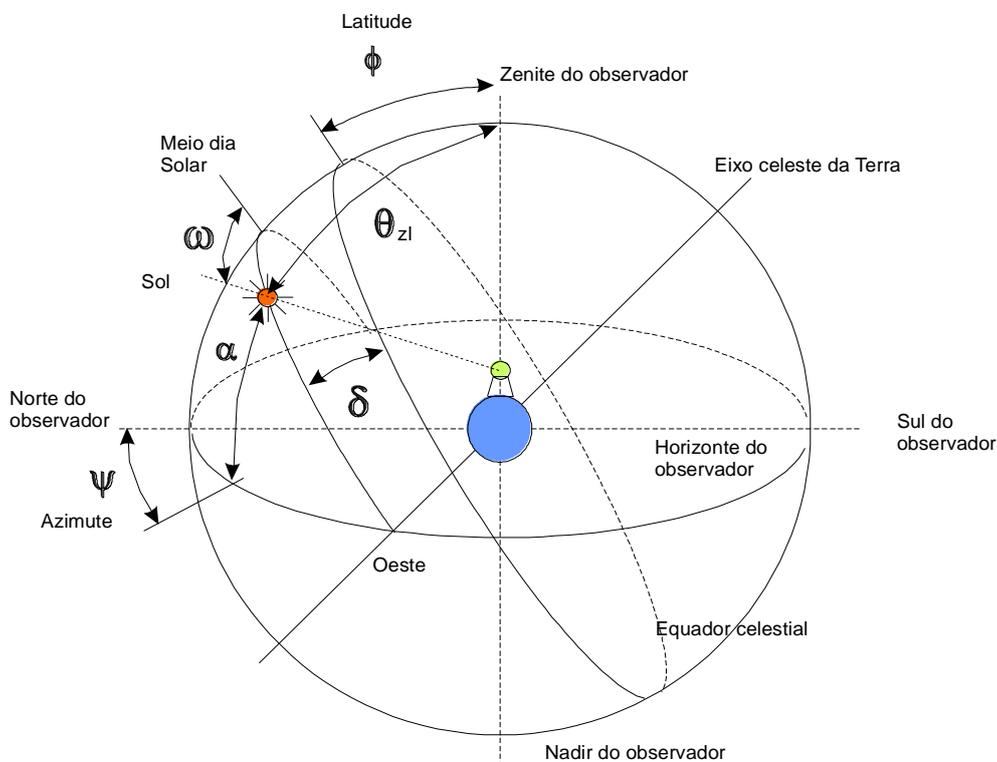
Figura 4. Relação entre a radiação direta normal e a horizontal. Adaptada de Iqbal (1983).



Todos os ângulos acima foram obtidos a partir da esfera terrestre conforme ilustrado na fig 5.

Figura 5 . Esfera celeste e as coordenadas do Sol relativas a um observador na Terra.

Adaptada de Iqbal (1983) para o hemisfério Sul.



Até agora foram descritos os métodos para o cálculo da irradiação solar extraterrestre. A irradiação solar que chega com a superfície interage com os diversos componentes existentes na atmosfera. Na atmosfera a radiação solar é atenuada com e sem a presença das nuvens. No próximo tópico será demonstrado como será feita a determinação da irradiação solar na superfície sem a presença das nuvens e no tópico seguinte com a presença das nuvens.

### 5.3.2 Irradiação solar na presença da atmosfera sem nuvens

A radiação solar sem a presença das nuvens, interage com a atmosfera através dos vários elementos que a constitui, atenuando a sua energia antes de chegar à superfície. Segundo Iqbal (1983) a atmosfera é composta basicamente de ar seco (gases), vapor de água, partículas em suspensão (aerossóis), poeira, gotas de água, cristais de gelo, etc.

que são altamente variáveis no tempo e no espaço. A luz solar interage com os elementos atmosféricos basicamente através dos fenômenos de absorção e espalhamento em um processo contínuo. Os fenômenos de absorção e espalhamento se comportam diferentemente entre os vários constituintes da atmosfera e são em função dos vários comprimentos de onda.

No presente trabalho será considerada a atenuação da energia por espalhamento do ar seco (Rayleigh) e dos aerossóis (Mie); e a absorção da mistura de gases, ozônio e vapor d'água por serem majoritários. Na fig. 6 a seguir pode ser observado o efeito do espalhamento da radiação solar na atmosfera. O Sol se encontra em um ângulo de elevação próximo ao poente, onde se observa com mais nitidez o espalhamento Mie.

Figura 6. Foto ilustrando alguns dos fenômenos de interação da radiação solar com a atmosfera. Espalhamentos Rayleigh, Mie e a turbidez atmosférica.

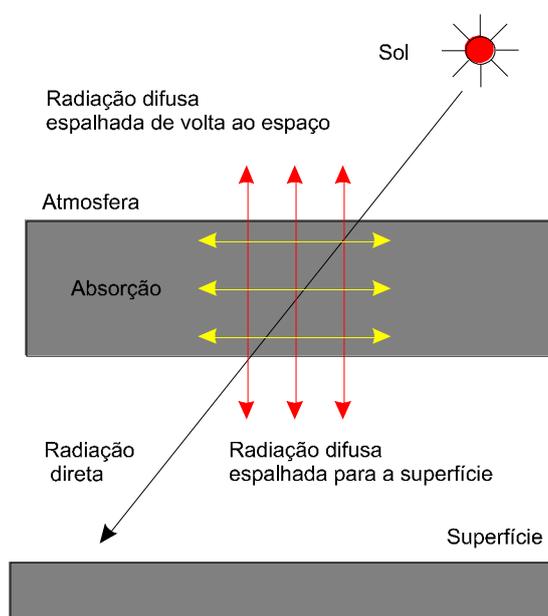


O espalhamento da luz solar ocorre ao longo de todos os comprimentos de onda, enquanto que a absorção ocorre em vários comprimentos de onda seletivamente de acordo com o elemento considerado. Ambas influenciam no espectro de radiação que chega à superfície através da modificação da energia que atravessa a atmosfera. A energia espalhada que chega ao solo recebe o nome de radiação difusa (sky radiation) e

a energia que chega em linha reta do Sol diretamente à superfície é chamada de radiação direta (beam radiation), conforme ilustrado na fig. 7. Para simplificar os cálculos, no presente trabalho, primeiro será considerado a resultante de todos os aspectos relativos ao comprimento de onda total do espectro solar e somente depois será tomada somente a faixa proporcional relativa ao espectro de luz visível.

A propriedade óptica que define a atenuação da luz solar pode ser calculada a partir da massa espectral relativa e da transmitância dos diversos componentes atmosféricos. A quantidade de radiação atenuada pode ser calculada utilizando a lei de Lambert através de um meio homogêneo. Esta lei se aplica na maior parte dos casos tanto para os processos de absorção quanto para os processos de espalhamento atmosférico.

Figura 7. Distribuição da radiação solar direta, difusa e absorvida. Adaptada de Iqbal (1983).



O método de cálculo da transmitância atmosférica foi baseada no estabelecido por Iqbal, que considera vários aspectos atmosféricos e apresenta uma formulação para uma atmosfera localizada nos Estados Unidos.

Para o cálculo da transmitância será considerada a absorção da energia solar pelo Ozônio, vapor d'água e mistura de gases e o espalhamento devido ao ar seco e aerossóis. Quando a radiação solar atravessa a atmosfera, cada molécula presente no meio interage com a energia. A atenuação é em função do tipo e do número de moléculas no caminho do raio solar até atingir o solo. No presente trabalho, serão calculadas a massa óptica relativa e a transmitância atmosférica. Como o caminho óptico varia em seu comprimento de acordo com a posição do Sol, será necessária a correção dos cálculos considerando o ângulo de elevação solar ou ângulo zenital. Nas subseções a seguir serão descritos os cálculos de todos os parâmetros necessários para a determinação da radiação solar global, direta e difusa para uma atmosfera sem nuvens, com o objetivo de normalizar os dados medidos a serem utilizados na rede neural.

### 5.3.2.1 Espalhamento da energia solar devido às moléculas de ar seco (Rayleigh scattering):

A atenuação da radiação solar devido ao espalhamento do ar seco é em função da pressão atmosférica e do ângulo zenital e pode ser obtida pela seguinte expressão extraída de Iqbal 7.6.2 e 5.7.3:

$$\tau_r = \exp(-0,0903m_a^{0,84}(1,0 + m_a + m_a^{1,01})), \text{ onde} \quad (5)$$

$\tau_r$  = Transmitância devido ao espalhamento Rayleigh devido às moléculas de ar seco.

$m_a$  = massa óptica relativa devido ao ar dada pela seguinte expressão:

$$m_a = \left[ \cos \theta_z + 0,15(93,885 - \theta_z)^{-1,253} \right]^{-1} \left( \frac{P}{1013,25} \right), \text{ onde:} \quad (6)$$

$p$  = pressão atmosférica atual

### 5.3.2.2 Absorção da energia solar devido às moléculas de Ozônio

Dentre os principais constituintes moleculares da atmosfera o ozônio possui um perfil de concentração distinto em relação aos outros elementos como o ar seco e o ar, por isto ele é considerado à parte. O ozônio se concentra em uma camada fina a aproximadamente 20 km. A transmitância da atmosfera devido aos aerossóis pode ser calculada da seguinte expressão extraída de e Iqbal 7.6.3 e 5.7.2:

$$\tau_o = 1 - \left[ 0.1611 l M_r (1 + 139.48 l M_r)^{-0.3035} - 0.002715 l M_r (1 + 0.044 l M_r + 0.003 (l M_r)^2)^{-1} \right] \quad \text{onde:} \quad (8)$$

$\tau_o$  = Transmitância devido a camada de ozônio

$l$  = quantidade de Ozônio em centímetros.

$m_r$  = massa óptica relativa devido ao ar sem considerar a pressão atmosférica local.

$$m_r = \left[ \cos \theta_z + 0,15(93,885 - \theta_z)^{-1,253} \right]^{-1}, \quad \text{onde:} \quad (9)$$

$\theta_z$  = ângulo zenital.

### 5.3.2.3 Absorção da energia solar devido a mistura uniforme de gases combinados:

Dióxido de carbono e outros componentes minoritários na atmosfera ( $O_2$ ,  $CO$ ,  $N_2O$  etc) são considerados como uma mistura de gases combinados para efeitos de

calculo da transmitância. A transmitância devido as moléculas de gases combinados, pode ser calculada pela seguinte expressão extraída de e Iqbal 7.6.4:

$$\tau_g = \exp(-0.0127m_a^{0.26}) \quad \text{onde:} \quad (10)$$

$\tau_g$  = Transmitância devido a absorção dos gases combinados.

$m_a$  = massa óptica relativa devido ao ar.

#### 5.3.2.4 Absorção devido ao vapor de água:

A atenuação da radiação solar devido ao vapor de água (ou quantidade de água precipitável) também é em função da pressão atmosférica e do angulo zenital. Outros autores correlacionam a quantidade de vapor de água com a pressão parcial de vapor ou temperatura do ponto de orvalho ou umidade atmosférica, porem tal correlação possui coeficientes que depende da localização variam com a latitude e a estação do ano. Existem muitas incertezas ainda na determinação do vapor de água na atmosfera, por que a maior parte do vapor de água se concentra nas primeiras camadas da atmosfera. Iqbal sugere que a transmitância óptica relativa ao vapor de água seja obtida pela seguinte expressão(7.6.5):

$$\tau_{wa} = 1 - 2.4959w.m_r((1 + 79.034.w.m_r)^{0.6828} + 6.385.w.m_r)^{-1}, \text{ onde:} \quad (11)$$

$\tau_{wa}$  = Transmitância devido ao vapor de água.

$m_r$  = massa óptica relativa a presença do ar na atmosfera dada pela expressão abaixo.

$w$  = quantidade de água precipitável em centímetros dada pela seguinte expressão (Iqbal 5.4.6 e 5.4.7).

$$w = 0,493 \phi_r p_s / T \quad \text{e} \quad p_s = \exp(26,23 - 5426/T) \quad \text{onde:} \quad (13)$$

$p_s$  = pressão parcial de vapor no ar saturado.

$T$  = temperatura de bulbo seco em graus Kelvin.

$\phi_r$  = Umidade relativa do ar.

### 5.3.2.5 Formula de turbidez de Angström para aos aerossóis:

Aerossóis são elementos particulados (seco e úmido) da atmosfera que tanto absorvem quanto espalham a radiação solar na atmosfera. Os aerossóis possuem grande variabilidade de tamanho em suas partículas. A formula de turbidez Angström agrega todos os efeitos dos aerossóis em uma única formula. Utilizando a formula de turbidez de Angström, a transmitância da atmosfera devido aos aerossóis pode ser calculada da seguinte expressão extraída de e Iqbal 7.6.6:

$$\tau_a = \exp\left(-0.0481^{0.873}(1+0.0481-0.0481^{0.07088})m_a^{0.9108}\right) \quad \text{onde:} \quad (14)$$

$\tau_a$  = Transmitância devido ao fator de turbidez de Angström.

$m_a$  = massa óptica relativa devido ao ar.

NOTA: Os aerossóis são o parâmetro de maior incerteza no cálculo da radiação solar na superfície. Eles são altamente variáveis em tamanho, composição e propriedades ópticas. Para a radiação direta torna-se necessário o calculo de uma

transmitância adicional calculada a partir das seguintes expressões extraídas de e Iqbal 7.6.9 e 7.6.11:

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_0)(1 - m_a + m_a^{1.06})(1 - \tau_a) \quad (15)$$

$$\tau_{as} = \tau_a / \tau_{aa} \quad (16)$$

### 5.3.2.6 Albedo terrestre e albedo devido às múltiplas reflexões

O albedo é a quantidade de energia refletida de volta, considerando-se a energia incidente. A energia solar refletida pela superfície volta à atmosfera e é re-absorvida e re-emitada continuamente em um processo de múltipla reflexão, conforme pode ser ilustrado na fig. 8 .O calculo do albedo atmosférico devido às múltiplas reflexões pode ser determinado pela seguinte expressão iqbal 7.6.2:

$$\rho'_a = 0.0685 + (1 - F_c)(1 - \tau_{as}) \quad \text{onde:} \quad (17)$$

$F_c$  é a proporção da energia espalhada adiante em relação ao total da energia espalhada (forward scatterance).  $F_c$  é determinado em função do ângulo zenital conforme tabela 1 (Iqbal 6.17.1):

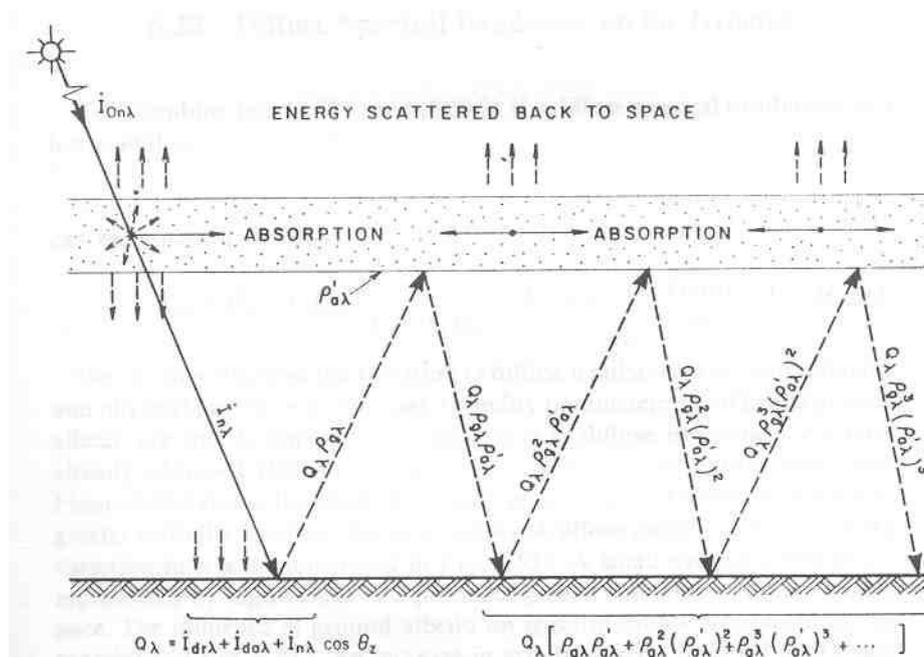
Tabela 1. Razão do espalhamento à frente em relação ao total da energia espalhada. Adaptada de Iqbal 6.17.1.

$\theta_z$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	85
$F_c$	0.92	0.92	0.90	0.90	0.90	0.85	0.78	0.68	0.60	0.50

Para o albedo terrestre ( $\rho_g$ ) será utilizado o valor médio do planeta que é de 0.2

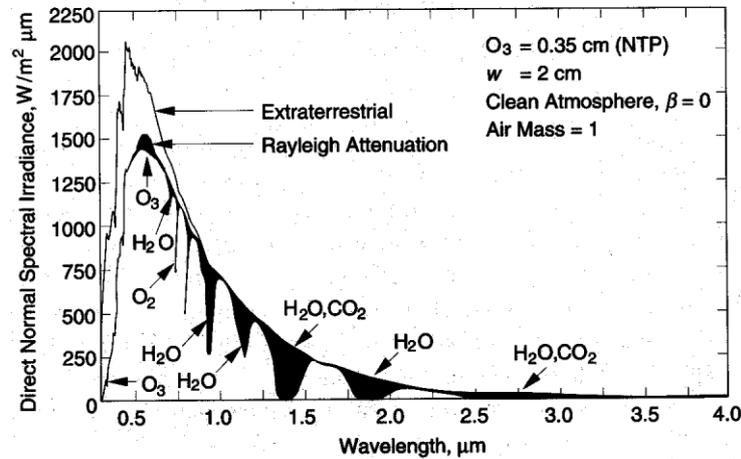
Figura 8. O processo de múltipla reflexão solar entre a atmosfera e a superfície.

Adaptada de Iqbal 6.19.1.



A título de ilustração uma figura comparativa do espectro da radiação solar extraterrestre e do espectro que chega à superfície pode ser apreciada na fig. 9. A figura ilustra a absorção pela atmosfera de vários absorvedores moleculares.

Figura 9. O espectro de radiação solar antes e depois de atravessar a atmosfera, devido somente à mistura e gases, nas condições indicadas. Adaptada de Iqbal 6.14.3.



### 5.3.3 Cálculo da irradiação direta na superfície

O Cálculo da irradiação direta normal à superfície, considerando a atenuação relativa à atmosfera em função do comprimento de onda é calculada pela seguinte expressão Iqbal 7.6.1:

$$I_n = 0.975 \cdot E_0 \cdot I_{sc} \cdot \tau_r \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a \quad (18)$$

Para uma superfície horizontal a radiação direta é calculada pela seguinte expressão:

$$I_b = I_n \cos \theta_z \quad (19)$$

### 5.3.4 A radiação difusa na superfície

A radiação difusa é oriunda nas diversas camadas da atmosfera principalmente pelo efeito do espalhamento da luz solar nos componentes atmosféricos. Para o presente

trabalho será utilizado um cálculo simplificado da radiação difusa, que produz ainda uma análise bem precisa dos resultados. O cálculo da componente do multi espalhamento da radiação difusa é matematicamente complexo de ser avaliado e a sua influencia no resultado total é mínima. No presente trabalho será avaliada somente a radiação difusa produzida pelo espalhamento Rayleigh, pelos aerossóis e pelas múltiplas reflexões do albedo. A radiação difusa também é variável em função dos valores climáticos.

#### 5.3.4.1 Componente da radiação difusa devido ao espalhamento Rayleigh

O espalhamento da luz solar devido ao espalhamento Rayleigh ocorre de forma aleatória em todas as direções. No presente trabalho será considerado que metade da radiação difusa causada por espalhamento Rayleigh será refletida de volta (back scattering) retornando ao espaço, e somente metade será refletida adiante (forward scattering) e incidirá sobre o solo. O cálculo da componente difusa devido ao espalhamento Rayleigh na presença de absorvedores moleculares que chega à superfície é o seguinte: (Iqbal 7.6.8).

$$I_{dr} = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \cos \theta_z \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot 0.5(1 - \tau_r)}{(1 - m_a + m_a^{1.02})} \quad (20)$$

#### 5.3.4.2 Componente da radiação difusa devido a presença de aerossóis

O espalhamento devido aos aerossóis é devido ao espalhamento Mie. Como a proporção do espalhamento adiante é maior que o espalhamento Rayleigh e varia em função do angulo zenital, (aliado ao fato dos aerossóis possuírem uma distribuição aleatória em relação ao tamanho, número e propriedades ópticas) torna-se necessário incluir um fator considerando o espalhamento adiante em função do angulo zenital. O cálculo da componente difusa devido ao espalhamento pelos aerossóis que chega à superfície é dado pela seguinte expressão: (Iqbal 7.6.10).

$$I_{da} = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \cos \theta_z \cdot \tau_0 \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot F_c \cdot (1 - \tau_{as})}{1 - m_a + m_a^{1.02}} \quad (21)$$

#### 5.3.4.3 Componente da radiação difusa devido a multi reflexão na atmosfera

A componente difusa devido a múltipla reflexão atmosférica ocorre pelo fato da energia incidente corresponde ao espalhamento adiante mais a radiação direta, refletirem na superfície de volta à atmosfera e da atmosfera de volta à superfície em um processo contínuo. A componente da radiação difusa correspondente à múltipla reflexão é dada pela expressão: (Iqbal 7.4.16).

$$I_{dm} = \frac{(I_n \cdot \cos \theta_z + I_{dr} + I_{da}) \cdot \rho_g \cdot \rho'_a}{(1 - \rho_g \cdot \rho'_a)} \quad (22)$$

#### 5.3.4.4 Calculo da irradiação difusa total na superfície

A expressão que finalmente pode representa a radiação difusa total que alcança o solo é a soma de todas as componentes calculadas anteriormente, conforme descrito a seguir:

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (23)$$

#### 5.3.5 Calculo da irradiação global na superfície

A irradiação global é a soma da radiação direta mais a difusa. Para obtê-la basta somar as expressões calculadas anteriormente para uma superfície horizontal conforme a seguir: (Iqbal 7.4.18)

$$I_g = I_n \cdot \cos \theta_z + I_d \quad (24)$$

### 5.3.6 Irradiação solar na presença da atmosfera com nuvens

Além da atmosfera com os seus componentes moleculares, as nuvens atenuam fortemente a radiação solar. No presente trabalho, para a determinação da radiação solar na presença de nuvens, será utilizada a diferença na radiação solar entre a atmosfera sem nuvens (calculada) e a com nuvens (medida). Na maior parte dos casos, onde a energia solar é largamente utilizada no campo da engenharia, é utilizada uma correlação entre a média horária ou diária, obtida a partir de estações de superfície, através de dados extrapolados de estações próximas ou médias estimadas para uma determinada região para o cálculo da radiação solar. No presente trabalho será possível utilizar um valor mais preciso, ou seja, o valor médio da radiação solar obtido no período de um minuto, utilizando dados de uma estação solarimétrica de precisão da BSRN da WMO (Organização Mundial de Meteorologia) (<http://www.bsrn.ch>). Os valores das médias horárias, diárias ou mensais disponíveis na literatura, não acrescentam nenhuma informação relevante ao presente trabalho, pois o que interessa é a luminosidade instantânea no instante em que a fotografia é tirada.

Vale a pena ressaltar que a aparência esbranquiçada das nuvens é devido ao fato de ocorrer um espalhamento não seletivo (Lillesand e Kiefer 1994). Isto ocorre quando o diâmetro das partículas que causam o espalhamento é muito maior do que o comprimento de onda observado (espectro visível). Gotículas de água causam este espalhamento por que possuem o diâmetro na ordem de 5 a 100 $\mu$ m. Ele é chamado de não seletivo por que espalha quantidades iguais de radiação em toda faixa do visível (quantidades iguais de vermelho, verde e azul) e na faixa de infravermelho do próximo ao intermediário. Por isto a neblina e as nuvens possuem aparência esbranquiçada. A aparência cinza das nuvens é devido à absorção da luz solar pelas gotas de água.

O cálculo da irradiação total será feito utilizando os valores instantâneos, de acordo com um dos modelos teóricos especificados por Iqbal (1983) no capítulo 7 do seu livro. O mais recomendado dentre os descritos segundo o autor é o modelo paramétrico C.

Os valores medidos da radiação solar virão de um conjunto de radiômetros presentes ao lado da câmera. Os radiômetros são piranômetros, utilizados para a medida das radiações global e difusa, e o pirheliômetro utilizado para a medida da radiação direta. Os sensores da estação possuem registro no WRMC, e tem a calibração rastreada a padrões internacionais.

## **5.4 Observação sinóptica dos meteorologistas a partir da superfície**

Além da comparação entre os valores teóricos e práticos, outro parâmetro a ser considerado é a avaliação de um observador na superfície. Apesar do julgamento do observador acerca da cobertura de nuvens ser uma análise subjetiva, ela ainda representa um dado adicional acerca da cobertura efetiva das nuvens a ser considerado. Os dados obtidos a partir dos meteorologistas do DPV (Departamento de Proteção ao Vôo) no aeroporto, indicam uma estimativa acerca de quantas camadas de nuvens estão presentes e a cobertura de nuvens aproximada.

Os dados das observações sinópticas realizadas pelos meteorologistas estão descritos nos anexos A.

Os critérios para classificação das nuvens em categorias foram baseados nas observações sinópticas adotadas comumente nas estações de observação meteorológicas. A seguir será feita uma breve descrição dos critérios utilizados.

A presença das nuvens é descrita pelo número de camadas presente no horário da observação, quantidade em cada camada, gênero presente na camada em questão e a altitude da camada em relação ao solo. Podem existir no horário de observação até quatro camadas diferentes. A quantidade observada é medida em oitavas e um observador faz uma análise subjetiva da quantidade de nuvens preenchida em cada camada. O tipo de nuvem que compõe a camada pode ser de até oito gêneros diferentes, sendo que para cada gênero existente é convencionado um número de 0 a 9 de acordo com a tab. 2, baseada no Atlas de observação de Nuvens da OMM(1972). A altitude das

nuvens é dada em decâmetros. Uma figura esquemática acerca da ocorrência das nuvens pode ser observada na fig. 10.

Figura 10. Representação esquemática de vários gêneros de nuvens. Adaptada de Lenoble(1993).

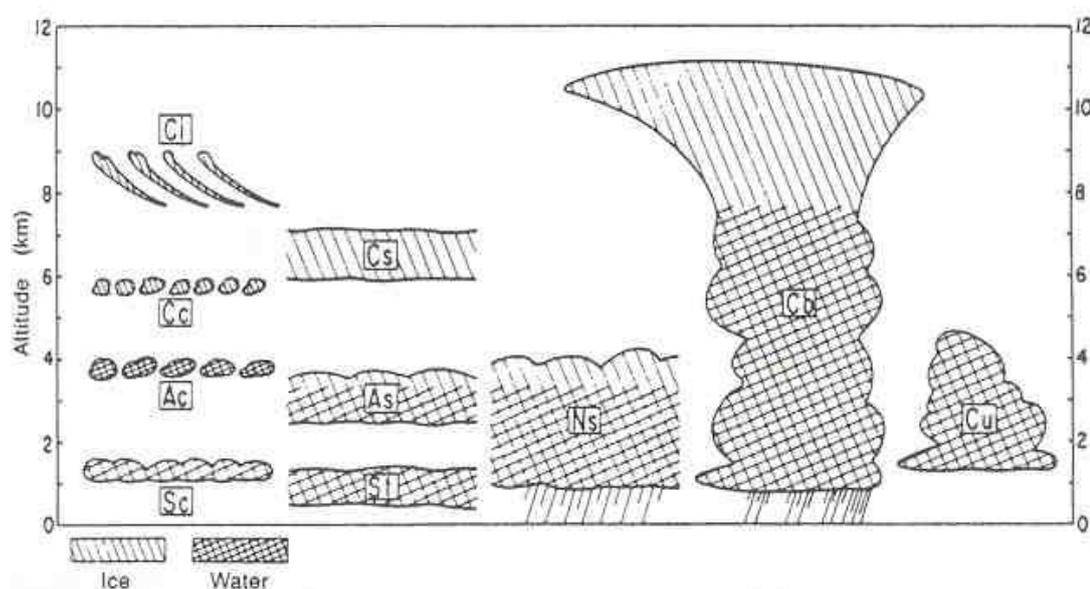


Fig. 16.4. Schematic representation of the various cloud genera (from Queney, 1974, Fig. 21). Ci: cirrus, Cc: cirrocumulus, Ac: altostratus, Sc: stratocumulus, Cs: cirrostratus, As: altostratus, St: stratus, Ns: nimbostratus, Cb: cumulonimbus, Cu: cumulus.

Tabela 2. Ilustração dos códigos numéricos utilizados na classificação das nuvens adotada pelos observadores das estações meteorológicas.

Classificação	Gênero
0	Cirrus
1	Cirrocumulus ou Cirrostratus
2	Altostratus

3	Altostratus
4	Nimbostratus
5	Stratocumulus
6	Stratus
7	Cumulus (humilis e mediocris)
8	Cumulus (congestus e fractus)
9	Cumulonimbus

A classificação das nuvens pelo meteorologista é feita em intervalos de 30 em 30 minutos. As fotos são retiradas de 15 em 15 minutos. A classificação das nuvens em horários em que não são feitas as observações pelo meteorologista foram extrapolados, tomando como base a observação anterior e posterior. Tal aproximação é possível, por que a variação total do tipo de nuvem presente no céu, para o período de observação entre duas observações consecutivas não varia muito na escala de tempo (variação temporal). Em primeiro lugar foi feita a distribuição dos dados em tabelas diárias, nas quais foram adicionados os dados de radiação solar e os meteorológicos no instante da medida (apêndice A.1). Em seguida os dados foram agrupados por similaridade exata de acordo com a classificação do operador (apêndice A.2). E finalmente os dados foram agrupados por faixa de variação de altitude aproximada, uma vez que a altitude estabelecida pelo operador é estimada (apêndice A.3). O apêndice A.3 tem como objetivo agrupar as nuvens nos padrões de ocorrência, tentando estabelecer grupos similares para o treinamento da rede neural. A partir deste ponto foram separadas algumas amostras para o conjunto de treinamento típicas de cada tipo de nuvem de acordo com a ocorrência existente. O agrupamento tem por objetivo facilitar a escolha de um conjunto de treinamento, buscando a ocorrência de imagens que apresentaram o mesmo tipo de nuvem para quantidade de radiação solar distintas.

## 5.5 Imagens e satélite

Serão utilizadas imagens de satélite no espectro de luz visível. As imagens oriundas do satélite GOES-8 serão fornecidas pelo INPE (Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais) no âmbito de um convênio já existente com a UFSC – EMC – LABSOLAR. Também serão utilizados diversos enfoques das técnicas de análise de imagens, visando a determinação da cobertura efetiva de nuvens. Os dados da cobertura de nuvens obtidos através das imagens de satélite, serão correlacionados com os dados obtidos da estação solarimétrica de superfície estabelecidas pelo LABSOLAR. Uma relação das imagens obtidas através do convênio com o INPE para o presente experimento pode ser encontrada no anexo C.

Vale a pena ressaltar que o uso das imagens fornecidas pelo INPE está garantido pelo convênio celebrado com a UFSC para a geração do Atlas Solarimétrico do Brasil. As imagens também estão disponibilizadas para fins educacionais, de pesquisa ou recreação desde que mencione o copywrite a seguir:

Copyright © 1995-2001 do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).  
Ministério da Ciência e Tecnologia (<http://www.cptec.inpe.br/satelite/indexp.html>).

## **5.6 Implementação da rede neural**

As redes neurais são dispositivos computacionais muito utilizados no reconhecimento de padrões. Para a implementação da rede neural, será utilizado o aplicativo SNNS desenvolvido pela Universidade de Stuttgart da Alemanha. A implementação da rede neural será feita em duas fases, treinamento e operação.

O treinamento utilizado será o supervisionado, utilizando um aplicativo auxiliar que foi disponibilizada a partir do projeto CYCLOPS, do Departamento de Informática e Estatística da UFSC. Este aplicativo que gera um arquivo de saída com o indicativo da presença de nuvens ou não, com os respectivos valores dos pixels nos padrões RGB (Red Green e Blue) ou IHS (Intensity, Hue e Saturation) a partir da imagem. Inicialmente, a determinação dos pixels na imagem, indicando se o pixel em questão representa uma nuvem ou não é manual, com resultado binário. O aplicativo faz uma visualização da imagem e um operador aponta através de um cursor controlado por um mouse, para os pixels de imagem que representam as nuvens ou o céu claro. Um conjunto de imagens com diversas variações combinações de luminosidade, condições

meteorológicas e a classificação das nuvens foram utilizadas como dados de entrada no conjunto de treinamento. O conjunto foi apresentado para o treinamento da rede neural, até que o erro chegasse a um valor bem baixo. Os dados apresentados na entrada da rede neural foram os seguintes:

- Os valores da Radiação global, difusa e direta calculados a partir do modelo atmosférico sugerido por Iqbal.
- Os valores da Radiação global, difusa e direta medidos a partir da estação solarimétrica.
- Os valores dos dados meteorológicos pressão, temperatura e umidade.
- Observação sinóptica feita pelos meteorologistas.

Depois do treinamento dados reais foram alimentados na rede neural para avaliação dos resultados obtidos.

Os valores dos pixels eram marcados como nuvens ou não de forma a formar um conjunto de treinamento para cada imagem com vários valores diferentes de intensidade de radiação solar para céus claro, parcialmente nublado ou encoberto. A seguir os dados das imagens eram concatenados para formar um único arquivo para a entrada da rede neural. A rede neural era então treinada até apresentar um erro bem pequeno. Depois a rede treinada era salva e o programa convertido para uma rotina em C. Depois o arquivo de saída era utilizado para montar uma biblioteca dinâmica que era integrada ao aplicativo desenvolvido em linguagem Smalltalk. A rede neural era invocada a partir de um método do Smalltalk passando e retornando os parâmetros através do mesmo.

## **5.7 Intercomparação com Dados de Satélite**

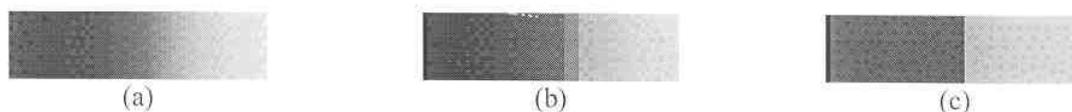
A área representada pelo campo de visão da câmera na imagem de satélite é estimada em equivalente a um pixel. Apesar deste único ponto inicialmente parecer insignificante quando comparado com áreas que representam dimensões continentais na imagem, ele pode ser utilizado para efeito de comparação com as imagens de satélite,

pois eles representarão as condições reais medidas a partir da superfície. O ideal seria haverem vários pontos de observação, mas isto seria objeto de estudos mais avançados acerca deste assunto no futuro. A comparação será feita com o resultado indicado na imagem de satélite utilizado no modelo BRAZILSR com a medida da superfície. Após a obtenção destes dados, é que serão apresentados os resultados e a conclusão da presente dissertação.

## 5.8 Filtro de difusão anisotrópica

As fotos retiradas das nuvens apresentam uma certa dificuldade na identificação da superfície de separação entre a nuvem e o céu. As nuvens não apresentam bordas bem definidas, mas uma transição difusa entre o céu e a nuvem dentro da fotografia. Além disto a borda de transição pode, em muitos casos, variar na largura. Tal dificuldade existe por que o “meio” ou a atmosfera aonde ocorre a presença de nuvens compõe uma superfície não homogênea aonde as propriedades ópticas variam nas regiões que formam a imagem. A rigor tal variação pode ser caracterizada matematicamente como um meio anisotrópico. Esta difusividade dificulta a determinação mais precisa no cálculo da área da cobertura de nuvens a partir das imagens. A solução adotada para minimizar tais efeitos foi um filtro de difusão anisotrópico. Este filtro possui a propriedade de acentuar as diferenças entre as bordas presentes na imagem e homogeneizar as áreas similares dentro dos segmentos. O resultado da aplicação do filtro de difusão em uma borda difusa pode ser visualizado na fig. 11.

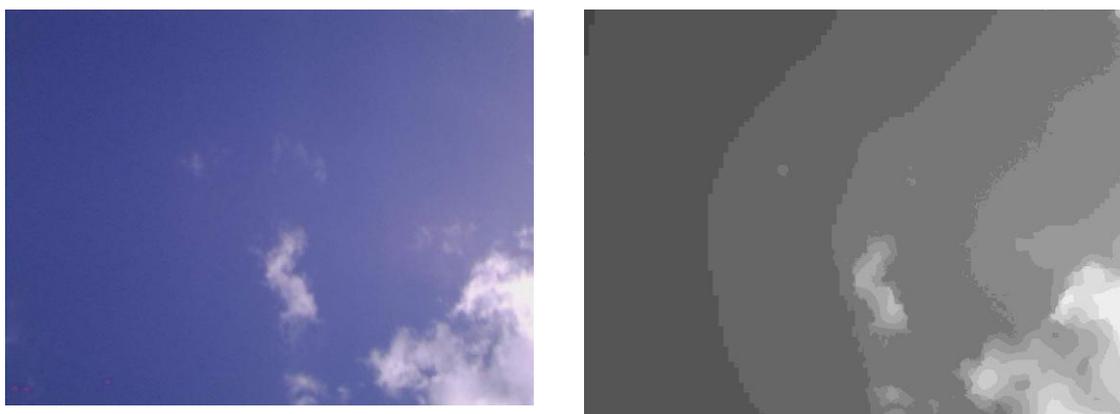
Figura 11. Evolução do realce em uma borda genérica depois do tratamento da imagem com o filtro de difusão anisotrópica. (a) original, (b) intermediária e (c) final.



Para a implementação do filtro de difusão existem várias opções, todas utilizando princípios de cálculo avançado como translação de vetores, equações de Green e equações diferenciais parciais dentre outras. Como a confecção de um programa

utilizando qualquer um dos métodos, tomaria uma quantidade de tempo muito grande de forma a comprometer os prazos da apresentação final da dissertação, optou-se por utilizar um programa pronto desenvolvido pela Universidade de Stuttgart na Alemanha. Apesar das imagens originais serem coloridas (espaço RGB), elas foram convertidas para monocromáticas em 256 níveis de cinza. Para a execução do programa, é necessária a passagem de dois parâmetros; contraste e número de interações. O programa deve apresentar na entrada arquivos no formato PGM em níveis de cinza de 8 bits. Os resultados de uma imagem processada com filtro de difusão podem ser apreciados nas fig. 12.

Figura 12 Resultado típico de uma análise de difusão anisotrópica.



Uma descrição sumária acerca de como são calculados os novos valores do filtro de difusão pode ser visualizado no anexo G.

## 6 Implementação

Neste capítulo será descrito como as informações levantadas durante a coleta de dados foram utilizadas no presente trabalho. Os dados gerados no presente trabalho foram divididos em dois grupos. Dados que compunham o conjunto de treinamento e os dados que compunham o conjunto de análise. Como em qualquer trabalho que envolve dados experimentais, é comum existirem dados, que não são apropriados para a análise ou por estarem incompletos ou por não representarem exatamente o fenômeno que se deseja observar. Apesar de terem sido tiradas muitas fotos, a maior parte das mesmas não foi útil para uma boa análise do fenômeno que se queria observar. De toda a amostragem existente, somente treze imagens puderam ser selecionadas para o conjunto de análise. São as imagens que possuíam simultaneamente os dados da radiação solar, os dados meteorológicos, os dados de observação e as imagens de satélite nos horários sinópticos selecionados. Uma das dificuldades encontradas foi a presença do Sol no ângulo de visada da câmera a partir de um certo horário do dia. A presença do Sol no ângulo de visada da câmera além de ofuscar a foto poderia danificar a câmera pela sobre exposição da superfície sensível (CCD Charge Coupled Device) as altas intensidades da luz solar. Isto reduziu o período útil para tirar as fotografias do céu durante o dia para horários onde o ângulo de elevação solar era menor.

As fotos foram tiradas manualmente e o período de amostragem começava antes do nascer do Sol e terminava depois do pôr do Sol. Tentou-se implementar um sistema de coleta automática das imagens em horários pré-determinados, mas as bibliotecas fornecidas pelo fabricante da câmera não funcionaram a contento e por falta de tempo hábil para a implementação foram abandonados. A queima de um dos equipamentos que medem a radiação solar direta (pirheliômetro) prejudicou os trabalhos por nove meses, e reduziu em muito o conjunto de amostragem das fotos. Por fim optou-se por prosseguir o trabalho mesmo com um conjunto reduzido.

## 6.1 Metodologia utilizada e aplicativo.

De posse de todas as informações coletadas será descrito como foi implementada a solução do problema. Na fig. 13 a seguir, está ilustrada uma descrição geral do método proposto. Vale a pena salientar que apenas uma parte das implementações descritas nesta seção foi incorporada ao aplicativo da interface gráfica. Uma segunda parte que permite uma análise mais aprofundada considerando-se a radiação solar normalizada não foi implementada ao todo. Para um melhor esclarecimento acerca do que foi implementado e do que foi incorporado favor verificar a tab. 3. A título de ilustração, a interface gráfica desenvolvida para auxiliar a implementação do método pode ser apreciada na fig. 14.

Figura 13. Diagrama em blocos da metodologia empregada para a solução do problema.

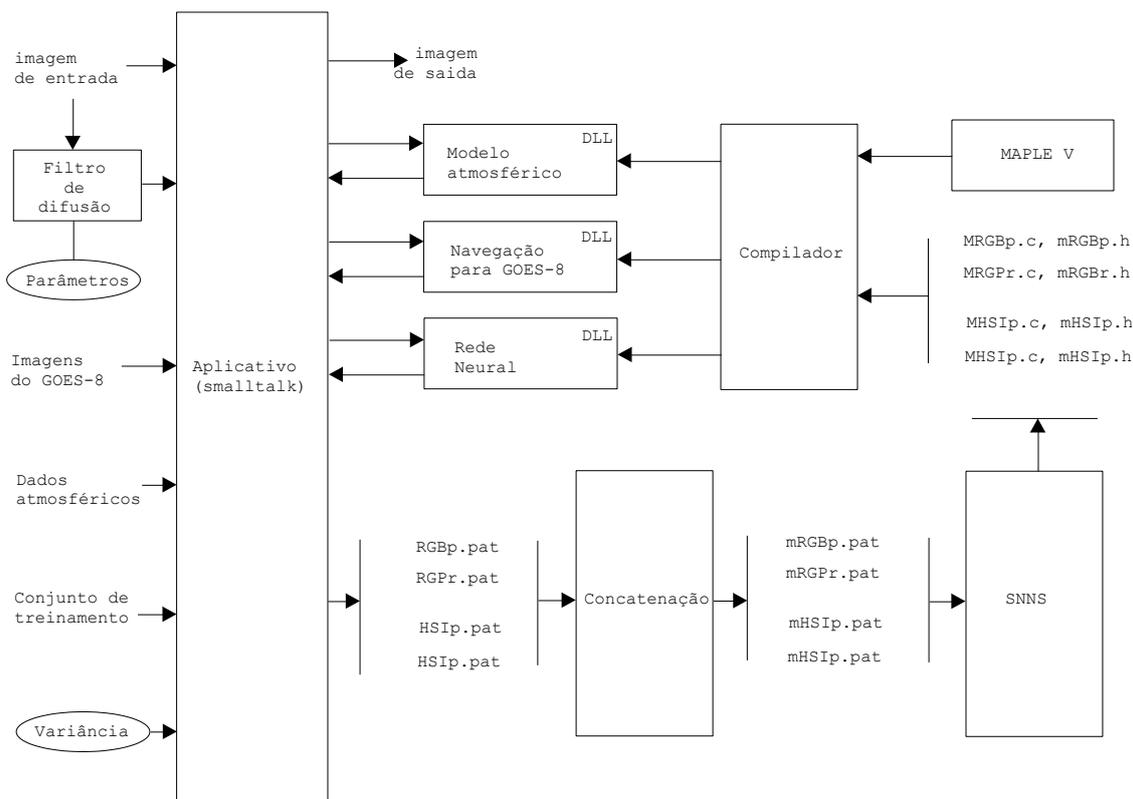


Figura 14 Interface gráfica do protótipo implementado.

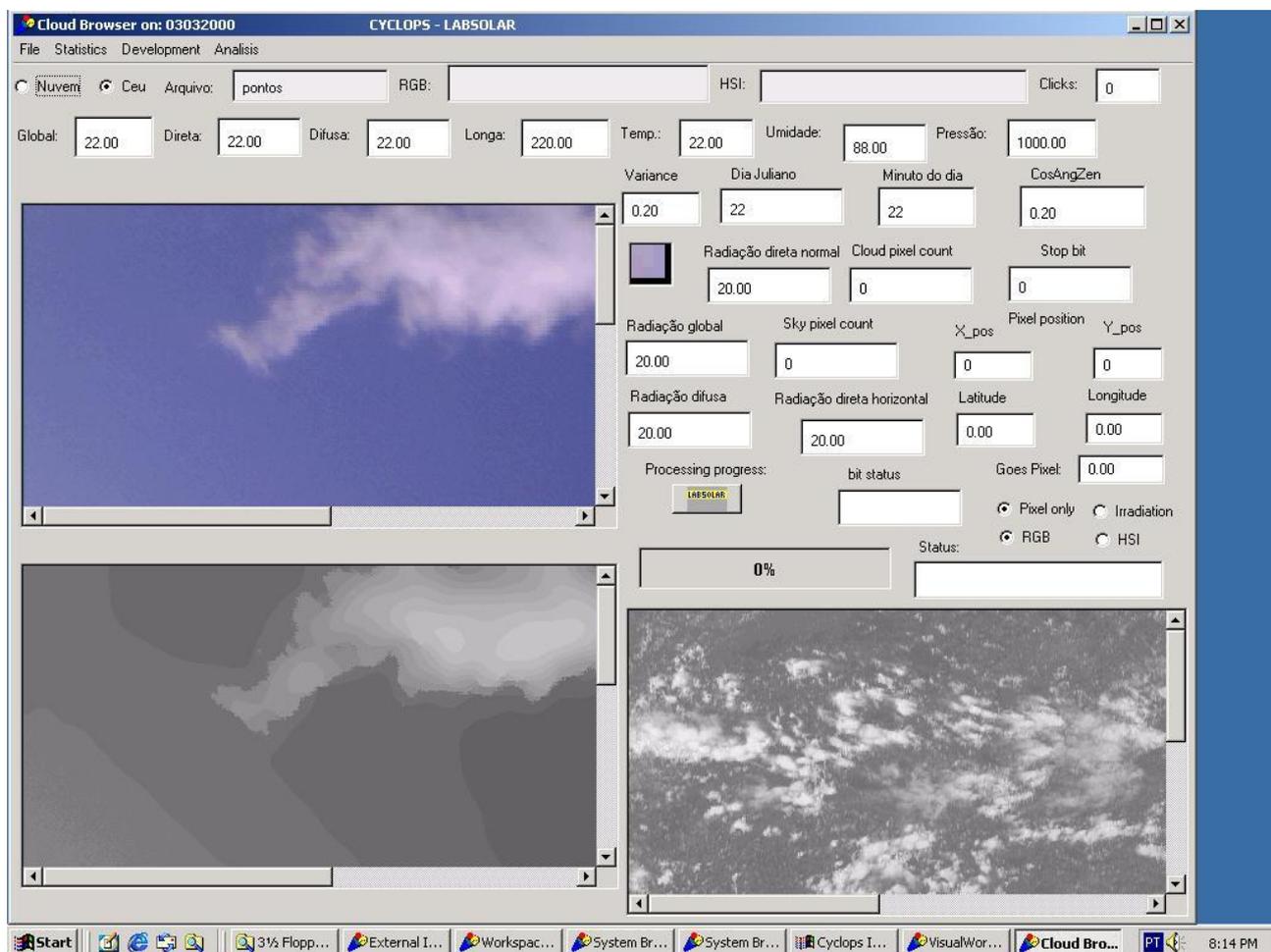


Tabela 3. Implementações incorporadas ao aplicativo desenvolvido.

	Classificação
Análise do pixel RGB na rede neural.	•••••
Análise do pixel HSI na rede neural.	••
Análise do pixel RGB + variância na rede neural.	•••••
Análise do pixel HSI + variância na rede neural.	••
Análise do pixel RGB + radiação na rede neural.	••
Análise do pixel HSI + radiação na rede neural.	••
Análise do pixel RGB + variância + radiação na rede neural.	••
Análise do pixel HSI + variância + radiação na rede neural.	••
Cálculo do modelo atmosférico.	•••

Cálculo da rotina de navegação.	• • •
Difusão anisotrópica monocromática.	•
Difusão anisotrópica colorida.	•
Análise de textura ou outra solução para o problema da brilhância	•

Legenda para a tabela:

- • • • Incorporado ao aplicativo e analisado
- • • Implementado mas não incorporado
- • Implementado mas não analisado
- Não implementado

O aplicativo desenvolvido em SMALLTALK permite a visualização da imagem que será utilizada para a geração dos dados de entrada para o conjunto de treinamento. Através de um cursor posicionado sobre a imagem pode-se determinar quais pixels são correspondentes ao céu e quais pixels são correspondentes a nuvem. Uma janela com a ampliação da vizinhança de 3x3 ampliada foi desenvolvida para assegurar uma visualização mais precisa do pixel. O aplicativo permite também que se insira no conjunto de treinamento os dados de radiação solar, meteorológicos, geográficos, a data e a hora correspondentes a foto sendo analisada. A partir destes dados o aplicativo executaria o cálculo do modelo atmosférico paramétrico C descrito no capítulo 5 e normalizaria os dados de radiação medidos preenchidos pelo operador. Os dados normalizados de radiação serviriam como entrada de um conjunto de treinamento para a rede neural. Os dados geográficos também serviriam como entrada de uma rotina de navegação, para que a partir da latitude e longitude preenchidas pelo operador poderia ser obtido o valor do pixel correspondente à imagem de satélite para ser interpretado. Podem ser geradas várias opções diferentes de conjuntos de treinamento para ser analisados pela rede e comparar os resultados, mas isto não foi implementado por não haver tempo hábil até os prazos finais de conclusão da tese de mestrado.

De posse dos conjuntos de treinamento pode-se gerar a rede neural. A rede neural é gerada no SNNS utilizando os conjuntos de treinamento. Não houve uma preocupação especial em se escolher qual o tipo de rede neural seria mais apropriada para esta

aplicação por se tratar de um problema que pode ser resolvido por uma rede simples. A escolhida no caso foi a “feed forward” com “backpropagation”. Os dados de configuração da rede foram “fully conected”, com o número de elementos na camada oculta dez vezes maior mais um que o número de entradas. Depois de treinada o SNNS possui um aplicativo que gera uma função em C correspondente a rede neural. Os dados são passados e retornados à rede através de ponteiros das funções. As funções geradas pelo SNNS foram adaptadas para se tornarem bibliotecas dinâmicas (DLL) e depois incorporadas novamente ao aplicativo SMALLTALK.

A partir deste ponto as imagens a ser analisadas são carregadas novamente no aplicativo. Depois através de uma varredura de todos os pixels da imagem de entrada determina-se a estimativa da cobertura das nuvens.

## **6.2 Implementação do modelo atmosférico**

O modelo atmosférico implementado foi descrito no capítulo 5. Inicialmente era prevista a incorporação do modelo atmosférico no aplicativo desenvolvido em Smalltalk. Mas foram encontradas dificuldades de compilação e linkagem devido a alguma incompatibilidade entre o código gerado pelo MAPLE V e o compilador utilizado, impossibilitou a inserção da biblioteca dinâmica do modelo atmosférico no programa. Para a utilização dos valores no aplicativo eles foram calculados no próprio MAPLE e inseridos manualmente nos campos de processamento. O MAPLE é um pacote matemático que facilitou a confecção do modelo, permitindo uma validação rápida dos resultados. Além do mais, caso o modelo atmosférico precise ser incrementado para um modelamento matemático mais rigoroso, o MAPLE tem plenas condições de implementá-lo. O programa utilizado em MAPLE pode ser visualizado no anexo C.

### 6.3 Estimativa da cobertura de nuvens a partir da superfície

Para a comparação com a cobertura efetiva de nuvens uma nota acerca da observação de superfície deve ser feita. A observação é feita com as nuvens em camadas em altitudes diferentes. Não existe um índice de cobertura total. Para a comparação dos resultados, será necessário estabelecer um índice de cobertura total retirado a partir dos dados de observação de superfície. O critério utilizado foi uma soma ponderada da cobertura das camadas presentes no instante de observação e o resultado é dado em porcentagem.

Cada camada possui a cobertura estimada em oitavas e a soma de todas as coberturas deve somar 100%. A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$Cob. = \frac{(QTI_1/8 + QTI_2/8 + QTI_3/8 + QTI_4/8)}{N} \quad (25)$$

Cob = índice de cobertura observado.

$QTI_n$  = Quantidade de nuvens observada na camada de nuvens N se esta for presente.

N= Número de camadas existentes no instante de observação.

NOTA: vale a pena salientar que o observador pode ver camadas sobrepostas de nuvens, especialmente à medida que elas se afastam da posição zênite do observador. O índice apresentado aqui é uma média e não leva em conta a sobreposição das nuvens.

Os resultados obtidos a partir do cálculo ponderado para a estimativa da cobertura de nuvens está ilustrado na tab. 4.

Tabela 4. Resultado do cálculo do índice de cobertura para as observações sinópticas feitas pelos meteorologistas somente para o conjunto de análise.

Observação das camadas de nuvens										
arquivo	Camada 1			Camada 2			Camada 3			cobertura
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	Cobertura
02221200	2	7	120	7	0	750				0.5625
02221200	4	7	045	5	2	270	7	0	750	0.6667
02231200	1	7	090	3	5	150				0.25
02291200	3	7	075	6	2	300				0.375
02292100	2	7	100	6	2	210				0.5
03012100	5	5	075	4	2	300				0.5625
03021200	3	5	060	5	7	090	5	2	210	0.5417
03031200	3	7	090							0.375
03032100	3	7	090	7	0	900				0.625
03091200	5	7	090	6	5	105	7	0	900	0.75
03092100	1	7	060	5	5	120				0.375
03131200	3	7	110							0.375
03132100	5	7	105							0.625

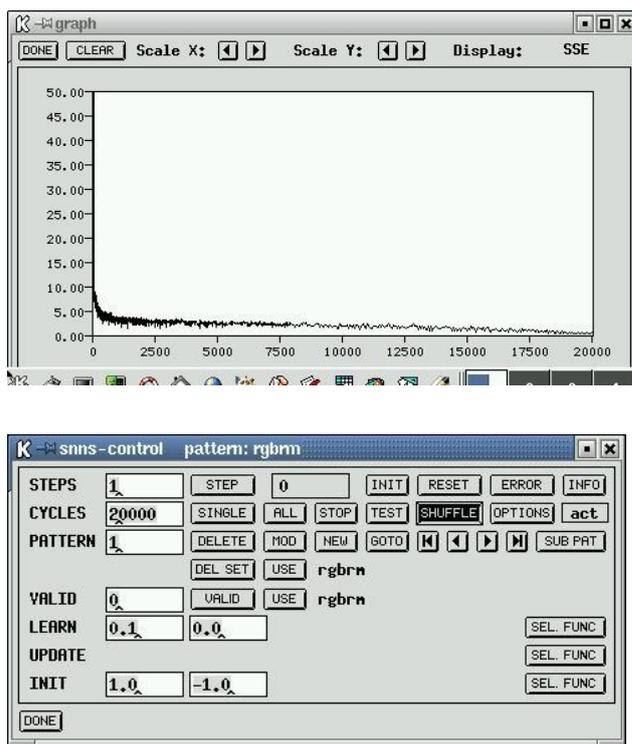
A estimativa de cobertura baseada no método anterior, esbarra no problema de profundidade óptica da nuvem. Isto é, nuvens com transparência maior ou menor estão sendo consideradas na mesma categoria. Isto pode causar um erro de avaliação da estimativa da cobertura, mas no presente trabalho serve apenas como um valor de referência.

## 6.4 Implementação da rede neural

A rede neural para a análise dos pixels foi implementada utilizando o aplicativo SNNS (<http://www-ra.informatik.uni-tuebingen.de/SNNS/>). Os conjuntos de treinamento foram gerados pelo aplicativo em Smalltalk. O SNNS fornece um ambiente integrado para configurar e gerar a rede neural. O programa utilizado foi executado em estações UNIX, apesar de existirem versões para LINUX e MS-WINDOWS. Uma

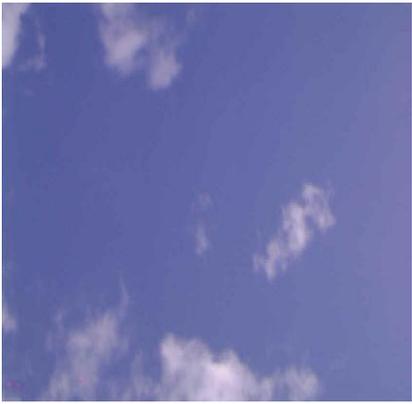
figura típica ilustrando os resultados de uma seção de geração de rede neural pode ser apreciada na fig. 15.

Figura 15. Gráfico ilustrando o erro e o menu de treinamento durante o treinamento da rede neural.



Para o conjunto de treinamento foram selecionadas algumas imagens que fossem representativas dos fenômenos que seriam observados. Para isto foram selecionadas algumas imagens representativas do conjunto de amostragem procurou-se selecionar imagens que apresentassem o céu azul limpo, o céu com nuvens e o céu nublado para horários diferentes do dia. Selecionou-se um conjunto de nove imagens na medida do possível em horários distintos de modo a representar várias luminosidades diferentes. Uma tabela com as imagens utilizadas como conjunto de treinamento pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5. Imagens do conjunto de treinamento utilizado.

céu – 0303-09:00 	céu – 0303-10:00 	céu – 0221-11:00 
céu + nuvens 0303-11:00 	céu + nuvens 0303-12:00 	céu + nuvens 0303-20:00 
nuvem 0223- 09:00 	nuvem 0223- 11:00 	nuvem 0221- 18:00 

Os dados solarimétricos meteorológicos e do cálculo do modelo atmosférico estão disponíveis para visualização no anexo D.

## **6.5 Conjunto de análise**

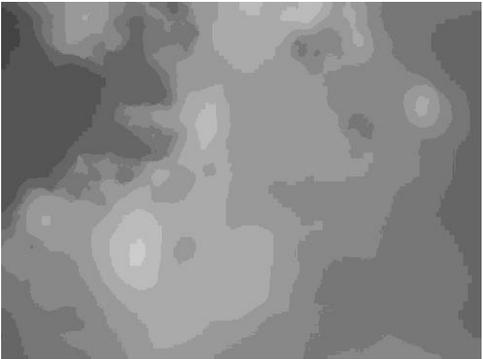
O conjunto de análise é o grupo de dados que será utilizado para avaliar a metodologia desenvolvida para a estimativa da cobertura efetiva de nuvens. O conjunto de análise ficou reduzido a treze imagens por que não havia uma grande coincidência de dados completos para se montar um conjunto maior. Os dados de satélite utilizados do conjunto de análise foram obtidos manualmente a partir do modelo de navegação existente no LABSOLAR. Assim como não foi possível utilizar as rotinas geradas pelo MAPLE V e as fornecidas pelo fabricante da câmera, as rotinas de navegação também não foram incorporadas ao aplicativo. As tabelas que descrevem os dados obtidos no conjunto de análise estão presentes no anexo E.

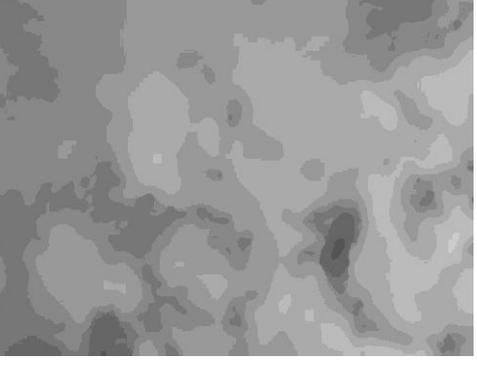
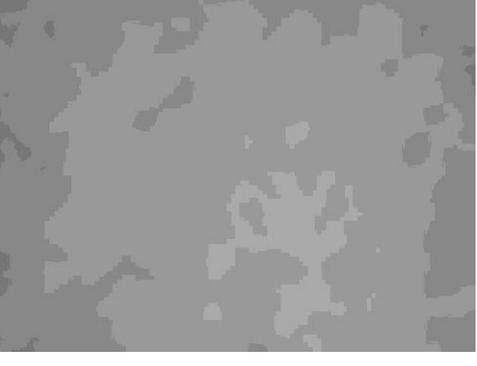
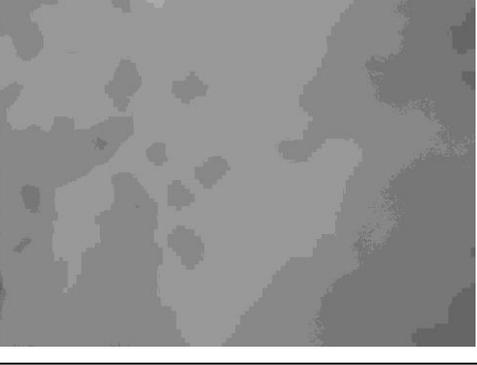
## 7 Resultados

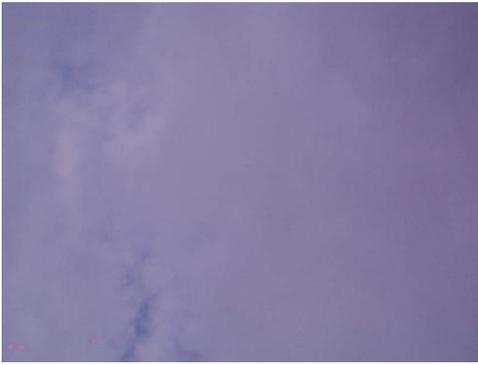
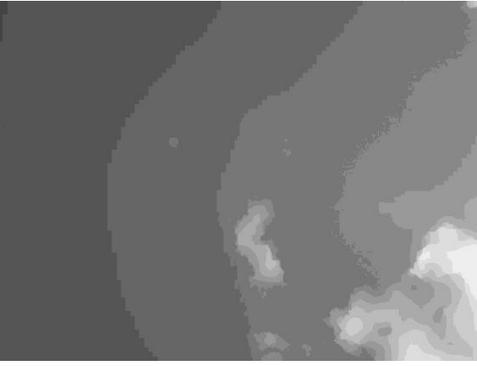
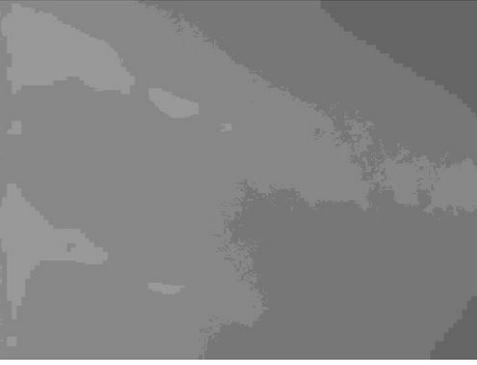
Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida podem ser visualizados na tab. 6.

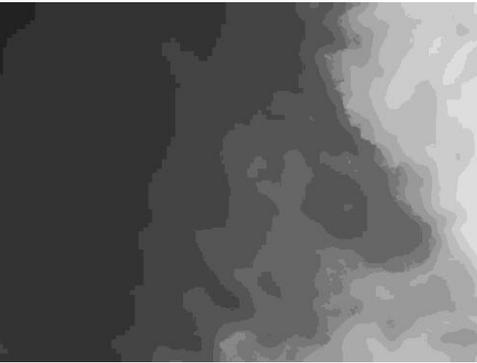
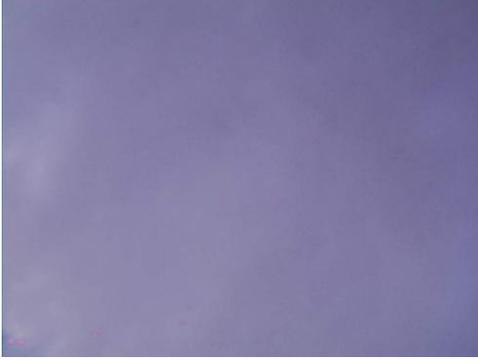
Na primeira coluna estão as fotos originais, na coluna da direita as fotos com aplicação do algoritmo de difusão anisotrópica e na terceira coluna os resultados. Na primeira coluna o **pseudônimo** é o nome dado ao arquivo da foto de superfície. Ele descreve os dados relativos ao mês, dia e hora GMT que a foto foi retirada no ano de 2000. Os resultados apresentados são os seguintes. **Pixel** é o valor da intensidade do pixel da imagem obtido a partir da imagem da imagem do satélite GOES. **Cobertura** é o valor da cobertura média obtida a partir das observações sinópticas. **CloudsRGB** é a porcentagem da cobertura de nuvens da imagem a partir da análise da rede neural utilizando os valores dos pixels no espaço RGB. **CloudsVAR** é a porcentagem da cobertura de nuvens da imagem a partir da análise da rede neural utilizando os valores dos pixels RGB mais uma matriz de variância (7x7) da vizinhança do pixel sendo analisado denominado. E por último vêm os dados de radiação medidos, normalizados com os valores calculados a partir a partir do modelo atmosférico. Onde **In** é a radiação direta normalizada, **Ig** a radiação global normalizada e **Id** a radiação difusa normalizada.

Tabela 6. Resultados obtidos a partir da aplicação da técnica desenvolvida.

Foto e pseudônimo	Foto	Resultados
02211200 – F1 		Pixel = 0.1133 Cobertura = 0.5625 CloudsRGB = 0.77 CloudsVAR = 0.963  In  = 0.00693  Ig  = 0.28323  Id  = 1.55138

<p>02221200 - F2</p> 		<p>Pixel = 0.2889  Cobertura = 0.6667  CloudsRBG = 0.964  CloudsVAR = 0.9935   In  = 0   Ig  = 0.22821   Id  = 1.24383</p>
<p>02231200 - F3</p> 		<p>Pixel = 0.164  Cobertura = 0.25  CloudsRBG = 0.919  CloudsVAR = 0.9835   In  = 0.25488   Ig  = 0.75753   Id  = 2.8501</p>
<p>02291200 - F4</p> 		<p>Pixel: 0.2148  Cobertura: 0.375  CloudsRBG: 0.996  CloudsVAR: 0.994   In  = 0.62442   Ig  = 0.89216   Id  = 1.73695</p>
<p>02292100 - F5</p> 		<p>Pixel = 0.0496  Cobertura = 0.5  CloudsRBG = 0.819  CloudsVAR = 0.932   In  = 0.12758   Ig  = 0.34722   Id  = 0.7611</p>

<p>03012100 - F6</p> 		<p>Pixel = 0.0469  Cobertura = 0.5625  CloudsRBG = 0.891  CloudsVAR = 0.9833   In  = 0.41412   Ig  = 0.8777   Id  = 1.70996</p>
<p>03021200 - F7</p> 		<p>Pixel = 0.2031  Cobertura = 0.5417  CloudsRBG = 0.985  CloudsVAR = 0.9933   In  = 0.75958   Ig  = 0.9637   Id  = 1.67839</p>
<p>03031200 - F8</p> 		<p>Pixel = 0.0977  Cobertura = 0.375  CloudsRBG = 0.35  CloudsVAR = 0.5868   In  = 0   Ig  = 0.16445   Id  = 0.8934</p>
<p>03032100 - F9</p> 		<p>Pixel = 0.0391  Cobertura = 0.625  CloudsRBG = 0.52  CloudsVAR = 0.6536   In  = 0   Ig  = 0.03788   Id  = 0.11186</p>

<p>03091200 - F10</p> 		<p>Pixel = 0.0625  Cobertura = 0.75  CloudsRBG = 0.255  CloudsVAR = 0.5197   In  = 0.00234   Ig  = 0.3181   Id  = 1.7449</p>
<p>03092100 - F11</p> 		<p>Pixel = 0.0469  Cobertura = 0.375  CloudsRBG = 0.892  CloudsVAR = 0.9676   In  = 0   Ig  = 0.13791   Id  = 0.3856</p>
<p>03131200 - F12</p> 		<p>Pixel = 0.0625  Cobertura = 0.375  CloudsRBG = 0.656  CloudsVAR = 0.9111   In  = 0   Ig  = 0.04452   Id  = 0.23529</p>
<p>03132100 - F13</p> 		<p>Pixel = 0.0508  Cobertura = 0.625  CloudsRBG = 0.868  CloudsVAR = 0.8901   In  = 0.00228   Ig  = 0.18478   Id  = 0.51873</p>

Uma observação importante acerca da normalização dos valores da radiação difusa, é que na tabela acima a radiação difusa normalizada chega a valores acima da unidade. A radiação difusa por muitas vezes pode subir a valores muito acima do calculado pelo modelo atmosférico. Isto ocorre por que a composição da atmosfera é variável e faz com que os valores subam acima do calculado, pela múltipla reflexão das nuvens próximas à localização do ponto de observação. Por este motivo para tais casos o programa automaticamente corrige estes valores para 1 somente para seja utilizado corretamente pela rede neural.

## 8 Análise dos resultados

Os dados obtidos a partir da análise do conjunto de treinamento possibilitam uma série de observações acerca dos resultados.

O ângulo de observação da câmera é muito limitado em relação ao total que pode ser observado, no entanto as técnicas utilizadas neste trabalho podem perfeitamente ser aplicadas para uma câmera do tipo “all sky” com lentes que permitem fotografar todo o hemisfério celeste. A análise das nuvens e a maior parte dos problemas encontrados serão os mesmos para os dois tipos de câmera, e podem ser considerados como uma análise preliminar para uma metodologia que utiliza recursos melhores.

Conforme esperado existe uma relação inversa entre o valor da cobertura efetiva de nuvens encontrada (valor da cobertura na tabela) e a medida do albedo (valor da intensidade do pixel na tabela). Isto ocorre por que a medida que a quantidade de nuvens aumenta, aumenta também a reflexão da luz solar resultando em um aumento nos valores de intensidade dos pixels observados pelo satélite. Os menores valores do albedo ocorrem com o céu claro e os maiores para o céu nublado. As comparações entre os valores de intensidade do pixel de uma imagem de satélite e os dados de cobertura e as fotos de uma câmera “all sky” serão similares

Não havia uma correlação muito boa entre a cobertura calculada pela observação sinóptica e os dados dos pixels de satélite. Por isto se conclui que a média utilizada para a cobertura da observação sinóptica não é muito boa.

Para uma análise dos resultados apresentados pela rede neural foi utilizada uma comparação de valores entre os pixels e a estimativa de cobertura determinada pelas redes implementadas. A primeira comparação será feita entre os pixels de satélite e a rede que utilizava os valores dos pixels RGB somente, doravante denominada de *primeira*. A segunda comparação será feita entre os pixels e os valores dos pixels RGB mais a variância com vizinhança de uma matriz 3x3, doravante denominada de *segunda*. A terceira comparação será feita entre os pixels e os valores dos pixels RGB mais a variância com vizinhança de uma matriz 7x7, doravante denominada de *terceira*. Uma

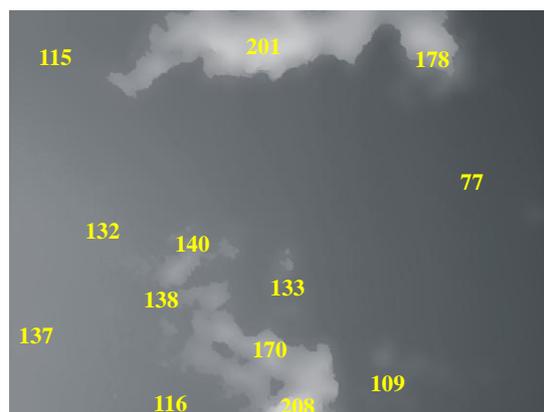
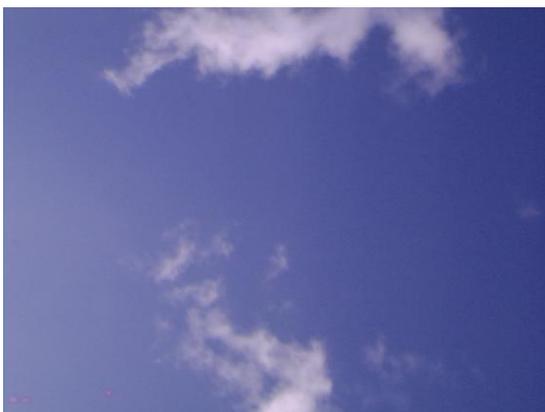
concordância boa entre os valores dos pixels e os resultados da primeira comparação. Alguns valores se apresentaram discrepantes, mas isto foi devido a um efeito local, aonde havia uma lacuna no meio das nuvens bem na posição zenital. Para o caso da foto 02211200 discrepante da tendência da análise, pode-se observar que o tempo estava mudando na ocasião da foto. Como a foto possui uma resolução espacial menor que a imagem de satélite houve esta discrepância localizada. A mesma discrepância foi notada para a segunda e a terceira rede neural. Isto vem a caracterizar um bom resultado, pois o método apresenta uma grande potencialidade no reconhecimento automático das nuvens.

Numa comparação entre as três redes, o que se pode observar é que a rede com matriz de variância 3x3 tende a apresentar uma cobertura do céu maior que a rede sem considerar a variância e a rede que utiliza a matriz de variância 7x7, apresenta um resultado de cobertura de nuvens maior ainda.

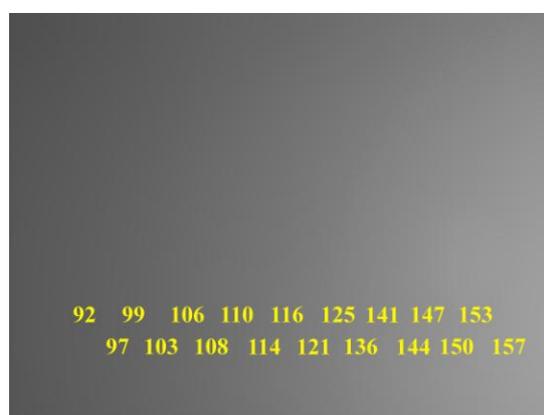
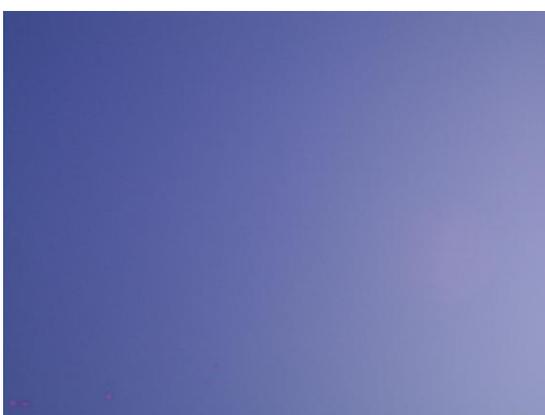
Aplicar simplesmente um mecanismo de segmentação e limiarização utilizando os valores dos pixels parece simples. Mas um problema surge quando observamos uma imagem com o sol nas proximidades do ângulo de visão da região que está sendo observada. A presença da turbidez na atmosfera faz com que o Sol apresente um halo difuso ao seu redor que fica tanto mais intenso quanto maior for a turbidez atmosférica. A turbidez forma no céu um gradiente de brilhância que vai desvanecendo a medida que se afasta do sol. Tal brilhância chega a produzir pixels que possuem valores próximos ou até maiores que o caracteriza o das nuvens de pequena profundidade óptica por estar nas proximidades do disco solar. 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. 16..

Figura 16. 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 à direita foram geradas a partir do filtro de difusão anisotrópica.

03032000



03131200



Somente através de um observador que se pode distinguir a diferença entre a brilhância por turbidez e as nuvens de pequena profundidade óptica. Na fig. 16 – 03131200 pode-se observar claramente que a imagem é de céu azul, mas a brilhância faz com que os pixels sejam interpretados como nuvens. Este problema é maior quando o Sol diminui o ângulo de elevação ou quando aumenta a turbidez atmosférica.

A presença da brilhância próxima ao Sol induz um erro no índice de cobertura das nuvens. Nuvens próximas do Sol tendem a ser mais brilhantes do 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.

Este problema precisa ser abordado de forma apropriada para ser minimizado. Uma sugestão para a solução seria aplicar outro pré-processamento na imagem através

de análise de Fourier ou Wavelets. Isto por que o céu apresenta uma textura diferente das nuvens. A solução para este problema é complexa, e foge ao escopo do presente trabalho. Mas uma análise preliminar simples pode ser implementada utilizando a variância ao redor do pixel que está sendo analisado. Regiões da imagem com nuvens possuem uma homogeneidade diferente das regiões com céu. A variância de uma região com pixels contendo céu, é menor que uma região com pixels de nuvens, mesmo com a brilhância presente na imagem. Para tentar contornar este problema, foram estabelecidas uma análise das regiões com variância e matriz de vizinhança distinta. Foram definidas variâncias com matrizes de vizinhança 3x3, e 7x7 pixels ao redor de um pixel central (por isto os índices das matrizes são ímpares). Com isto tentou-se obter um indicativo de textura para ser analisado junto com a rede neural. Mas os resultados não foram conclusivos e a abordagem do problema precisa de uma análise mais profunda. A presença da brilhância causa um problema de classificação na presença de nuvens com pequena profundidade óptica por apresentarem similaridades de pixel muito próximos. Esta similaridade causa problemas de interpretação por parte da rede neural. Isto por que a rede neural não faz distinção entre os dois e interpreta como nuvem o céu brilhante, quando são consideradas nuvens tênues de pequena profundidade óptica em seu conjunto de treinamento.

A difusão anisotrópica se mostrou uma ferramenta excelente para a segmentação das nuvens e na determinação da fronteira entre o céu e a nuvem. Por natureza, as nuvens possuem uma borda difusa que vai se desvanecendo à medida que termina o seu limite. A difusão anisotrópica permite que se segmente uma região da imagem, determinando gradientes de variação de luminosidade através da homogeneização das regiões. Isto vem de encontro a uma das constatações deste trabalho. Ao invés de uma resposta binária acerca da cobertura das nuvens, talvez seja melhor utilizar uma média de transparência com uma escala, aonde um céu completamente coberto ocupe um extremo da escala e um céu limpo ocupe o outro extremo. Mas para que isto seja viabilizado é necessário primeiro evitar os problemas causados pela presença da brilhância.

A imagem de satélite apresenta um pixel que dá um indicativo do albedo terrestre na região. O albedo varia de acordo com as condições atmosféricas, ângulo de elevação

solar, cobertura de nuvens etc. A presença de nuvens aumenta o albedo. Um estudo simultâneo da luminosidade da superfície e da imagem de satélite poderia ser feito para estabelecer uma relação entre os dois na presença das nuvens. Neste estudo seria determinado qual o mínimo incremento de albedo seria possível determinar com a presença das nuvens em observação, para tentar determinar qual a sensibilidade do pixel em relação à presença das nuvens. Isto demandaria um experimento de longa duração com uma grande quantidade de dados.

Uma sugestão para a comparação entre os dados da intensidade dos pixels de satélite com fotos obtidas a partir da superfície seja um índice de transparência obtido a partir da superfície. A determinação de tal índice teria que ser obtido a partir de um estudo mais detalhado, e fica como sugestão para trabalhos futuros.

## 9 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para melhoria do trabalho de modelamento e análise, uma serie de sugestões podem ser implementadas.

A utilização de uma câmera “all sky” para avaliar melhor a cobertura de nuvens e reduzir problemas com a resolução espacial das nuvens.

Aumentar a quantidade de conjuntos de treinamento supervisionados para os vários casos de luminosidade com horários diferentes, na presença de diferentes tipos de nuvens. Selecionar no banco de imagens dados representativos dos casos que se deseja classificar em diversas situações de luminosidade. Efetuar um longo período de amostragem com sistema automático de coleta de imagens, de grande capacidade de armazenamento.

Análise de sensibilidade da variação dos parâmetros da rede neural e do filtro anisotrópico aplicado a interpretação das imagens das nuvens.

Estabelecer níveis de intensidade diferentes dos resultados (diferentes profundidades ópticas), ao invés de tentar obter um resultado binário, ou seja se o pixel é nuvem ou não. Isto poderia ser tentado com redes neurais com mais saídas, cada uma indicando uma intensidade de nuvem.

Determinação da melhor metodologia de implementação de filtragem anisotrópica nas nuvens (translação de espaço vetorial, funções de Green, equações diferenciais etc.)

Utilização de mecanismo de sombreamento para ser utilizado na câmera, para que sejam tomadas fotos em horários sinóticos com ângulo de elevação mais altos.

O estudo de um modelo de iluminação apropriado do Sol aplicado para a análise das nuvens. O modelo consideraria um modelo de reflexão internuvens, o fator de forma das nuvens, orientação e obstrução do campo de visada da câmera na superfície.

## 10 Conclusão

Estabelecer simplesmente uma metodologia para classificar uma foto do céu com pixels contendo céu ou nuvem não parece uma abordagem muito apropriada. No céu existem outros fenômenos originados pela interação da luz do Sol com os elementos que compõem a atmosfera que serão forçosamente encaixados numa das duas categorias apresentando resultados insatisfatórios. O uso da rede neural para classificar os pixels de forma binária mostrou uma certa sensibilidade ao tipo de pixel que compõe o conjunto de treinamento escolhido na presença destes outros elementos.

Quando se tenta selecionar os pixels para compor o conjunto de treinamento da rede neural, deve-se levar em consideração se são escolhidos pixels que representam nuvens de maior ou menor profundidade óptica. Se durante o treinamento forem selecionados pixels que representam nuvens de pequena profundidade óptica (nuvens tênues), a rede neural interpreta a brilhância do céu causada pela turbidez atmosférica ou até o pelo espalhamento Mie como se fosse uma nuvem. Neste caso a rede neural apresenta um resultado final que é uma cobertura de nuvens maior do que a real, pois a rede soma ao conjunto composto pelas nuvens os pixels que representam o espalhamento.

Por outro lado se escolhermos pixels que representam nuvens com maior profundidade óptica, deixa-se para a rede neural a decisão de interpretar se o pixel sendo analisado é nuvem ou não. Neste caso a rede neural faria uma interpretação supostamente linear dos pixels que representam nuvens com profundidade óptica intermediárias.

Uma provável solução para o problema seria a inclusão de mais categorias de saída da rede neural. Uma sugestão para uma possível classificação seria, por exemplo pixels representando as seguintes categorias: Nuvens com diversas profundidades ópticas, brilhância, espalhamento Mie e espalhamento Rayleigh. Agregado a isto poderia ser feito algoritmos de segmentação separando a imagem em regiões de acordo com as categorias estabelecidas.

Para implementar tal rede seria necessário uma grande base de dados de entrada com amostras representativas de todas as categorias possíveis com suas variações (fundo azul ou com nuvens). Para isto seriam necessários um longo período de amostragem com o céu em diferentes condições atmosféricas, para que o conjunto de treinamento seja bem representativo do que se deseja observar. A utilização de uma câmera com lentes de visualização do tipo “all sky” para uma observação de todo o hemisfério celeste seria ideal para a análise de todo o céu. Para isto seria necessário um mecanismo de sombreamento na lente para não danificar a câmera por exposição direta aos raios solares.

Uma decisão importante envolvida no processo seria de qual elemento físico atmosférico deve ser utilizado como parâmetro de entrada da rede neural, ou seja uma análise de sensibilidade de parâmetros. No presente trabalho o que pode ser notado é que a temperatura, umidade e pressão atmosférica já são levadas em consideração nas equações que envolvem os cálculos da radiação solar no modelo atmosférico (modelo paramétrico C). Teoricamente o ângulo zenital (elevação solar) também é considerado, mas a sua inclusão como parâmetro de entrada da rede neural seria de grande utilidade; por que certos fenômenos são mais acentuados em certos ângulos de elevação. Por exemplo, o espalhamento Mie e a brilhância do céu por causa da turbidez são mais acentuados com valores do ângulo zenital maiores.

Um último detalhe acerca da observação da superfície seria a determinação de um modelo de iluminação para o Sol, para isto seriam utilizados os dados de superfície. Neste caso seria necessário tentar relacionar o fator de forma das nuvens com a radiação na direção do Sol utilizando a radiação direta.

Para a validação utilizando imagens de satélites seria necessário avaliar um modelo de iluminação para a observação da superfície, levando em consideração fatores geométricos de observação do satélite como a órbita ocupada, ângulo de elevação solar etc.. Os dados de superfície neste caso poderiam ser utilizados para dar uma indicação mais precisa do caminho percorrido pela radiação solar até o satélite.

O conjunto de técnicas de análise desenvolvidos no presente trabalho é um passo adiante no processo de detecção de nuvens a partir de observações automáticas

realizadas em estações de superfície. Considerando o que foi desenvolvido até o momento no âmbito da metodologia para determinação da cobertura de nuvens, a apresentação de um modelo completo se mostra muito além do que foi proposto no presente trabalho. Algumas das técnicas que foram originalmente sugeridas para a solução do problema, se mostraram mais difíceis de se implementar do que esperado. Tal dificuldade se deve ao fato de ter ocorrido alguns problemas técnicos inesperados no decorrer do presente trabalho.

Mas apesar das dificuldades, foi desenvolvido um protótipo para a determinação da estimativa da cobertura de nuvens. Conforme estabelecido, foram efetuadas também uma coleta geral de fotos, dados meteorológicos, solarimétricos e imagens de satélite que foram utilizados para a avaliação da técnica proposta. Foi implementado um modelo matemático atmosférico, técnicas de pré-processamento de imagens e utilizadas redes neurais para a avaliação da técnica proposta.

Em seguida foi feita uma análise dos resultados obtidos diante das circunstâncias de solução do problema inicialmente idealizado. Depois foram descritas as limitações do trabalho apresentado e formas de solução dos problemas encontrados.

E finalmente, foram feitas uma série de sugestões para contornar as dificuldades técnicas descobertas no desenvolvimento da metodologia sugerida e como aumentar a confiabilidade dos resultados.

O trabalho desenvolvido na presente dissertação serviu como passo intermediário para a solução de um problema mais complexo cumprindo com os objetivos propostos, levantando caminhos alternativos para um levantamento um pouco mais precisa para a determinação automática da cobertura efetiva de nuvens.

## 11 Glossário

Albedo: Taxa de energia espalhada pela incidência da luz solar.

Antropogênicos: fatores resultantes da atividade humana.

1AU: (Astronomical Unit ) Distância média entre o Sol e a Terra

BRAZILSR: Modelo atmosférico desenvolvido no âmbito do convênio entre o LABSOLAR, INPE e o Instituto Geofísico e Meteorológico de Colônia.

BSRN: Baseline Surface Radiation Network (Rede de Estações Radiométricas ao Nível da Superfície).

CYCLOPS: Projeto desenvolvido no Laboratório de Visão Computacional do Departamento de Informática e Estatística da Universidade Federal de Santa Catarina.

DPV: Departamento de Proteção ao Vôo do Ministério da Aeronáutica localizado no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis SC.

DWD: Serviço Meteorológico Alemão

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IR: Porção do espectro da radiação solar de infra vermelha.

Irradiação: Taxa de energia solar incidente em uma superfície por unidade de área.

LABSOLAR: Laboratório de Energia Solar, do Departamento de Energia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

LW (Long Wave) Porção do espectro da radiação solar de onda longa

SNNS: Stuttgart Neural Network System

SW (Short wave) Porção do espectro da radiação solar de ondas curtas

Radiação direta: Radiação vinda do Sol sem ter sofrido espalhamento pela atmosfera.

Radiação difusa: Radiação vinda do Sol depois de ter sido espalhada na atmosfera.

Turbidez: Espalhamento da radiação solar causado por todos os fatores (aerossóis), exceto pelo ar seco, em conjunto.

VIS: Porção do espectro da radiação solar correspondente à luz visível.

WMO: World Meteorological Organization (Organização Mundial de Meteorologia)

WRC: World Radiometric Center (Centro Radiométrico Mundial)

WRMC: World Radiation Monitoring Center (Centro Mundial para a Monitoração da Radiação)

## 12 Referências Bibliográficas

- ABREU, S. L. de; PEREIRA, E. B.; COLLE, S. e COUTO, P., "Validação de um Modelo de Estimção da Radiação Solar Incidente na Superfície Utilizando Imagens de Satélite", COBEM-CIDIM/95 - XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Íbero Americano de Engenharia Mecânica, 12 a 15 de Dezembro de 1995.
- Almeida W. G.. Avaliação de um modelo físico estimador de irradiância solar baseado em satélites geostacionários. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade federal de Santa Catarina 1998.140 p.
- Colle S., Abreu S. L., Rüther R. Uncertainty in Economical Analisys of Solar Water Heating and Photovoltaic Systems. In: International Solar Energy Society Congress, Jerusalem 1999. Proceedings ISES International Solar Energy Society 1999 Solar World Congress 1999 p. 1227-1235.
- Colle S., Pereira E. B., Raschke E., Stuhlman R., Abreu S. L., Couto P., Mantelli S.. Distribution of Solar Irradiation in Brazil Derived From Geostationary Satellite Data. In: ISES International Solar Energy Society Congress, Jerusalem 1999. Proceedings ISES – International Solar Energy Congress
- 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.
- Foley, D. J., van Dam, A., Feiner, S. K., Hughes, J. F., Computer Graphics Principles and Practice. 2<sup>nd</sup> ed. Addison-Wesley Publishing Company 1996. 1174 p..
- Harrisson 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

- Heal K. M. , Hansen M. L., Richard K. M., Maple V Learning Guide. Springer 1996. 274 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.
- Hopkins, T. Horan, B. Smalltalk. An introduction to application development using visualworks. Prentice Hall 1995 408 p.
- Hoyt D. V. Interannual cloud-cover variations in the contiguous United States. Journal of Applied Meteorology vol. 17 p. 354-357 1978.
- Colle, S., Pereira E. B. Atlas de Irradiação Solar do Brasil. 1998. Editada por INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis SC 1998, 67 p..
- Iqbal, M. Introduction to Solar Radiation. Academic Press, 1983. 390 p.
- Kreyszig, E. Advanced Engineering Mathematics, 2<sup>nd</sup> 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.
- Monagan M. B. , Geddes K. O., Heal K. M., Labahm G. , Vorkoetter S., Maple V Programming Guide. Springer 1996. 379 p..
- Object Share Inc. VisualWorks Application Developer's Guide 1998. 568 p.
- PIXERA Visual Communication Suíte. User's Manual. 1998. 151 p.
- Raschke E., Preus H. J.. The determination of the solar radiation budget at theEarth's surface from satellite measurements, Meteor. Rundsch., 32, 18-28, 1979.

- Rossow W. B. . Clouds. Atlas of satellite observations related to Global change. International Satellite Cloud Climatology Project ISCCP, 1982. p.141-162
- Sharp, A. Smalltalk by example. The developer's Guide. McGraw-Hill 1997 359 p.
- 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.
- Witte, R. S. Statistics 2<sup>nd</sup> ed. Holt, Rinehart and Winston 1985. 394 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



## **Anexo A.1 – Tabelas de todos os dados diários coletados das nuvens.**

As tabelas deste anexo descrevem os arquivos das fotos acrescidos dos dados de radiação solar e meteorológicos medidos na estação do LABSOLAR. Os valores em cinza claro são dados extrapolados entre duas observações consecutivas. A extrapolação foi baseada no fato de que a composição das nuvens no céu não variou significativamente entre duas observações consecutivas. Os períodos de observação são de meia hora e o período de retirada das fotos é de 15 minutos. Basicamente não se está interessado na quantidade de nuvens e sim o tipo de nuvens presente durante a observação, Mesmo que a quantidade varie, o tipo de nuvem permanece o mesmo. Foi confeccionada uma tabela para cada dia de coleta de dados.

Legenda para as tabelas deste anexo.

QTI: É a quantidade de nuvens em oitavas.

TIP: É o tipo de nuvem observada

ALT: É a altitude aproximada da nuvem em decâmetros.

GLO: Radiação global medida

DIR: Radiação direta medida

DIF: Radiação difusa medida

OL: onda longa medida

UMI: Umidade relativa medida

PRE: Pressão atmosférica medida

TBU: Temperatura de Bulbo úmido medida

TBS: Temperatura de Bulbo seco medida.

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
02171100	3	5	090	5	5	150														
02171115	3	5	090		5	150														
02171130	3	5	090	6	5	150														
02171200	4	7	090	6	5	150														
02171215		7	090																	
-----	3	7	090	5	5	150														
02171245		7	090																	
02171300	3	7	090	4	2	210														
02171845		7	090																	
02171900	4	7	090																	
02172000	5	7	090																	
02172015	5	7	090																	
02172030																				
02172045																				



02181130	4	7	105																
02181200	4	7	105																
02181215		7	105																
---	4	7	105																
02181245		7	105																
02181300	4	7	105																
02182000	3	5	100																
02182015	3	5	100																
02182030																			
02182045																			
02182100																			
02182115																			
02182130																			
02182145																			
02182200																			

	Dados sobre as nuvens	Radiação Solar	Dados meteorológicos
--	-----------------------	----------------	----------------------

Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4											
	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS										
02210845																					
02210900	3	7	090										0	0	0	462	89.5	1015.8	20.55	21.97	
02210915		7	090										7	1	7	473	86.3	1015.9	20.55	21.57	
02210930	2	7	090	4	0	750							21	1	21	474	89.5	1016	20.34	21.16	
02210945		7	090		0	750							79	335	37	473	92.9	1015.8	20.75	21.97	
02211000	3	7	090	6	0	750							133	462	49	477	88	1015.8	20.75	21.77	
02211100	1	7	090	5	5	135	7	0	750				365	721	62	498	75.9	1051.7	20.97	24.46	
02211115																					
02211130	2	7	120	7	0	750							69.82	84	100	504	78.7	1015.9	20.76	23.83	
02211145	2	7	120	7	0	750							529	670	116	487	77.5	1015.9	21.99	24.25	
02211200	2	7	120	7	0	750							179	6	157	481	77.8	1015.8	21.78	24.66	
02211215		7	120										480	383	196	483	73.4	1015.8	21.98	24.25	
-----	2	7	120	7	0	750															
02211245		7	120										218	24	167	480	74.8	1015.8	21.99	24.87	
02211300	2	7	120	3	2	300	7	0	750				308	69	202	483	79	1015.8	21.58	24.66	

02211700	2	7	090	5	2	300	7	0	750				313	-3	271	488	59.28	1014	20.98	26.54	
02211715								0	750				324	-1	288	483	60.58	1013.9	21.39	27.36	
02211730	2	7	060	5	2	270	7	0	750				487	27	393	491	55.51	1013.8	20.99	27.36	
02211745	2	7	060					0	750				459	11	386	493	56.17	1013.8	21.2	27.38	
02211800	2	7	060	5	2	270	7	0	750				504	53	392	499	54.27	1013.6	20.77	27.15	
02211815	2	7	060					0	750				298	-2	266	495	54.09	1013.5	20.77	27.36	
02211830	2	7	060	5	2	270	7	0	750				262	-2	229	491	58.01	1013.5	21.17	26.94	
02211845	2	7	060					0	750				138	-2	122	483	61.73	1013.3	20.56	26.31	
02211900	2	7	060	5	2	270	7	0	750				133	0	120	476	65.78	1013.2	20.98	26.32	
02212000	2	7	060	5	2	270	7	0	750				107	0	94	469	73.7	1012.9	21.8	25.5	
02212015	2	7	060	5	2	270	7	0	750				70	0	62	468	72.2	1012.8	21.79	25.49	
02212030																					

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos					
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4												
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS		

02220845													0	1	0	449	90	1013.4	22.23	24.08
02220900	5	7	045	6	2	270	7	0	750				0	0	0	449	88.3	1013.5	22.43	23.66
02220915	5	7	045	6	2	270	7	0	750				-1	0	-1	448	91.5	1013.6	22.01	23.24
02220930	5	7	045	6	2	270	7	0	750				3	1	3	441	93.2	1013.6	22	22.6
02220945		7	045	6	2	270	7	0	750				12	2	11	440	91.5	1013.7	22.4	23.22
02221000	4	7	045	6	2	270	7	0	750				50	2	44	453	89.9	1013.7	22.4	23.63
02221100	3	7	045	5	2	270	7	0	750				109	0	97	458	93.2	1014.1	23.22	24.04
02221115		7	045	5	2	270	7	0	750				37	0	32	451	86.9	1014.2	22.81	24.04
02221130	4	7	045	5	2	270	7	0	750				113	1	100	455	86.9	1014.3	22.81	24.45
02221200	4	7	045	5	2	270	7	0	750				144	0	126	455	86.9	1014.4	22.4	24.25
02221215	4	7	045	5	2	270	7	0	750				126	0	109	455	88.4	1014.6	22.81	24.66
-----	4	7	045	5	2	270	7	0	750											
02221245	4	7	045	5	2	270	7	0	750				99	0	87	461	85.3	1014.9	22.81	24.46
02221300	4	7	045	5	2	270	7	0	750				124	0	109	458	86.8	1015	22.6	24.46

Foto	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
-----	7	5	090																	
02230845													0	1	0	456	103.7	1012.5	21.78	22.18
02230900	5	5	090										0	1	0	430	107.4	1012.9	21.58	21.16
02230915		5	090										1	2	1	429	101.9	1013.1	22.19	21.77
02230930	4	5	090										3	2	3	431	96.6	1013.5	22.19	21.98
02230945													5	2	4	434	98.3	1013.7	21.99	22.8
02231000	1	7	090	4	5	120							18	0	16	438	103.7	1013.7	22.39	22.18
02231100	1	7	090	3	5	150							137	3	118	439	96.5	1013.8	22.19	22.6
02231115	1	7	090	3	5	150							152	4	137	441	84.9	1013.7	21.57	22.6
02231130	1	7	090	3	5	150							231	4	203	450	83.3	1013.4	21.17	22.81
02231200	1	7	090	3	5	150							478	222	289	454	77.2	1013.4	21.37	23.42
02231215													619	342	323	459	74.7	1013.2	21.98	24.25
-----	1	7	090	3	2	210														
02231245	1	7	090	3	2	210							600	627	101	501	68.77	1012.7	22.81	27.14
02231300	1	7	090	3	2	210							848	836	178	501	71.4	1012.7	22.4	27.13

02231715													282	39	197	541	60.11	1010.1	24.25	30.03
02231730	5	5	030	3	7	090	1	9	120	5	2	270	826	641	197	524	54.15	1009.9	24.66	30.86
02231745	1	5	030	3	7	090	5	2	270				951	773	234	524	60.39	1009.8	25.07	31.27
02231800	1	5	030	3	7	090	5	2	270				896	789	217	533	58.11	1009.4	24.66	31.47
02231815	1	5	030	3	7	090	5	2	270				814	773	196	535	60.14	1009.3	24.46	30.86
02231830	1	5	030	3	7	090	5	2	270				714	710	194	538	60.89	1009.3	24.66	30.66
02231900	1	5	030	3	7	090	5	2	270				264	18	206	519	65.36	1009	23.84	28.79
02232000	3	7	090	3	2	270							32	-3	31	486	78.7	1010.6	22.61	25.28
02232015	3	7	090	3	2	270							15	-2	12	458	83.4	1010.6	21.37	23.63

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
02241800	3	7	120										883	731	212	505	67.08	1010.4	23.47	28.01
02241815	3	7	120										328	3	280	510	63.03	1010.4	23.05	26.98
02241830	3	7	120										371	62	272	507	60.95	1010.2	23.26	28.62

02241845																				
02241900	2	5	120	4	0	700							439	713	77	521	67.03	1004.5	23.84	27.97
02242000	2	5	120	4	0	700							208	129	121	520	64.85	1010	21.81	27.17
02242015	2	5	120	4	0	700							210	65	162	502	55.56	1010.1	21.41	27.99
02242030																				
02242045																				
02242100																				
02242130																				
02242145																				
02242200																				

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DI R	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
02250845																				

02250900	4	0	600										0	1	0	464	102	1010.8	19.56	19.76
02250915													2	1	2	463	96.4	1010.8	19.97	20.37
02250930	3	2	360	5	0	600							11	0	10	463	98.2	1010.9	20.16	20.16
02250945													19	3	17	463	98.2	1010.9	19.76	20.16
02251000	1	7	120	3	2	360	5	0	600				41	26	32	461	100.1	1011	19.97	19.96
02251100	1	7	120	3	2	360	4	0	600				292	526	69	493	83.5	1011.5	21.18	23.44
02251115													384	645	80	496	78.9	1011.7	21.8	24.28
02251845													515	414	184	512	55.17	1011.4	22.44	29.86
02251900	4	5	120	6	0	600							601	720	159	521	50.15	1011.2	21	29.03
02252000	4	5	120	6	0	600							319	358	178	526	56.53	1011.1	21.6	27.18
02252015	4	5	120	6	0	600							141	25	117	516	58.24	1011.1	20.8	27.18
02252030																				
02252045																				
02252100																				
02252115																				
02252130																				
02252145																				
02252200																				

Foto	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos					
	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4			GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS		
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT										
02280845																						
02280900	2	5	060	7	0	750							1	1	1	443	93.3	1014.6	23.86	24.48		
02280915	2	5	060	7	0	750							4	0	4	451	93.4	1014.8	23.67	24.69		
02280930	2	5	075	7	0	750							16	1	14	451	98.3	1014.9	23.88	24.29		
02280945													45	2	39	452	88.7	1015.1	23.68	24.5		
02281000	1	7	075	6	0	750							73	2	63	457	93.3	1015.2	23.68	24.91		
02281100	1	7	075	6	0	750							122	1	108	466	88.7	1015.8	24.49	25.73		
02281115		7	075	6	0	750							124	0	110	469	88.7	1015.8	24.7	25.73		
02281130	2	7	075	6	0	750							168	0	149	470	87.2	1015.9	24.9	26.35		
02281145	2	7	075	6	0	750							199	0	179	471	87.3	1015.7	24.5	26.36		
02281200	2	7	075	6	0	750							233	0	208	474	85.9	1015.8	24.3	26.15		
02281215	2	7	075	6	0	750							248	-1	221	476	87.2	1015.8	24.49	26.96		

02281230	2	7	075	6	0	750							214	0	191	474	80.2	1015.9	24.5	26.97	
02281245		7	075	6	0	750							181	0	160	473	80.2	1016	24.5	26.76	
02281300	3	7	075	6	0	750							191	-1	170	478	82.9	1016	24.08	26.55	
02281745		7			0								451	38	344	479	69.63	1014	24.49	28.21	
02281800	3	7	090	7	0	750							387	4	332	484	70.5	1013.9	23.45	28.18	
02281815		7											306	3	265	484	69.53	1013.8	23.86	27.78	
02281830	2	7	090	3	2	300	7	0	750				284	2	245	485	70.8	1013.5	24.26	27.98	
02281845	2	7	090	3	2	300	7	0	750				357	33	278	486	72.3	1013.4	23.46	27.78	
02281900	2	7	090	5	2	300	7	0	750				322	5	288	484	68.69	1013.3	23.65	28.59	
02282000	5	5	075	7	0	750							53	0	48	473	78.6	1013.2	23.84	26.72	
02282015	5	5	075	7	0	750							20	-1	18	471	84.2	1013.1	24.04	26.51	
02282030																					
02282045																					

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
02290845																				
02290900	3	5	100	5	2	300	6	0	600				0	0	0	484	93.3	1013.8	22.83	24.06
02290915													8	0	7	483	93.2	1013.8	22.83	24.26
02290930	1	7	090	6	2	300	3	0	600				25	1	22	482	93.3	1013.9	22.83	23.65
02290945	1	7	090	6	2	300	3	0	600				47	55	37	483	95	1013.7	23.84	24.26
02291000	1	7	090	6	2	300	2	0	600				129	410	45	485	88.6	1013.7	23.85	24.47
02291100	2	7	075	6	2	300	3	0	600				406	621	125	495	81.3	1013.9	23.86	26.13
02291115													297	255	143	500	77.1	1013.9	23.67	26.97
02291130	2	7	075	6	2	300							509	781	95	507	75.8	1014.1	23.25	26.75
02291145	2	7	075	6	2	300							653	810	169	499	73.3	1014.2	23.45	28.18
02291200	3	7	075	6	2	300							546	537	173	515	64.83	1014.3	23.85	27.78
02291215	3	7	075	6	2	300							689	851	121	520	66.99	1014.5	23.87	28.81
02291230	3	7	090	6	2	300							753	832	142	512	68.42	1014.5	23.05	27.99

02291245	3	7	090	6	2	300								894	889	210	499	69.7	1014.4	24.07	28.4	
02291300	4	7	090	6	2	300								908	894	193	516	66.18	1014.5	24.47	29.84	
02292000	2	7	100	6	2	210								365	710	82	526	67.16	1012.3	23.03	29	
02292015	2	7	100	6	2	210								334	663	101	522	68.37	1012.3	22.62	28.59	
02292030																						
02292045																						
02292100																						
02292115																						
02292130																						
02292145																						

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
03010845																				
03010900	5	5	100	7	2	300							1	1	1	466	93.3	1012.9	23.23	24.25

03010915	5	5	100	7	2	300							14	1	13	466	93.3	1013	23.84	24.26
03010930	7	5	100	7	2	300							36	1	32	480	90.2	1013.1	23.44	24.26
03010945	7	5	100	7	2	300							85	35	64	479	93.3	1013.3	23.65	24.47
03011000	6	5	090	7	2	300							104	62	77	484	88.7	1013.4	23.85	25.09
03011100	6	5	090	7	2	300							240	276	115	501	87.2	1014	24.06	25.71
03011115	6	5	090	7	2	300							517	597	196	486	85.8	1014.1	24.07	26.74
03011130	6	5	090	7	2	300							474	517	173	503	82.9	1014.3	23.65	25.92
03011145	6	5	090	7	2	300							430	187	281	489	77.4	1014.3	24.26	26.54
03011200	5	5	090	6	2	300							349	157	214	502	81.4	1014.4	24.87	27.76
03011215	5	5	090	6	2	300							293	109	194	507	81.4	1014.5	24.27	27.37
03011230	6	5	090	6	2	300							748	558	304	484	76.1	1014.6	24.06	27.57
03011245	6	5	090	6	2	300							679	711	155	510	72.4	1014.7	24.05	27.97
03011300	6	5	090	6	2	300							753	668	189	505	71.3	1014.8	24.06	28.59
03012000	5	5	075	4	2	300							327	504	123	518	63.67	1011.6	23.84	29.41
03012015	5	5	075	4	2	300							278	386	131	510	64.1	1011.6	24.25	29.41
03012030																				
03012045																				
03012100																				



03021145	3	5	060	5	7	090	5	2	210				615	682	201	493	77.6	1014.1	25.49	29.21
03021200	3	5	060	5	7	090	5	2	210				586	654	167	507	69.87	1014.3	24.87	28.38
03021215	3	5	060	5	7	090	5	2	210				629	704	150	516	75	1014.4	24.88	27.99
03021230	3	5	060	5	7	090	5	2	210				724	726	195	518	76.3	1014.5	24.67	28.59
03021245													840	596	338	501	74.2	1014.6	25.28	29.21
03021300	5	7	075	5	2	210							530	92	386	517	72.8	1014.6	25.28	29.2
03022000	4	7	075	5	2	300							367	504	163	522	68.45	1009.9	25.9	29.83
03022015	4	7	075	5	2	300							196	207	116	520	72.8	1009.9	25.09	29.62
03022030																				
03022045																				
03022100																				
03022115																				
03022130																				
03022145																				
03022200																				

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos			
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4										
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS
03030845																				
03030900	4	7	075										0	1	0	440	98.3	1012.7	23.01	23.21
03030915	4	7	075										1	1	1	438	91.6	1012.6	23.02	23.22
03030930	4	7	075										5	1	4	440	100	1012.5	22.81	22.81
03030945		7	075										10	1	9	441	98.3	1012.3	22.81	22.81
03031000	3	7	075										21	2	18	440	100	1012.3	22.81	23.21
03031100	3	7	075										120	1	106	442	94.9	1012.7	22.62	23.64
03031115		7	075										127	3	112	443	91.7	1012.9	23.23	24.26
03031130	3	7	090										124	1	110	444	90	1013.1	22.63	24.47
03031145	3	7	090										115	1	102	448	85.4	1013.1	23.24	24.26
03031200	3	7	090										99	0	88	451	90.1	1013.1	23.64	24.46
03031215	3	7	090										88	0	78	454	96.6	1013.1	23.64	24.06
03031230	3	7	090										130	0	115	454	96.6	1013.3	23.65	24.89

03031245	3	7	090											163	0	145	453	88.6	1013.3	22.83	24.07	
03031300	3	7	090											179	0	160	450	91.7	1013.2	23.45	24.48	
03032000	3	7	090	7	0	900								72	0	63	478	77.5	1008.8	24.05	26.93	
03032015	3	7	090	7	0	900								69	-2	62	477	78.5	1008.9	24.04	26.72	
03032030																						
03032045																						
03032100																						
03032115																						
03032130																						
03032145																						
03032200																						

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos				
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4											
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS	
	3	7	090	6	0	900							0	1	0	414	96.5	1010.8	20.15	20.34	
03090915	3	7	090	6	0	900							2	1	2	418	102	1010.9	20.34	19.92	

03090930	3	7	090	6	0	900							7	1	6	414	100.1	1011	20.34	19.51
03090945	3	7	090	6	0	900							21	1	19	417	103.9	1011.1	20.35	19.93
03091000	3	7	090	6	0	900							31	2	28	416	98.3	1011.1	20.34	19.93
03091100	4	7	090	5	5	105	7	0	900				110	2	100	422	89.4	1011.6	19.93	20.74
03091115		7	090	5	5	105	7	0	900				124	3	111	421	92.8	1011.7	19.93	21.15
03091130	5	7	090	5	5	105	7	0	900				181	3	160	423	86.1	1011.9	20.34	21.97
03091145	5	7	090		5	105	7	0	900				238	3	209	429	86.3	1012	20.34	21.97
03091200	5	7	090	6	5	105	7	0	900				188	2	171	431	84.6	1012.1	20.14	21.97
03091215	5	7	090	6	5	105	7	0	900				183	2	169	436	89.4	1012.2	20.34	21.36
03091230	5	7	090	6	5	105	7	0	900				248	1	222	439	81.6	1012.3	20.55	22.18
03091245	5	7	090	6	5	105	7	0	900				381	6	322	446	81.7	1012.3	20.35	22.8
03091300	5	7	090	6	5	105	7	0	900				181	-3	160	450	78.3	1012.2	20.34	21.98
03092000	1	7	060	5	5	120							137	52	109	467	84.7	1009.6	20.38	22.63
03092015	1	7	060	5	5	120							81	1	75	461	77.3	1009.6	20.16	23.23
03092030																				
03092045																				
03092100																				
03092115																				



03101245		7	060		5	100								717	885	83	514	56.78	1010.5	18.71	24.87		
03101300	4	7	075	2	5	100								760	895	87	512	54.92	1010.6	19.72	24.87		
03102000	2	7	090	7	5	135								79	0	67	499	69.17	1008.3	20.55	24.46		
03102015	2	7	090	7	5	135								64	0	51	491	71.7	1008.2	20.76	24.45		
03102030																							
03102045																							
03102100																							
03102115																							
03102130																							
03102145																							
03102200																							

	Dados sobre as nuvens												Radiação Solar				Dados meteorológicos				
Foto	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4											
	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	GLO	DIR	DIF	OL	UMI	PRE	TBU	TBS	
	1	7	120																		
03130845		7	120																		

03130900	2	7	110											0	1	0	466	96.5	1011.5	21.61	22.84	
03130915	2	7	110											5	1	3	464	94.8	1011.5	21.61	22.23	
03130930	2	7	110											20	2	18	449	93.2	1011.5	21.61	23.24	
03130945	2	7	110											41	6	36	452	96.5	1011.5	22	23.23	
03131000	2	7	110											91	132	62	443	83.6	1011.6	22.02	24.07	
03131100	3	7	110											105	0	94	462	79.6	1012.3	23.46	25.33	
03131115	3	7	110											100	-2	90	463	90	1012.4	22.85	24.29	
03131130	3	7	110											80	-5	70	455	94.9	1012.6	22.85	23.46	
03131145	3	7	110											191	3	170	440	100	1012.6	22.85	23.46	
03131200	3	7	110											26	0	24	439	96.6	1012.6	23.03	23.23	
03131230	3	7	110											45	0	40	428	94.9	1012.9	22.61	23.01	
03131245	3	7	110											91	0	79	427	96.6	1013	22.81	22.6	
03131300	3	7	110											234	3	206	429	100	1012.9	23.01	23.21	
03132000	5	7	105											100	1	93	459	82.6	1009.1	23.63	25.9	
03132015	5	7	105											96	0	87	462	85.5	1009.2	23.02	25.28	
03132030																						
03132045																						
03132100																						

03132115																				
03132130																				
03132145																				
03132200																				



## APÊNDICE A.2 – Tabelas de dados das nuvens agrupadas por similaridade de tipos de nuvens observadas.

Os arquivos em cinza mais claro foram extrapolados, entre duas observações consecutivas, conforme mencionado no apêndice A1.

Dados sobre as nuvens									
Camada 1			Camada 2			Camada 3			FOTO
QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	-----
4	0	600							02250900
3	4	120							02241800, 02241815, 02241830
4	7	075							03030900, 03030915, 03030930, 03030945, 03031000, 03031100, 03031115, 03031130, 03031145, 03031200, 03031215, 03031230, 03031245, 03031300,
4	5	090							02230930,
5	5	090							02230900, 02230915,
3	7	090							02210900, 02210915,
4	7	090							02171845, 02171900, 02172000,02172015,
3	7	105							02180900, 02180915,
4	7	105							02180930, 02180945, 02181000, 02181130, 02181200, 02181215, 02181245, 02181300, 02182000,02182015
5	7	105							02181100, 02181115,
3	7	110							03130845, 03130900, 03130915, 03130930, 03130945, 03131000, 03131100, 03131115, 03131130, 03131145, 03131200, 03131230, 03131245, 03131300, 03132000,03132015

3	2	360	5	0	600				02250930
2	5	060	7	0	750				02280900, 02280915, 02280930,
5	5	060	7	0	750				02282000,02282015
1	7	060	5	5	120				
1	7	075	6	0	750				02281000, 02281100, 02281115, 02281130, 02281145, 02281200, 02281215, 02281230, 02281245, 02281300, 02281745, 02281800, 02281815
3	7	090	7	0	900				03032000,03032015
2	5	120	4	0	700				02241900, 02242000,02242015
3	7	090	6	0	900				03090915, 03090930, 03090945, 03091000,
4	5	120	6	0	600				02251900, 02252000,02252015
5	5	100	7	2	300				03010900, 03010915, 03010930, 03010945, 03011000, 03011100, 03011115, 03011130, 03011145, 03011200, 03011300, 03012000,03012015,
3	5	090	5	5	150				02171100, 02171115, 02171130
2	7	060	5	5	100				03100930, 03100945, 03101000, 03101100, 03101115, 03101130, 03101145, 03101200, 03101215, 03101230, 03101245, 03101300, 03102000,03102015
1	7	090	4	5	120				02231000,
1	7	090	3	5	150				02231100, 02231115, 02231130, 02231200
4	7	090	6	5	150				02171200, 02171215
1	7	090	3	2	210				02231245, 02231300,
3	7	090	4	2	210				02171300
3	7	090	3	2	270				02232000,02232015
2	7	075	6	2	300				02291130, 02291145,02291200,

									02291215, 02291230, 02291245, 02291300, 02292000,02292015
5	7	075	5	2	210				03021300, 03022000,03022015
2	7	090	4	0	750				02210930, 02210945
3	7	090	6	0	750				02211000,
2	7	120	7	0	750				02211130, 02211145,02211200, 02211215,
3	5	100	5	2	300	6	0	600	02290900
3	5	45	4	7	075	5	2	210	03020900, 03020915, 03020930,
3	5	060	5	7	075	5	3	210	03021000, 03021100, 03021115, 03021130, 03021145, 03021200, 03021215, 03021230,
1	5	030	3	7	090	5	2	270	02231745, 02231800, 02231815, 02231830, 02231900
3	7	045	5	2	270	7	0	750	02221100, 02221115,
4	7	045	5	2	270	7	0	750	02221130, 02221200, 02221215, 02221245, 02221300
4	7	045	6	2	270	7	0	750	02221000,
5	7	045	6	2	270	7	0	750	02220900, 02220915, 02220930, 02220945,
1	7	090	6	2	300	3	0	600	02290930,02290945, 02291000, 02291100
2	7	090	3	2	300	7	0	750	02281830,0228184502281900
4	7	090	5	5	105	7	0	900	03091100, 03091115, 03091130, 03091145, 03091200, 03091215, 03091230, 03091245, 03091300
2	7	090	5	2	300	7	0	750	02211700, 02211715, 02211730, 02211745, 02211800, 02211815, 02211830, 02211845, 02211900, 02212000,02212015
1	7	090	5	5	135	7	0	750	02211100, 02211115
1	7	120	3	2	360	5	0	600	02251000, 02251100,

2	7	120	3	2	300	7	0	750	02211300
---	---	-----	---	---	-----	---	---	-----	----------

## Anexo A.3 – Tabelas de dados das nuvens agrupadas por similaridade na mesma faixa de altitude.

Tabela com a distribuição das nuvens agrupadas. Sem considerar a quantidade das nuvens. As nuvens foram agrupadas de tal forma a ocupar altitudes próximas. Após o agrupamento elas foram divididas em 20 ocorrências distintas. Cada ocorrência era diferenciada pelo tipo de nuvem e camadas que possuía.

Dados sobre as nuvens									
Camada 1			Camada 2			Camada 3			FOTO
	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	-----
	0	600							02250900
	4	120							02241800, 02241815, 02241830
	7	075-090							03030900, 03030915, 03030930, 03030945, 03031000, 03031100, 03031115, 03031130, 03031145, 03031200, 03031215, 03031230, 03031245, 03031300, 02210900, 02210915, 02171845, 02171900, 02172000, 02172015
	5	090							02230930, 02230900, 02230915
	7	105-110							02180900, 02180915, 02180930, 02180945, 02181000, 02181130, 02181200, 02181215, 02181245, 02181300, 02182000, 02182015, 02181100, 02181115, 03130845, 03130900, 03130915, 03130930, 03130945, 03131000, 03131100, 03131115, 03131130, 03131145, 03131200, 03131230, 03131245, 03131300, 03132000, 03132015
	2	360		0	600				02250930
	5	060		0	750				02280900, 02280915, 02280930, 02282000, 02282015
	7	075-090-120		0	750-900				02281000, 02281100, 02281115, 02281130, 02281145, 02281200, 02281215, 02281230, 02281245, 02281300, 02281745, 02281800, 02281815, 03032000, 03032015, 03090915, 03090930, 03090945,

								03091000, 02210930, 02210945, 02211000, 02211130, 02211145, 02211200, 02211215
5	120		0	600-700				02251900, 02252000, 02252015, 02241900, 02242000, 02242015
5	100		2	300				03010900, 03010915, 03010930, 03010945, 03011000, 03011100, 03011115, 03011130, 03011145, 03011200, 03011300, 03012000, 03012015,
5	090		5	150				02171100, 02171115, 02171130
7	060-090		5	100-150				03100930, 03100945, 03101000, 03101100, 03101115, 03101130, 03101145, 03101200, 03101215, 03101230, 03101245, 03101300, 03102000, 03102015, 02231000, 02231100, 02231115, 02231130, 02231200, 02171200, 02171215
7	075-090		2	210-300				02231245, 02231300, 02171300, 02232000, 02232015, 02291130, 02291145, 02291200, 02291215, 02291230, 02291245, 02291300, 02292000, 02292015, 03021300, 03022000, 03022015
5	100		2	300		0	600	02290900,
5	45		7	075		2	210	03020900, 03020915, 03020930,
5	060		7	075		3	210	03021000, 03021100, 03021115, 03021130, 03021145, 03021200, 03021215, 03021230,
5	030		7	090		2	270	02231745, 02231800, 02231815, 02231830, 02231900
7	045-900		2	270-300		0	600-750	02221100, 02221115, 02221130, 02221200, 02221215, 02221245, 02221300, 02221000, 02220900, 02220915, 02220930, 02220945, 02290930, 02290945, 02291000, 02291100, 02281830, 02281845, 02281900
7	090		5	105-135		0	750-900	03091100, 03091115, 03091130, 03091145, 03091200, 03091215,

									03091230, 03091245, 03091300, 02211100, 02211115
	7	090- 120		2	300- 360		0	600- 750	02211700, 02211715, 02211730, 02211745, 02211800, 02211815, 02211830, 02211845, 02211900, 02212000, 02212015, 02251000, 02251100, 02211300

## **Anexo B – Relação das imagens de satélite utilizadas.**

Neste anexo encontra-se uma relação das imagens obtidas através do convênio com o INPE para o presente experimento para os meses de fevereiro e março de 2000. Na tab. A1 encontra-se descrito qual o arquivo correspondente à imagem, dia do mês, horário GMT, o valor do pixel, a linha e coluna da imagem (setorizada), a latitude e a longitude de Florianópolis.

Os satélites da série GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) fazem parte de um programa para estudos meteorológicos estabelecido em cooperação entre a NASA, NOAA e a WMO. Eles fazem parte de uma rede de satélites distantes acerca de 70° de longitude entre si ao redor da Terra. Ocupam uma órbita a 36.000 km de altura, síncrona em relação ao equador. As imagens do satélite GOES-8 visualizam o disco hemisférico completamente em 4 canais visível, vapor d'água, infra-vermelho e composta. No presente trabalho será utilizado um setor correspondente ao Brasil a partir da imagem global do canal infravermelho. Um exemplo da imagem global do satélite GOES-8 pode ser visualizada na fig. C1. Vale a pena salientar que a imagem utilizada foi setorizada a partir da imagem global visualizada na fig. C1. Uma limitação do método foi a não existência de imagens de satélites disponíveis para todas fotos das nuvens retiradas. No presente método será necessário utilizar as fotos que não possuem correspondências de imagens de satélite para o treinamento da rede neural.

Figura B.1 . Imagem típica do canal visível do satélite GOES-8, mostrando pixels de dados somente abaixo da linha do equador.

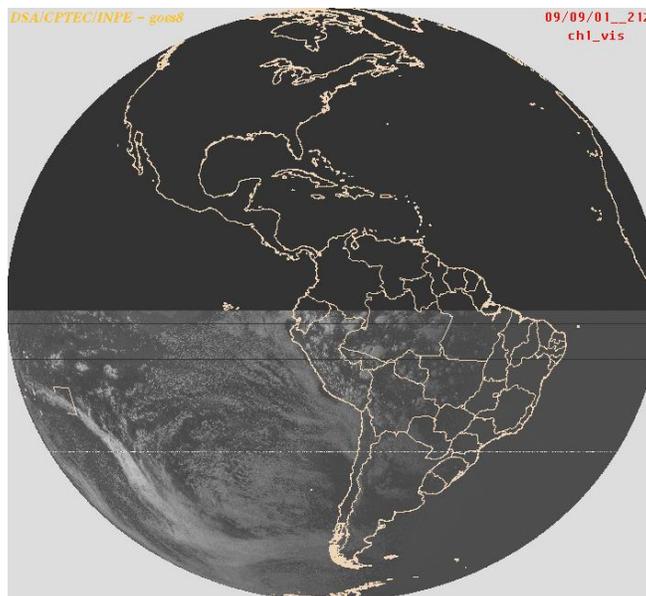


Tabela B1. Descrição das imagens com o valor dos pixels para a latitude  $-27.62$ , longitude  $-48.525$ , de Florianópolis para o mês de Março de 2000.

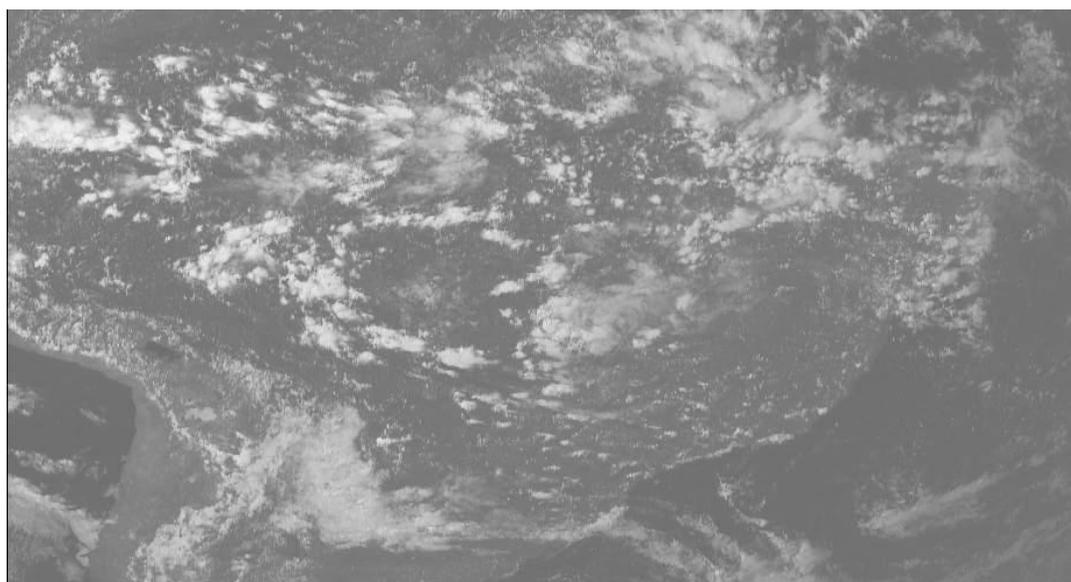
Arquivo	dia	Horário GMT	pixel
ge011500	1	1500	87
ge011800	1	1800	85
ge012100	1	2100	11
ge021200	2	1200	21
ge021500	2	1500	61
ge021800	2	1800	41
ge031200	3	1200	23
ge031500	3	1500	66
ge031800	3	1800	49
ge032100	3	2100	14
ge091200	9	1200	56
ge091500	9	1500	36
ge091800	9	1800	63
ge092100	9	2100	9
ge131200	13	1200	39
ge131500	13	1500	38
ge131800	13	1800	34

Arquivo	dia	Horário GMT	pixel
ge132100	13	2100	11

Tabela B.2. Descrição das imagens com o valor dos píxels para a latitude  $-27.62$ , longitude  $-48.525$ , de Florianópolis para o mês de Fevereiro de 2000.

Arquivo	dia	Horário GMT	pixel
Ge211200	21	12:00	29
Ge221200	22	12:00	74
Ge231200	23	12:00	42
Ge291200	29	12:00	55
Ge292100	29	21:00	12

Figura B.2 . Imagem do canal visível do satélite GOES-8, recebida pelo convênio INPE-UFSC. O contraste foi realçado com o objetivo de tornar mais clara a ilustração.



## Anexo C – Modelo atmosférico utilizando o programa MAPLE V.

O programa matemático MAPLE foi escolhido para o cálculo do modelo atmosférico por ser fácil de programar, possuir um ambiente matemático que facilita a implementação e teste de soluções utilizando calculo avançado e gerar rotinas em C automaticamente a partir do modelo implementado.

```
# Programa para o cálculo da irradiação solar utilizando o
modelo paramétrico C.
> Isc:='Isc'; Ion:='Ion'; Eo:='Eo'; Is:='Is';
DayAngle:='DayAngle';
>
JulianDay:='JulianDay';lambda:='lambda';pressao:='pressao';T
:= 'T';umid
> ade:='umidade';LocMinuto:='LocMinuto';
```

```
Isc := Isc
```

```
Ion := Ion
```

```
Eo := Eo
```

```
Is := Is
```

```
DayAngle := DayAngle
```

```
JulianDay := JulianDay
```

```
lambda := lambda
```

```
pressao := pressao
```

```
T := T
```

```

                                umidade := umidade

                                LocMinuto := LocMinuto

# Irradiação direta normal no topo da atmosfera (Iqbal 4.2.1
fator solar
# pag. 53)
> Ion:= Isc*Eo;

                                Ion := Isc Eo

# Cosseno do angulo de elevação em horário local
> CosElevLOC:=
> proc(JulianDay::integer,LocMinuto::integer,LocLatD::float,
> LocLong::float)
> local DayAngle, Eo, EqOfTime, SolDec, ConstAngHor,
LongStd, Numb,
> FracMin, LocLatR, SolarTime, AngHorLocD,UtcAngHorD,
SenLat, CosLat,
> SenDec, CosDec, SenDecLat, CosDecLat, CosAngHorLoc,
CosZenLoc,
> LongCorr;
#           Dia Angular radianos (Iqbal 1.2.2)
>   DayAngle:=2*Pi*(JulianDay-1)/365;
#           Fator de excentricidade(Iqbal 1.2.1)
>   Eo:= 1.000110 + 0.034221*cos(2*DayAngle)+
>
0.00128*sin(DayAngle)+0.00719*cos(2*DayAngle)+0.000077*sin(2
*DayAngle)
> ;
#           Equação do tempo (Iqbal 1.4.1)
>   EqOfTime:= (0.000075 + 0.001868*cos(DayAngle) -
> 0.032077*sin(DayAngle) - 0.014615*cos(2*DayAngle) -
> 0.04089*sin(2*DayAngle) ) *229.18;
#           Declinação solar radianos (Iqbal 1.3.1)
>   SolDec:= (0.006918 - 0.399912*cos(DayAngle) +
> 0.070257*sin(DayAngle) - 0.006758*cos(2*DayAngle) +
> 0.000907*sin(2*DayAngle) - 0.002697*cos(3*DayAngle)
> +0.00148*sin(3*DayAngle) );
>   ConstAngHor:=0.017453292; LongStd:=45; Numb:=4;
>   LocLatR :=LocLatD*(Pi/180);
>   LongCorr := Numb*(LongStd - LocLong);#
#           Solar time ou horário aparente (Iqbal 1.4.2)
>   SolarTime:= LongCorr + EqOfTime;

```

```

> AngHorLocD:= (12-(LocMinuto+SolarTime)/60)*15;
> CosZenLoc:=
cos(SolDec)*cos(LocLatR)*cos(AngHorLocD*Pi/180) +
> sin(SolDec)*sin(LocLatR);
> RETURN(CosZenLoc);
> end:
# Cosseno do angulo de elevação em horário UTC
> CosElevUTC:=
> proc(JulianDay::integer,UtcMinuto::integer,LocLatD::float,
> LocLong::float)
>
> local ret;
> ret:= evalf(CosElevLOC(JulianDay,(UtcMinuto-
180),LocLatD,
> LocLong));
> RETURN(ret);
> end:
>
>
# Constantes definidas para o cálculo z3:= altitude da
camada de ozônio
# em km, re raio médio da Terra
> z3:=20; re:=6370;

```

z3 := 20

re := 6370

```

# Dados de entrada => pegar dados da tabela da imagem
JulianDay:=54;
# LocMinuto:=860; Pressão:=1051.7; T:=21.77; umidade:=88;
# LocMinuto:=600;
#
> JulianDay:=54; UtcMinuto:= 1300; Pressao:= 1015.8; T:=
21.77;
> umidade:= 88 ;

```

JulianDay := 54

UtcMinuto := 1300

Pressao := 1015.8

```

T := 21.77

umidade := 88

>
> CosAngZen:=evalf(CosElevUTC(JulianDay,UtcMinuto,-27.53,
49.5));

CosAngZen := .04983024345

>
# Angulo zenital em graus
> AngZen:= evalf(arccos(CosAngZen)*180/Pi);

AngZen := 87.14375443

# Massa óptica do ar (sem considerar a pressão atmosférica
local) (Iqbal
# 5.7.2)
> mr:= 1/(CosAngZen + 0.15*(93.885 - AngZen)^(-1.253));

mr := 15.73303234

# Massa óptica do ar (Iqbal 5.7.3)
> ma:= mr *(Pressao/1013.25);

ma := 15.77262694

> M[a]:=evalf(ma);

M[a] := 15.77262694

> M[r]:=evalf(mr);

M[r] := 15.73303234

# l:= espessura da camada de ozônio varia mensalmente (Iqbal
tab.
# 5.3.2),
# omega:= razão entre a energia espalhada pelos aerrossóis
em relação ao
# total da radiação direta pags. 146, 190(Iqbal 5.7.3)
# F[c]:= razão entre a energia espalhada adiante (forward)
da energia
# espalhada total
# rho[g]:= albedo terrestre

```

```

> Isc:=1367; l:=0.35; omega[o]:=0.9; F[c]:=0.84;
rho[g]:=0.2;

Isc := 1367

l := .35

omega[o] := .9

F[c] := .84

rho[g] := .2

# w:= agua precipitável em cm, p[s]:= pressão parcial de
vapor,
# converter temperatura para kelvin (Iqbal 5.4.6 e 7),
normalizar a
# humidade
> T[k]:= T + 273.05; umidade:=umidade*0.01;
> p[s]:= exp(26.23 - 5426/T[k]);
> w:=0.493*umidade*p[s]/T[k];

T[k] := 294.82

umidade := .88

p[s] := 2503.762376

w := 3.684391389

# Calculo das radiações utilizando o modelo C de
parametrização
# Transmitância devido ao Espalhamento Rayleigh (Iqbal
7.6.2)
> tau[r]:=exp(-0.0903*M[a]^(0.84)*(1+ M[a] - M[a]^(1.01)));

tau[r] := .5993063920

# Transmitância pelo ozônio (Iqbal 7.4.4)
> tau[o]:= 1- (0.1611*l*M[r]*(1+139.48*l*M[r])^(-0.3035) -

```

```

> 0.002715*1*M[r] (1+0.044*1*M[r]+0.003*(1*M[r])^2)^(-1));

      tau[o] := .8820044378

# Transmitância pela mistura uniforme de gases (Iqbal 7.6.4)
> tau[g]:=exp(-0.0127*M[a]^0.26);

      tau[g] := .9743184355

# Transmitância pelo vapor de água (Iqbal 7.6.5)
> tau[W]:= 1 - 2.4959*w*M[r]*((1 + 79.034*w*M[r])^0.6828 +
> 6.385*w*M[r])^(-1);

      tau[W] := .7891567594

# Transmitância devido aos aerossóis (iqbal 7.6.6 ou
# 7.4.12=f(visibilidade))
> tau[a]:= exp(-0.0481^0.873 * ( 1 + 0.0481 - 0.0481^0.7088
> )*M[a]^0.9108);

      tau[a] := .4437286853

# Transmitância da radiação direta devido a absorptância dos
aerossóis
# (Iqbal 7.6.9)
> tau[aa]:= 1-(1-omega[o])*(1 - M[a]+M[a]^1.06)*(1-tau[a]);

      tau[aa] := .7864619020

# Transmitância devido às múltiplas reflexões (Iqbal 7.6.11)
> tau[as]:= tau[a]/tau[aa];

      tau[as] := .5642087483

# Albedo cte F[c] da tabela 6.17.1
> AngZen;
>
> if 0<=AngZen and AngZen<=15 then F[c]:= 0.92
> elif 15<AngZen and AngZen<=45 then F[c]:= 0.90
> elif 45<AngZen and AngZen<=55 then F[c]:= 0.85
> elif 55<AngZen and AngZen<=65 then F[c]:= 0.78
> elif 75<AngZen and AngZen<=82.5 then F[c]:= 0.60
> elif 82.5>AngZen then F[c]= 0.50
> fi;

```

87.14375443

```

# Albedo atmosférico (Iqbal 7.6.12)
> rho[a]:= 0.0685 + (1-F[c])(1-tau[as]);

                                rho[a] := .2285

# Absortância do vapor de água (IQBAL 7.4.3)
> alpha[W]:= 2.9*w*M[a]/((1+141.5*w*M[a])^0.635 +
5.925*w*M[a]);

                                alpha[W] := .2590456801

# Radiação direta normal (Iqbal 7.6.1)
> In:= 0.9751*Isc*tau[r]*tau[o]*tau[g]*tau[W]*tau[a];

                                In := 240.3914720

> In2:=In*cosAngZen;

                                In2 := 11.97876557

# Radiação difusa devido ao efeito Rayleigh (Iqbal 7.6.8)
>
Idr:=0.79*Isc*cosAngZen*tau[o]*tau[g]*tau[W]*tau[aa]*0.5*(1-
tau[r])/(1
> -M[a]+M[a]^1.02);

                                Idr := 3.035128219

# Radiação difusa devido ao espalhamento dos aerossóis
(Iqbal 7.6.10)
>
Ida:=0.79*Isc*cosAngZen*tau[o]*tau[g]*tau[W]*tau[aa]*F[c]*(1
-tau[as])/
> (1- M[a] + M[a]^1.02);

                                Ida := 5.545649502

# Radiação difusa devido a múltiplas reflexões (Iqbal
7.4.16)
> Idm:= (In*cosAngZen+Idr+Ida)*rho[g]*rho[a]/(1-
rho[g]*rho[a]);

                                Idm := .9845657848

# Radiação difusa total
> Id:= Idr + Ida + Idm;

```

```
Id := 9.565343506  
  
# Radiação global (Iqbal 7.4.18)  
> Ig:=(In*CosAngZen + Idr + Ida)*(1/(1-rho[g]*rho[a]));  
  
Ig := 21.54410907
```

## Anexo D – Tabela dos dados de treinamento levantados para a normalização.

class.	Imagem	DOY	MIN	global	direta	difusa	O.longa	Pres.	TBS	Umid.	In	Id	Ig	Cos $\theta_z$
céu	02211100	52	660	365	721	62	498	1015.7	24.46	75.9	771	82.2	401	0.413
Nuv.	02211800	52	1080	504	156	392	499	1013.6	27.15	54.27	924	109.8	833	0.782
Nuv.	02231100	54	660	137	3	118	439	1013.8	22.6	96.5	765	81.2	394	0.409
C+N	02231900	54	1140	264	18	206	519	1009	28.8	65,4	867	101.1	637	0.618
céu	02251100	56	660	292	526	69	493	1011.2	23.4	83.5	766	80.1	391	0.404
céu	03031000	63	600	21	2	18	440	1012.3	23.21	100	508	43.8	129	0.168
C+N	03031100	63	660	120	1	106	442	1012.7	23.64	94.9	752	78.9	372	0.39
C+N	03031200	63	720	99	1	88	451	1013.1	24.46	90.1	854	98.5	601	0.589
Nuv.	03032000	63	1200	72	1	63	478	1008.8	26.93	77.5	755	79	375	0.392

## Legenda:

DOY: significa dia do ano.

Min.: Minuto do dia.

Global: Radiação global medida.

Direta: Radiação direta medida.

Difusa: Radiação difusa medida.

TBS: temperatura ambiente

O. Longa: Dados de onda longa Umid.: Umidade do ar.

Pres.: Pressão atmosférica

In: Radiação direta normal calculada pelo modelo atmosférico.

Id: Radiação difusa calculada pelo modelo atmosférico.

Ig: Radiação global calculada pelo modelo atmosférico.

Cós  $\theta_z$ : Cosseno do ângulo zenital.

## Anexo E – Tabela descrevendo os dados obtidos para o conjunto de análise

Tabela condensada dos dados obtidos para a análise da ferramenta. Mês de Fevereiro de 2000. li\_setor= 593, lf\_setor =1089, ci\_setor = 1169, cf\_setor 2095

Foto	INPE		Estação BSRN - LABSOLAR									MAPLE				Observação das camadas de nuvens								
câmera	GOES-8	pixel	glo	dir	dif	Olon	umid	temp	pres	min	doy	Modelo atmosférico				Camada 1			Camada 2			Camada 3		
Mf2-8	Mg2											Cos θ	In	Id	Ig	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT
02211200	Ge211200	29	179	6	157	481	77.8	24.66	1015.8	720	51	0.613	866	101.2	632	2	7	120	7	0	750			
02221200	Ge221200	74	144	0	126	455	86.9	22.4	1014.4	720	53	0.609	869	101.3	631	4	7	045	5	2	270	7	0	750
02231200	Ge231200	42	478	222	289	454	77.2	23.42	1013.4	720	54	0.607	871	101.4	631	1	7	090	3	5	150			
02291200	Ge291200	55	546	537	173	515	64.8	27.78	1014.3	720	60	0.595	860	99.6	612	3	7	075	6	2	300			
02292100	Ge292100	12	50	68	36	521	73.1	27.35	1012.3	1260	60	0.181	533	47.3	144	2	7	100	6	2	210			

Tabela condensada dos dados obtidos para a análise da ferramenta. Mês de Março de 2000. . li\_setor= 593, lf\_setor =1089, ci\_setor = 1172, cf\_setor 2099

li\_im = 497 co\_im = 927 fpolis\_pos => li=1025 e col=1700

Foto	INPE		Estação BSRN - LABSOLAR									MAPLE				Observação das camadas de nuvens								
câmera	GOES-8	pixel	glo	dir	dif	Olon	umid	temp	pres	min	doy	Modelo atmosférico				Camada 1			Camada 2			Camada 3		
Mf1-8	Mg1-8											Cos θ	In	Id	Ig	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT	QTI	TIP	ALT
03012100	Ge012100	12	122	217	79	502	81.4	27.76	1014.4	1260	61	0.178	524	46.2	139	5	5	075	4	2	300			
03021200	Ge021200	52	586	654	167	507	69.9	24.87	1014.3	720	62	0.591	861	99.5	609	3	5	060	5	7	090	5	2	210
03031200	Ge031200	25	99	0	88	451	90.1	24.46	1013.1	720	63	0.589	853	98.5	602	3	7	090						
03032100	Ge032100	10	5	0	5	466	76.6	25.7	1009.8	1260	63	0.170	516	44.7	132	3	7	090	7	0	900			
03091200	Ge091200	16	188	2	171	431	84.6	21.97	1012.1	720	69	0.577	855	98.0	591	5	7	090	6	5	105	7	0	900
03092100	Ge092100	12	15	0	15	450	76.6	22.2	1010.0	1260	69	0.147	476	38.9	109	1	7	060	5	5	120			
03131200	Ge131200	16	26	0	24	439	96.6	23.23	1012.6	720	73	0.568	848	102	584	3	7	110						
03132100	Ge132100	13	17	1	18	462	84	25.07	1009.3	1260	73	0.130	438.4	34.7	92	5	7	105						

## Anexo F – Tabela descrevendo os resultados gerais

Resolução das fotos 848 x 640 = 542720 pixels ( x3 = 1628160 bytes)

fotos	Pseud	pixel	RGB – pixel Rede neural		HSI – pixel Rede neural		RGB – variância 3. Rede neural ( 0.6% de perdas por causa do cálculo da variância nas bordas)		RGB – variância 7. Rede neural (0.82% de perdas por causa do cálculo da variância nas bordas)	
			clouds	sky	clouds	sky	clouds	sky	clouds	sky
02211200	F1	0.1133	359.244 (77)	183.476 (33)	485.932 (89,76)	56.788 (10,4)	519.559 (96,3)	20.394 (3,7)	534.790 (98,5)	5.163 (0,95)
02221200	F2	0.2891	522.650 (96,4)	20.070 (3,6)	542.666 (99,99)	54 (0,001)	539.870 (99,35)	83 (0,001)	539.949 (99,4)	4 (0)
02231200	F3	0.1640	498.438 (91,9)	44.282 (8,2)	414.966 (76,5)	127.754 (23,5)	533.755 (98,35)	6.198 (0,01)	537.375 (99)	2578 (0,47)
02291200	F4	0.2148	540.257 ( 99,6)	2.463 (0,4)	541.143 (99,7)	1577 (0,3)	539.808 (99,4)	145 (0,001)	539.712 (99,4)	41 (0)
02292100	F5	0.0469	444.145 (81,9)	98.575 (18,1)	542.248 (99,9)	472 (0,001)	506.348 (93,2)	33.605 (6,2)	526.064 (96,9)	13.889 (2,5)
03012100	F6	0.0469	483.647 (89,1)	59.073 (10,8)	542.720 (100)	0	533.688 (98,33)	6.225 (1,14)	538.495 (99,2)	1.458 (0,26)
03021200	F7	0.2031	534.386 (98,5)	8.334 (1,5)	515.586 (55,1)	27.134 (4,9)	539.092 (99,33)	51 (0,001)	539.928 (99,5)	25 (0)
03031200	F8	0.0977	189.961 (35)	353.759 (65)	508.672 (94)	34.048 (6)	318.474 (58,68)	221.479 (40,81)	468.832 (86,38)	71.121 (13,1)
03032100 (03032000)	F9	0.0391	351.441 (52)	260.005 (48)	514.957 (94,4)	27.763 (5,1)	354.723 (65,36)	185.230 (34,1)	468.952 (86,4)	71.001 (13,08)
03091200	F10	0.0625	138621 (25,5)	404.099 (74,5)	459.507 (84,9)	82213 (15,1)	282.087 (51,97)	257.866 (47,51)	449.408 (82,8)	90.505 (16,7)
03092100	F11	0.0469	478.476(89,2)	64.244 (11,8)	542.659 (100)	61	525.154 (96,76)	14.799 (2,72)	536.464 (98,84)	3.489 (0,64)
03131200	F12	0.0625	355.965 (65,6)	186.755 (34,4)	542.720 (100)	0	494.481 (91,11)	45.472 (8,37)	537.638 (99,06)	2.315 (0,42)
03132100	F13	0.0508	471.044 (86,8)	71.676 (13,2)	542.720	0	483.095 (89,01)	56.858 (10,47)	531.021 (97,84)	8.932 (1,64)
							Busquei píxel + nitido no treinamento		Busquei píxel + claro no treinamento	

A mesma tabela acima classificada pelos valores dos píxels de satélite em ordem decrescente de valor.

cobertura	TESTE		pixel	RGB – pixel Rede neural		HSI – pixel Rede neural		RGB – variância 3. Rede neural (0.6% de perdas por causa do cálculo da variância nas bordas)		RGB – variância 7. Rede neural (0.82% de perdas por causa do cálculo da variância nas bordas)	
				clouds	sky	clouds	sky	clouds	sky	clouds	sky
0,6667	02221200	F2	0.2891	96,4	3,6	99.99	0.001	99,35	0,001	99,4	0
0,375	02291200	F4	0.2148	99,6	0,4	99.7	0.3	99,4	0,001	99,4	0
0,5417	03021200	F7	0.2031	98,5	1,5	55.1	4,9	99,33	0,001	99,5	0
0,25	02231200	F3	0.1640	91,9	8,2	76,5	23.5	98,35	0,01	99	0,47
0,5625	02211200	F1	0.1133	77	33	89,76	10,4	96,3	3,7	98,5	0,95
0,375	03031200	F8	0.0977	35	65	94	6	58,68	40,81	86,38	13,1
0,75	03091200	F10	0.0625	25.5	74.5	84.9	15.1	51,97	47,51	82,8	16,7
0,375	03131200	F12	0.0625	65.6	34.4	100	0	91,11	8,37	99,06	0,42
0,625	03132100	F13	0.0508	86.8	13,2	100	0	89,01	10,47	97,84	1,64
0,0496	02292100	F5	0.0469	81,9	18,1	99.9	0.001	93,2	6,2	96.9	2,5
0,0469	03012100	F6	0.0469	89,1	10,8	100	0	98,33	1,14	99.2	0,26
0,375	03092100	F11	0.0469	89,2	11.8	100	0	96,76	2,72	98,84	0.64
0,625	03032000	F9	0.0391	52	48	94.4	5.1	65,36	34,1	86,4	13,08
								Busquei píxel + nitido no treinamento		Busquei píxel + claro no treinamento	

## Anexo G – Difusão anisotrópica

Neste anexo será apresentada uma descrição sumária acerca do mecanismo de difusão anisotrópica utilizado no presente trabalho.

Os métodos de difusão anisotrópica foram originalmente desenvolvidos para serem utilizados no cálculo da difusão do calor através de um meio de propagação. Se o meio for homogêneo a difusão é isotrópica. Se o meio de propagação não for homogêneo a difusão é anisotrópica. No presente trabalho o meio de propagação da radiação solar (atmosfera) é considerado um meio anisotrópico por que as suas propriedades físicas variam de acordo com as condições climáticas.

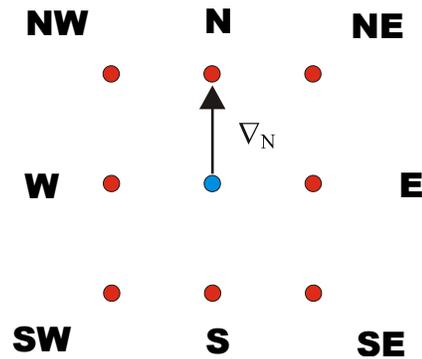
Matematicamente a imagem é considerada um espaço vetorial com uma determinada base. Se a imagem é colorida o espaço vetorial é tridimensional de acordo com o padrão de cores utilizado. Uma imagem colorida pode ser expressa em espaços vetoriais RGB (Red Green e Blue), etc. de acordo com a aplicação desejada. Se a imagem é apresentada em níveis de cinza, ela é considerada um espaço escalar.

Os filtros de difusão de imagem utilizados no presente trabalho consideram a imagem como um campo escalar. A imagem colorida no padrão RGB foi convertida para 256 níveis de cinza. Em seguida foi utilizada como dado de entrada de um filtro de difusão disponível. Não foi implementado um filtro de difusão para imagens coloridas por que a complexidade de implementação matemática é muito grande e fugiria ao escopo do presente trabalho. Mas fica como sugestão para um trabalho futuro.

No filtro de difusão são calculadas as variações distribuídas ao longo da superfície, e os seguintes resultados são obtidos. Ocorre um realce nas bordas, uma homogenização das regiões similares formando superfícies isófonas, uma suavização das pequenas variações e a preservação da imagem original.

A difusão é efetuada utilizando-se uma matriz jacobiana ao redor do pixel central. A matriz utilizada era de 3x3. Nesta matriz era aplicada a derivada direcional conforme ilustrada na fig. G1.

Figura G1. Ilustração da aplicação do algoritmo de difusão em uma imagem.



O princípio físico envolve o cálculo numérico da equação de LAPLACE.

$$-\frac{\partial I}{\partial s} = \nabla^2 I = \text{div}(c \cdot \nabla I)$$

Onde:

div: é o divergente

$\nabla$ : é o gradiente na direção  $i$

$\nabla^2$ : é o operador Laplaciano.

$c_i$ : é o coeficiente de difusão na direção  $i$

O Coeficiente de difusão utilizado é o seguinte:

$$c_i(\nabla_i I_s) = -\exp\left(\frac{\|\nabla_i I_s\|}{k}\right)$$

Para uma imagem discreta obtêm-se a seguinte expressão para o novo valor do pixel.

$$I_{s+\Delta s} = I_s + \Delta_s (c_n \Delta_n I_s + c_s \Delta_s I_s + c_e \Delta_e I_s + c_w \Delta_w I_s + c_{ne} \Delta_{ne} I_s + c_{nw} \Delta_{nw} I_s + c_{se} \Delta_{se} I_s + c_{sw} \Delta_{sw} I_s)$$

## Errata