



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **ESTUDO DO DESEMPENHO DOS PERFIS TERMODINÂMICOS INFERIDOS A PARTIR DE RADIÂNCIA DO SENSOR AIRS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Luiz Henrique Gonçalves (UNISAL, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [luiz.goncalves@cptec.inpe.br](mailto:luiz.goncalves@cptec.inpe.br)

Dra. Simone Sievert da Costa Coelho (DSA/CPTEC/INPE, Orientadora)  
E-mail: [simone.sievert@cptec.inpe.br](mailto:simone.sievert@cptec.inpe.br)

### **COLABORADORES**

Jurandir Ventura Rodrigues (DSA/CPTEC/INPE)  
Ramon Campos Braga (DSA/CPTEC/INPE)

Junho de 2010

## **SUMÁRIO**

### **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

- 1.1 Objetivos gerais do presente projeto de iniciação científica
- 1.2 Objetivos alcançados até o momento

### **CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

- 2.1 Observações da estrutura termodinâmica da atmosfera
- 2.2 Inferências de perfis de temperatura e umidade através de satélites
- 2.3 Sistema de inferência do CPTEC-INPE
- 2.4 Motivação do presente estudo

### **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

- 3.1 Dados observacionais e inferidos
- 3.2 Construção do método operacional de avaliação dos perfis inferidos

### **CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **ANEXO A – ARTIGO SUBMETIDO AO CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**

# 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do estado termodinâmico da atmosfera é essencial nas análises dos fenômenos meteorológicos. Temperatura e umidade são as principais variáveis que descrevem o estado termodinâmico da atmosfera. Neste contexto, perfis termodinâmicos gerados a partir das radiâncias observadas por sondadores a bordo de satélites têm grande importância na meteorologia, principalmente em duas de suas grandes áreas: assimilação de dados e previsão de tempo. Na assimilação de dados, os perfis termodinâmicos inferidos são utilizados como condições iniciais dos modelos numéricos de previsão do tempo. Na previsão de tempo, os perfis termodinâmicos auxiliam no monitoramento do estado físico atual da atmosfera. Devido à importância dos dados de satélite, faz-se necessário a avaliação contínua dos perfis inferidos.

## 1.1. Objetivos gerais do presente projeto de iniciação científica

A precisão dos dados inferidos via informações de satélite deve-se a diversos fatores: modelo de inversão, condição inicial do modelo, erros nas observações do sensor, técnica de mascaramento de nebulosidade, entre outros. Este trabalho tem por objetivo estudar o desempenho dos perfis termodinâmicos e índices de instabilidade atmosférica inferidos via sensor AIRS do satélite AQUA. Perfis inferidos através do modelo de inversão IMAPP serão avaliados sobre todo o continente da América do Sul utilizando dados de radiossonda. A avaliação deverá constar número significativo de amostras de pares coincidentes de lançamento de radiossonda e observações de satélite. As métricas de avaliação serão aquelas baseadas em índices estatísticos padrões. Adicionalmente, serão utilizados os dados do projeto experimental MiniBarca que foi realizado na região Amazônica. Serão utilizadas rotinas computacionais programadas na linguagem em MATLAB e FORTRAN e que foram desenvolvidas pelo grupo de sondagens para o satélite. Adicionalmente, outras ferramentas computacionais serão avaliadas a fim de verificar quais delas melhor podem descrever um sistema operacional de avaliação.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Estudar os conceitos básicos associado ao tema desta pesquisa.

2. Gerar banco de dados (satélite e radiossonda).
3. Interpolar os níveis dos perfis atmosféricos das radiossondas nos níveis do AIRS.
4. Calcular água precipitável e estimar os índices de estabilidade atmosférica.
5. Adaptar os métodos de avaliação para o sensor AIRS-AQUA.
6. Analisar a qualidade dos perfis inferidos via sensor AIRS utilizando os dados de radiossonda.
7. Intercomparar os perfis atmosféricos inferidos via sensor AIRS disponibilizados pela DSA e aqueles pelo NOAA.
8. Plotar os dados atmosféricos no formato convencional do Skew-T.

## **1.2. Objetivos alcançados até o momento**

O primeiro ano do projeto de Iniciação Científica alcançou dois objetivos principais. O primeiro foi conhecer o processo de inferência dos satélites Terra e Aqua. Este objetivo foi alcançado através da leitura de material didático, científico e técnico sobre o funcionamento dos sensores e sistemas de observações diretas (i.e radiossonda). Algumas destas informações estudadas são apresentadas resumidamente no capítulo 2. O segundo objetivo foi desenvolver uma metodologia computacional para avaliar os perfis termodinâmicos inferidos via satélite. A metodologia é baseada em ferramentas *open source*, ou seja, de código aberto e livre. A metodologia desenvolvida abrange a plotagem gráfica dos dados e também a análise de avaliação dos dados inferidos por satélite. A metodologia desenvolvida e os resultados preliminares são também apresentadas neste relatório. É importante mencionar que parte do presente estudo resultou em um artigo que foi submetido ao Congresso Brasileiro de Meteorologia (Anexo A).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção são apresentados os seguintes itens: observações diretas da estrutura termodinâmica da atmosfera; inferência indireta de perfis termodinâmicos; sistema operacional de sondagem do CPTEC. No final da seção, a motivação do presente estudo é apresentada.

### **2.1. Observações direta da estrutura termodinâmica da atmosfera**

A radiossonda é um conjunto de sensores e transmissores os quais possibilitam a medição de diversas variáveis meteorológicas, em diversos níveis de altitude, como umidade relativa, pressão, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, estes que são calculados a partir da trajetória do balão. As radiossondas podem atingir altitudes de aproximadamente 30 mil metros, à medida que ascendem enviam às estações meteorológicas de altitude os dados que coletam em diferentes altitudes.

Há dois tipos de equipamentos utilizados na radiossondagem: os terrestres, que compreendem os aparelhos responsáveis pela recepção, processamento e armazenamento dos dados coletados, e os de vôo que são os sensores, transmissores e processadores da sonda. O balão meteorológico que transporta a radiossonda é feito de borracha natural ou sintética, devendo ser resistente e extensível com capacidade de suportar um peso de até 18 quilos e de manter por 1 hora a extensão de até 4 vezes o seu diâmetro inicial. Esses balões são inflados com o gás Hidrogênio ou Hélio, sendo este o mais recomendável, pois o seu uso não implica no risco de incêndios ou explosões.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda que pelo amplo uso em pesquisas e por necessidade de padronização, os lançamentos de radiossondas sejam realizados às 00:00 , 06:00, 12:00 e 18:00 UTC (Tempo Universal Coordenado), havendo a prioridade para os horários de 00:00 e 12:00 UTC.

## 2.2. Inferências de perfis de temperatura e umidade através de satélites

Ao longo da história da humanidade podem-se observar grandes avanços na área científica e tecnológica, dos quais, os satélites têm lugar de destaque. Além da grande capacidade de transmissão de dados, facilitando a comunicação entre os mais diversos locais no globo terrestre, os satélites oferecem uma infinidade de outras funções. Dentre as áreas beneficiadas na meteorologia, destacam-se as ligadas à sondagem atmosférica, que com o uso dos satélites pôde ser realizada em locais de difícil acesso para observações convencionais (Wark e Fleeming, 1966; Li e Huang, 1999; Cintra et al., 2005), contribuindo para uma melhor compreensão da atmosfera, sua hidrodinâmica e as transformações de energia (Kaplan, 1959).

A sondagem remota da atmosfera é baseada em radiancias emergentes provenientes da superfície e da atmosfera que atingem os sensores a bordo de um satélite, e as variáveis a serem determinadas são obtidas a partir de métodos de inversão da Equação de Transferência Radiativa (ETR). Portanto, em sondagens remotas os valores de temperatura, umidade ou concentração de gases, por exemplo, não podem ser considerados medidas, mas sim valores estimados devido ao método indireto de obtenção. Muitos estudos vêm sendo realizados ao longo do tempo aperfeiçoando cada vez mais os algoritmos para a determinação das sondagens a partir de radiancias medidas por satélites. Muitas dessas pesquisas revelam que as sondagens obtidas remotamente apresentam uma concordância elevada com as sondagens obtidas convencionalmente.

## 2.3. Sistema de inferência do CPTEC-INPE

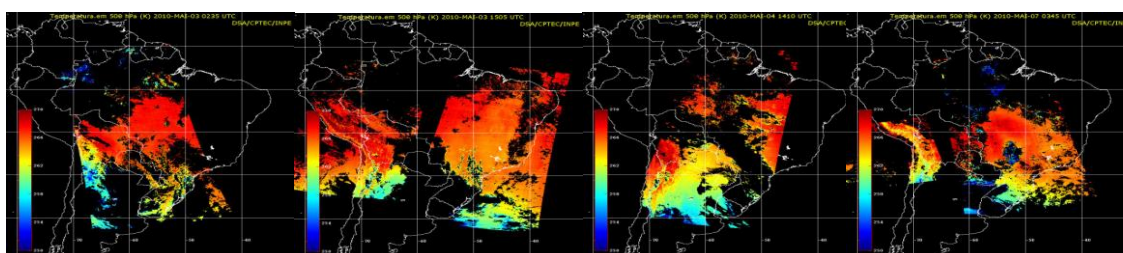
Atualmente diversos satélites estão em funcionamento com equipamentos capazes de realizar sondagens remotas. No Brasil, a DSA/CPTEC/INPE (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) utiliza os satélites das séries TIROS/NOAA (*Television Infrared Observation Satellite/National Oceanic and Atmospheric Administration*), TERRA e AQUA, além do GOES-10 (*Geostationaty Operational Enviromental Satellite*) para a criação de produtos

que estão disponíveis em sua página na internet. Os satélites da série TIROS/NOAA, TERRA e AQUA são de órbita polar, não oferecendo uma cobertura diária contínua sobre a América do Sul, dificultando uma possível aplicação ao *nowcasting*, por exemplo.

Tendo em vista as vantagens de se ter uma cobertura contínua de dados sobre a América do Sul, a DSA/CPTEC/INPE disponibiliza de forma operacional produtos de sondagens obtidos a partir do Algoritmo de Inferência de Perfis Termodinâmicos e de diversos satélites. Entre estes satélites, destaca-se o satélite Terra, que opera com radiômetros na faixa do infravermelho, o que impossibilita a realização da inferência de perfis termodinâmicos pixels cobertos por nebulosidade, que se não forem eliminadas do processo podem acarretar graves erros no produto final gerado pelo algoritmo.

O sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectoradiometer*), a bordo dos satélites AQUA e TERRA, não é essencialmente um sondador, mas possui canais com resolução espectral necessária para gerar sondagens. Para processamento é utilizado o pacote computacional IMAPP - *International MODIS/AIRS Processing Package*, desenvolvido pela NASA (Jet Propulsion Laboratory) e Universidade de Wisconsin. É utilizado arquivo de radiância e geolocalização como entrada de dados, gerando variáveis de sondagens: Temperatura de Superfície; Temperatura do Ar; Temperatura de Orvalho; Ozônio Total; Aqua Precipitável e Índices de Instabilidade (K, Totais e Levantamento) (Rodrigues et al., 2010, ver em Anexo A).

Exemplo do produto de sondagem do satélite Terra sobre a América do Sul é apresentadas na Figura 1. Observa-se que a cobertura do satélite não abrange todo o continente, mas apresenta uma boa resolução espacial, de modo que é possível verificar pequenas características.



**Figura 1.** Exemplo de passagem do satélite Terra sobre a América do Sul

## 2.4. Motivação do presente estudo

Existem índices de instabilidade que podem ser calculados a partir de perfis de temperatura e umidade que são indicativos da formação de eventos de tempo severo. Contudo, como a rede de estações meteorológicas de ar superior não tem uma distribuição temporal e espacial adequada para o acompanhamento do comportamento da termodinâmica da atmosfera, torna-se praticamente impossível a utilização de dados provenientes de radiossondagens para a realização de uma previsão de tempo em curto prazo (do inglês - *nowcasting*). Essa ausência de informações pode ser suprida a partir de sondagens obtidas por satélites (Mostek et al., 1986; Zehr et al., 1988), que com uma boa resolução espacial e temporal podem fornecer informações de grande valia para alertas em regiões com a possibilidade de formação de sistemas de tempestade intensos através da previsão de curtíssimo-prazo (*nowcasting*). O CPTEC-INPE vem inferindo perfis termodinâmicos utilizando diversas técnicas e sondadores a bordo de satélite. Neste contexto, o presente estudo tem o objetivo de desenvolver uma metodologia de avaliação dos perfis, para verificar o desempenho destes perfis. Esta avaliação é de extrema importância, pois os usuários dos perfis têm a informação das incertezas do produto e pesquisadores da área de sondagem podem aprimorar a técnica de inferência. Adicionalmente, o presente projeto tem o potencial de colaborar com o grupo internacional ATOVS (ref. <http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/overview/index.html>), o qual tem a missão de desenvolver ferramentas de sondagens. Essa colaboração é através da avaliação das ferramentas desenvolvidas no âmbito do ATOVS sobre a América do Sul.



### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Esta seção é dividida em duas partes. Na primeira parte, os dados utilizados neste estudo, que são constituídos de dados observados por radiossonda e dados inferidos via sensoriamento remoto, são apresentados. Na segunda parte, a metodologia desenvolvida neste estudo é introduzida.

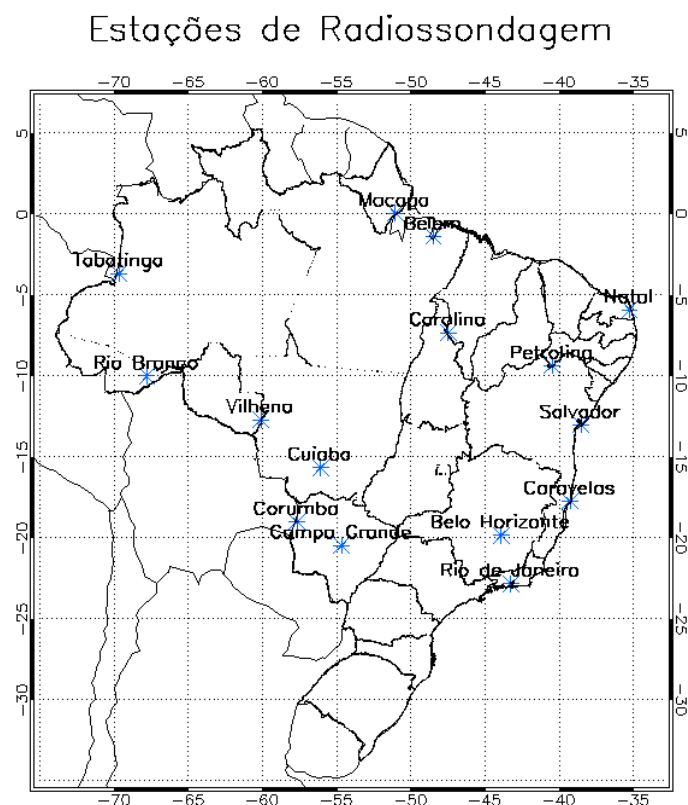
#### 3.1. Dados observacionais e inferidos

O presente estudo tem como objetivo avaliar a qualidade dos perfis termodinâmicos inferidos pelos sensores AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) e MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*). A avaliação é realizada através dos valores de temperatura e umidade utilizando medições de radiossondagens. Os dados inferidos são baseados em modelos de regressão estatística que a partir das radiâncias de céu claro observadas pelos sensores inferem o perfil (Costa et al., 2008). Os perfis termodinâmicos do MODIS são inferidos para 20 níveis de pressão (entre 1000hPa e 5hPa) com resolução espacial de 5km, enquanto os perfis do AIRS são inferidos para 100 níveis de pressão (entre 1100hPa e 0.01hPa) e apresenta resolução de 40 km (Souza e Ceballos, 2006).

A base de dados utilizada na avaliação compreende quinze localidades sobre o Brasil, onde ocorrem o lançamento diário de radiossonda (Figura 2). Os lançamentos de radiossonda sobre o território brasileiro ocorrem às 00 e 12 UTC, horário diferente das passagens dos satélites AQUA (05 e 17 UTC) e TERRA (03 e 15 UTC). Sendo assim, os critérios utilizados na formação das amostras para comparação foram de  $\pm 3$  horas de diferença de horário para o MODIS e de  $\pm 5$  horas de diferença de horário para o AIRS. Para compor a amostra, utilizou-se o píxel mais próximo das coordenadas geográficas do local de lançamento de radiossonda. O raio entre o centro do píxel amostrado e local de radiossonda era inferior de 50km. O critério mencionado dos horários utilizado está associado a disponibilidade dos dados. A diferença de horário da passagem do satélite e da radiossonda é levada em consideração nas análises dos

resultados. Adicionalmente, foram utilizados dados de pluviômetros para avaliar o possível efeito de convergência de umidade nos pares de amostra (radiossonda e satélite) que poderiam apresentar resultados distintos principalmente devido a diferença de horários.

A partir do conjunto de amostras foram calculados os seguintes coeficientes estatísticos: viés médio, Erro Médio Quadrático (ERMQ) e valores de correlação.



**Figura 2.** Estações de Radiossondagens utilizadas no estudo

### 3.2. Construção do método operacional de avaliação dos perfis inferidos

Neste estudo foram utilizados dados de radiossonda que são lançadas em aeroportos das principais capitais do Brasil, como apresentados na seção anterior, e dados dos perfis inferidos.

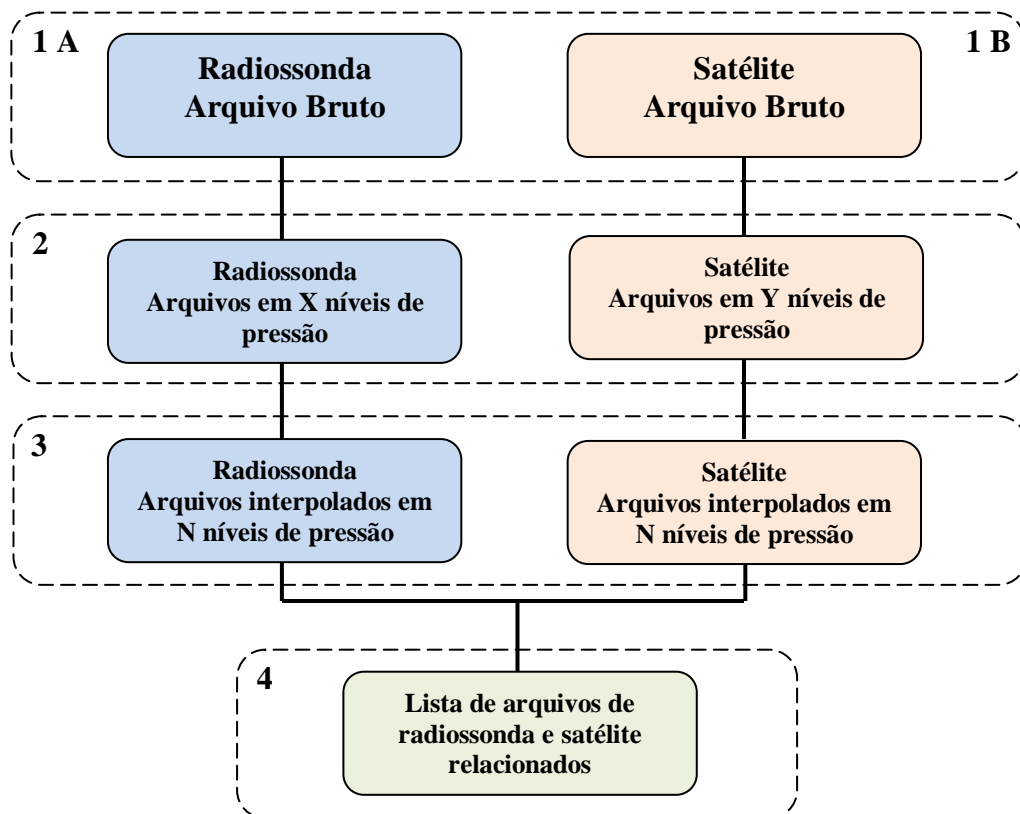
A Figura 3 ilustra a metodologia que esta sendo desenvolvida. A metodologia utilizada para a referida avaliação envolveu as seguintes etapas:

- i) Filtragem de arquivos de radiossonda e satélite levando em conta o horário, o número da estação da radiossonda e as coordenadas geográficas dos arquivos de satélite. Esta filtragem teve o objetivo de

criar uma lista com os pares de arquivos de radiossonda e satélite correspondentes

- ii) A partir dessa lista os arquivos puderam ser interpolados para os mesmos níveis de pressão atmosférica
- iii) Análises estatísticas para quantificar o desempenho dos perfis inferidos.

Para a realização das etapas descritas acima foram desenvolvidas algumas rotinas computacionais programadas em Fortran, R e shell script que são ferramentas livres e de código aberto (open source). Na próxima etapa do trabalho, espera-se que a metodologia proposta baseada em ferramentas “open source” irá substituir as ferramentas atuais que apresentam alto custo de manutenção.



**Figura 3.** Esquema ilustrativo da metodologia desenvolvida no presente estudo.

Observa-se que a metodologia apresenta 4 etapas, as quais são descritas abaixo.

Estágio 1 A: Fazer o download dos arquivos de radiossonda, e dividir os arquivos por estações nomeando-os conforme o padrão proposto.

Estágio 1 B : Fazer o download dos arquivos de satélite. Dado uma lista com as coordenadas geográficas das estações de radiossonda, extrair do arquivo

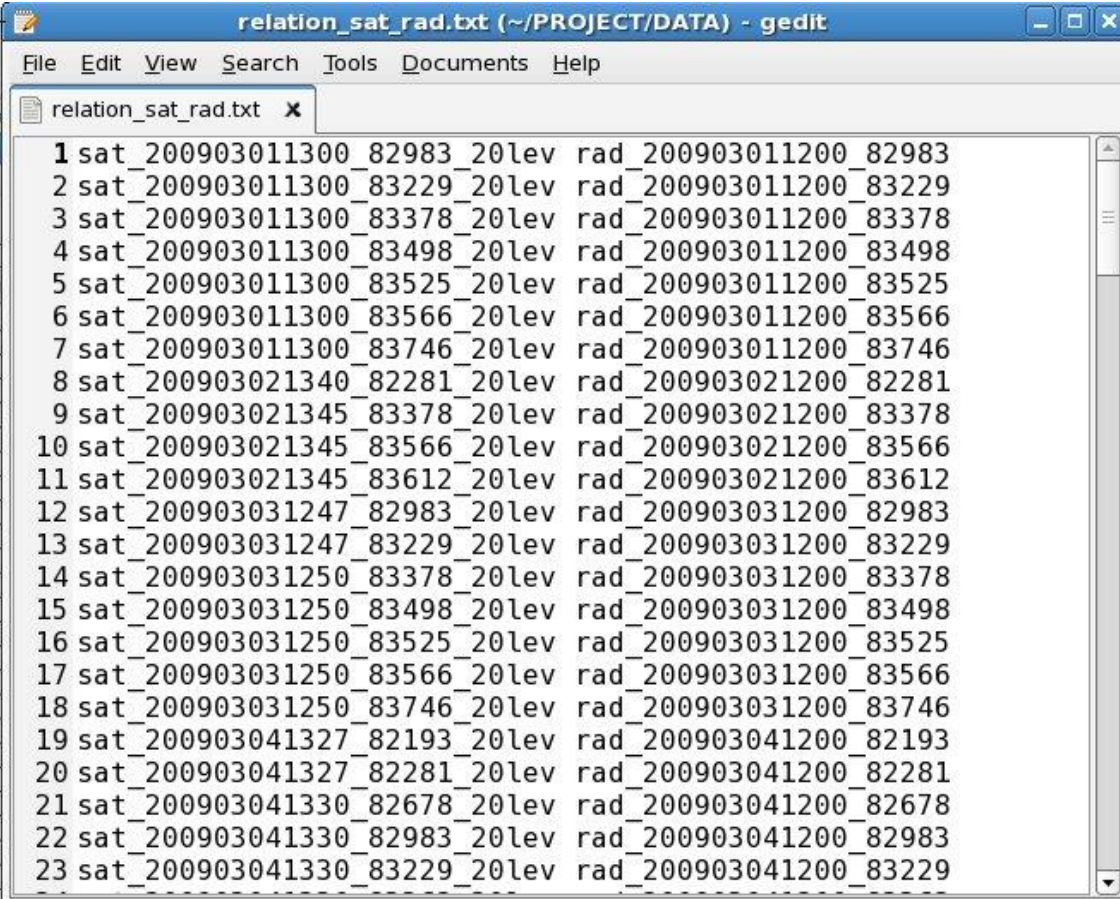
de satélite os pontos que mais se aproximam das coordenadas passadas. Nomear cada arquivo obtido de acordo com o padrão proposto.

Estágio 2 : Interpolar os níveis de pressão dos arquivos de satélite e radiossonda, para que ambos tenham o mesmo nível de pressão.

Estágio 3 : Dado um limite de tempo, selecionar os pares de arquivos de radiossonda e satélite correspondentes, considerando o número da estação de radiossonda e a data dos arquivos.

Estágio 4 : A partir da lista de pares ordenados de arquivos, fazer a análise estatística dos dados e plotagem de gráficos.

A Figura 4 mostra um exemplo dos pares ordenados dos arquivos de radiossonda e satélite, gerado como saída do programa desenvolvido em shell script.



```
relation_sat_rad.txt (~~/PROJECT/DATA) - gedit
File Edit View Search Tools Documents Help
relation_sat_rad.txt x
1 sat_200903011300_82983_20lev rad_200903011200_82983
2 sat_200903011300_83229_20lev rad_200903011200_83229
3 sat_200903011300_83378_20lev rad_200903011200_83378
4 sat_200903011300_83498_20lev rad_200903011200_83498
5 sat_200903011300_83525_20lev rad_200903011200_83525
6 sat_200903011300_83566_20lev rad_200903011200_83566
7 sat_200903011300_83746_20lev rad_200903011200_83746
8 sat_200903021340_82281_20lev rad_200903021200_82281
9 sat_200903021345_83378_20lev rad_200903021200_83378
10 sat_200903021345_83566_20lev rad_200903021200_83566
11 sat_200903021345_83612_20lev rad_200903021200_83612
12 sat_200903031247_82983_20lev rad_200903031200_82983
13 sat_200903031247_83229_20lev rad_200903031200_83229
14 sat_200903031250_83378_20lev rad_200903031200_83378
15 sat_200903031250_83498_20lev rad_200903031200_83498
16 sat_200903031250_83525_20lev rad_200903031200_83525
17 sat_200903031250_83566_20lev rad_200903031200_83566
18 sat_200903031250_83746_20lev rad_200903031200_83746
19 sat_200903041327_82193_20lev rad_200903041200_82193
20 sat_200903041327_82281_20lev rad_200903041200_82281
21 sat_200903041330_82678_20lev rad_200903041200_82678
22 sat_200903041330_82983_20lev rad_200903041200_82983
23 sat_200903041330_83229_20lev rad_200903041200_83229
```

**Figura 4.** Lista de pares ordenados de arquivos de dados de satélite e radiossonda.

A metodologia computacional desenvolvida para a realização do trabalho, o qual visa a comparação das estimativas de satélite e observações de radiossonda, envolveu um estudo sobre as ferramentas computacionais que estão

disponíveis na divisão (MATLAB, FORTRAN e IDL), depois outras ferramentas livres também foram estudadas (Octave, Scilab e R). Após uma breve análise, optou-se por priorizar o desenvolvimento das rotinas computacionais necessárias a partir de ferramentas e linguagens *open source*. As linguagens R e Shell script foram as que mais se adequaram às presentes necessidades.

A Tabela 1 descreve as ferramentas computacionais estudadas e conteúdos avaliados.

<b>Ferramenta computacional</b>	<b>Aspectos estudados</b>
Sistema operacional Linux	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Principais programas e comandos</li> </ul>
Shell Script	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Conceitos e definições</li> <li>● Breve histórico</li> <li>● Operações matemáticas</li> <li>● Estruturas de controle de fluxo</li> <li>● Vetores</li> <li>● Funções</li> <li>● Comparação entre a sintaxe do shell Bash e do C-Shell</li> <li>● Interfaces gráficas</li> <li>● Exercícios complementares.</li> </ul>
Matlab	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Introdução</li> <li>● Operações e expressões lógicas</li> <li>● Manipulação de arquivos</li> <li>● Plotagem de gráficos</li> </ul>
Octave e Scilab	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Análise dos principais recursos e características fundamentais</li> </ul>
IDL	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Definições básicas</li> </ul>
Fortran	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Introdução e conceitos básicos</li> <li>● Sintaxe e funções das versões Fortran 77 e Fortran 90</li> <li>● Laços condicionais</li> <li>● Manipulação de arquivos</li> <li>● Exercícios de fixação</li> </ul>
R	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Introdução e histórico</li> <li>● Principais características</li> <li>● Manipulação de arquivos</li> <li>● Laços condicionais</li> <li>● Funções</li> <li>● Plotagem e edição de gráficos</li> </ul>

**Tabela 1.** Ferramentas computacionais estudadas.

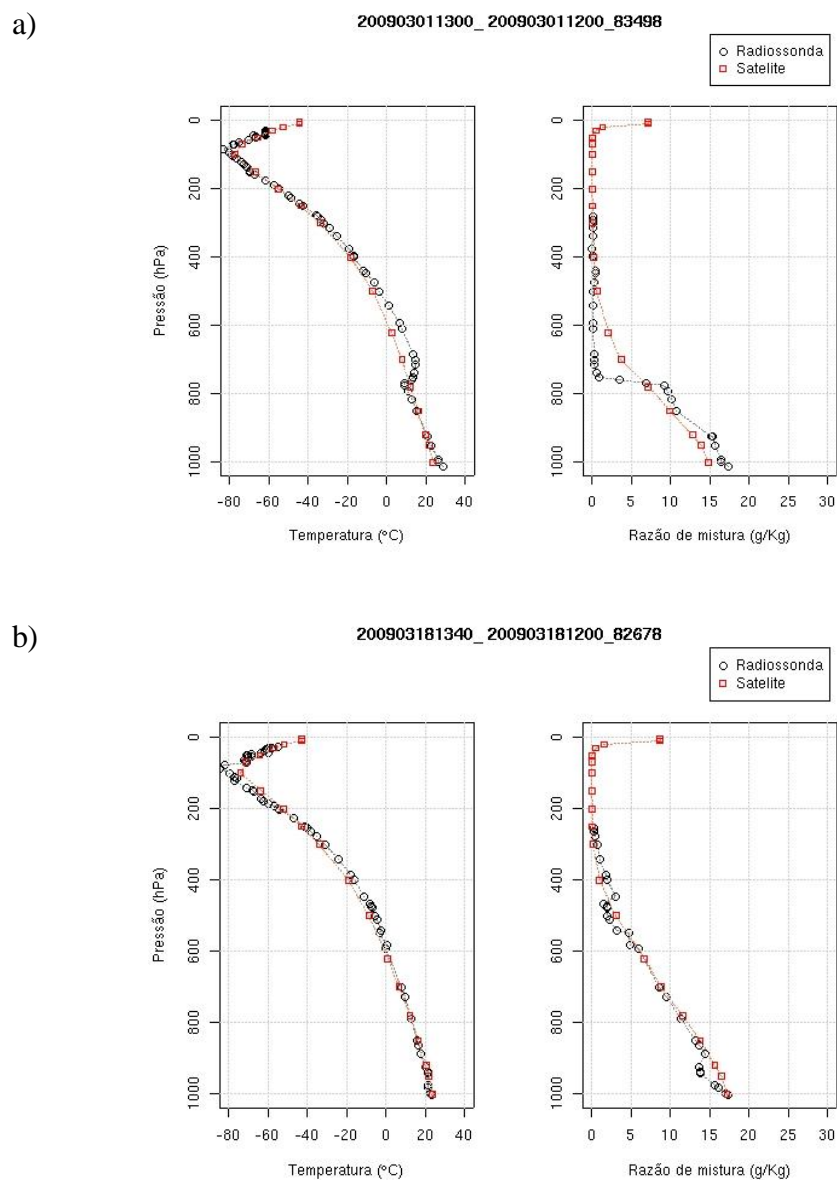
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados preliminares sobre a avaliação do desempenho do modelo de inferência utilizando a metodologia desenvolvida neste primeiro ano do projeto de Iniciação Científica.

A Figura 5 apresenta um exemplo da representação gráfica dos perfis termodinâmicos estimados pelo sensor MODIS/TERRA e observados por radiossonda. No contexto geral, observa-se que os dados inferidos apresentam uma boa concordância com os dados de radiossonda. No entanto, estruturas verticais finas, como exemplo a inversão de temperatura apresentada na Figura 5a), o método de inferência não consegue representar. No caso em que o perfil é mais linear e sem mudanças bruscas, como a Figura 5b) o método consegue um bom acordo. Esta deficiência do modelo em inferir inversão térmica está associada ao pequeno número de canais utilizados para inferir a variável naquele nível. Sugere-se que mais análises sejam realizadas para que possa dar subsídios à explicação da ineficiência do método. Estas análises são importantes serem avaliadas cuidadosamente, pois inversão térmica é um processo atmosférico que deve ser bem observado dado sua importância na meteorologia.

As análises estatísticas dos valores de umidade e temperatura observados por radiossondas e inferidos pelos sensores MODIS/TERRA foram baseadas nos cálculos de correlação, viés e raiz do erro médio quadrático (REM<sub>Q</sub>) e que estão apresentados na Tabela 2 e Figuras 6 - 7. As amostras de dados assumem critérios de diferença de horário (+/- 3 horas) e de distância espacial (menor 50 km). Estes critérios foram assumidos devido a disponibilidade de dados. A análise estatística utilizada para validação dos valores de umidade do sensor MODIS mostra que o coeficiente de correlação entre os valores inferidos por este sensor e as radiossondagens foi em média de 0.7, possuindo valores maiores próximo na superfície e na média troposfera. O viés e REM<sub>Q</sub> apresentados na comparação entre o sensor MODIS e as radiossondagens apresentam valores menores (mais próximos) na alta troposfera em relação a baixa troposfera, isto se deve a diferença quantitativa de umidade dessas camadas, visto que a baixa troposfera sofre muito mais com o efeito da superfície (evaporação) do que a alta

troposfera. E este efeito parece que não é bem amostrado pelo o método de inferência quando comparado com a radiossonda. No entanto, é importante lembrar que o valor de razão de mistura utilizado apresenta uma resolução de 4 km, e sendo assim deve ser interpretado como um valor amostrado médio naquela resolução inferida. Umidade é um elemento que apresenta grande variabilidade espacial e temporal, de modo que a escala espacial deve ser considerada quando comparada com um valor local, como é o caso das radiossondas.



**Figura 5.** Perfis verticais de temperatura e razão de mistura estimados pelo sensor MODIS/TERRA e observados por radiossonda.

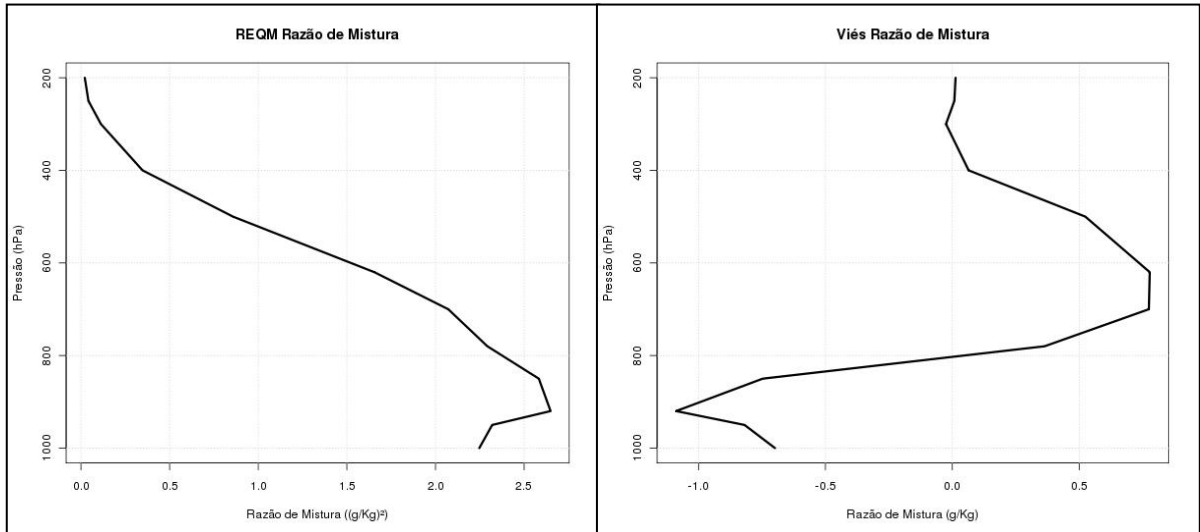
A mesma análise feita para a razão de mistura foi utilizada para a variável temperatura do ar. Os coeficientes de correlação entre o MODIS e as radiossondagens são superiores a 0.6, exceto para o nível de 200 mbar; o viés e o REMQ, assim como para razão de mistura apresentaram valores menores na alta troposfera, isto se deve ao maior gradiente de temperatura que se encontra próximo a superfície, que pode ser rapidamente alterado quando afetado por sistemas transientes, lembrando que há uma pequena diferença de horários e para este caso pode ser significativa.

A Figura 8 apresenta exemplos dos gráficos de dispersão de temperatura para três diferentes níveis de pressão (1000, 500 e 250 mbar). Observa-se que existe um bom acordo entre as temperaturas estimadas pelo sensor MODIS e observadas por satélite. Este é um aspecto interessante, pois o sensor MODIS não é um sondador, designado a inferência de perfis. Porém este sensor apresenta canais centrados nos comprimentos de onda do infravermelho, permitindo estimar a temperatura e umidade. A princípio, esperava-se que este sensor apresentaria melhor desempenho do que atualmente apresenta. As maiores diferenças entre os dados inferidos via sensores a bordo de satélite e observados estão possivelmente associadas a diferença de horários dos pares (satélites e radiossonda), e também devido parametrização física do método de inferência que precisa ser melhor adaptada para a América do Sul.

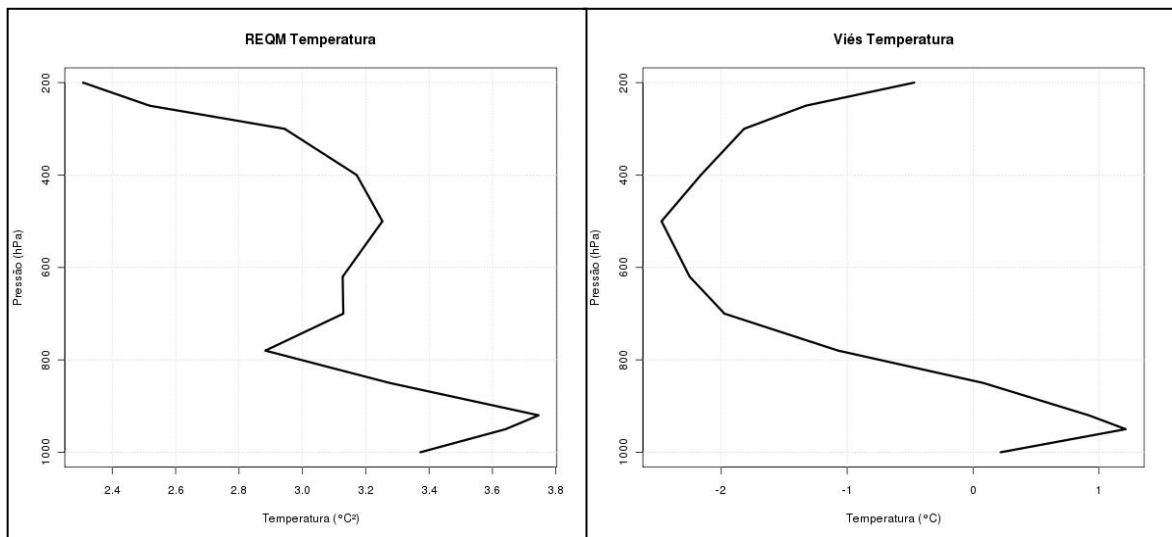
**Tabela 2** – Coeficientes de Correlação da avaliação satélite versus radiossondagem para a temperatura e razão de mistura em diversos níveis de pressão (em hPa) de estudo.

<i>Níveis de pressão (hPa)</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Razão de Mistura</i>
1000	0.7887	0.68908
950	0.7005	0.56624
920	0.6122	0.48102
850	0.6140	0.4042
780	0.6563	0.42952
700	0.6558	0.33363
620	0.7143	0.12572
500	0.8038	-0.04895
400	0.8189	-0.04552
300	0.8169	0.0347
250	0.7557	0.00832
200	0.1151	0.17701



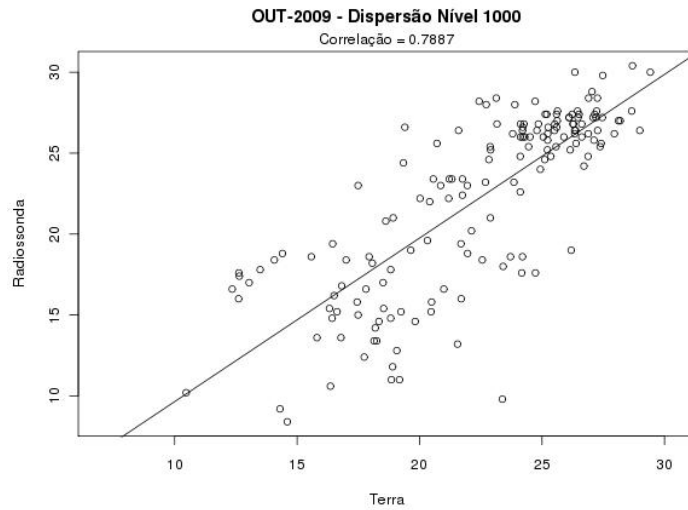


**Figura 6.** Valores de REQM (a) e Viés (b) para dados observados de razão de mistura (g/Kg)

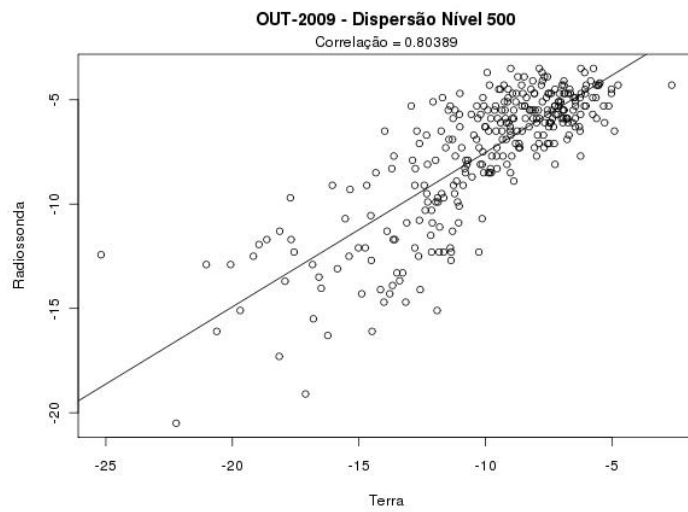


**Figura 7.** Valores de REQM (a) e Viés (b) para dados observados de temperatura (g/Kg)

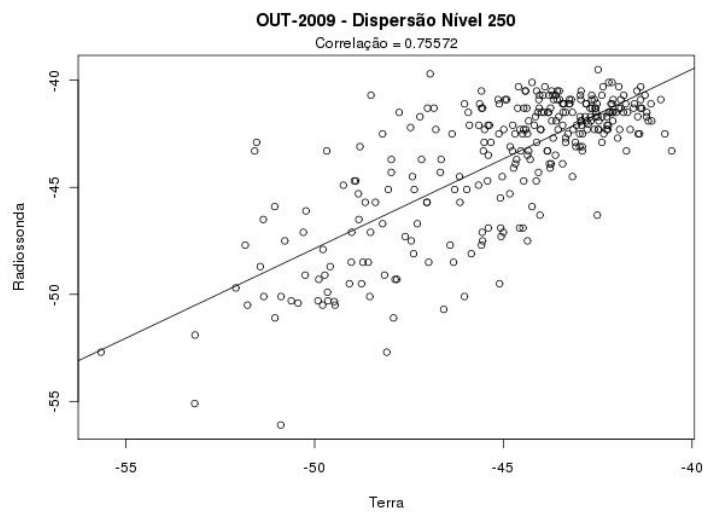
a)



b)

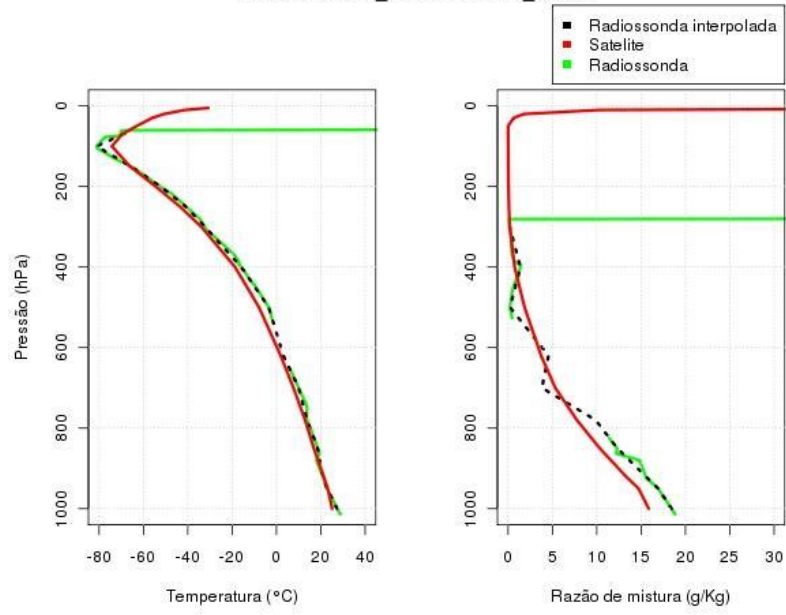


c)



**Figura 8.** Gráficos de dispersão de temperatura em três níveis de pressão a) 1000, b) 500 e c) 250 mbar.

200910011357\_200910011200\_82099



**Figura 9.** Perfis verticais de temperatura e razão de mistura estimados pelo sensor MODIS/TERRA e observados por radiossonda bruta e radiossonda interpolada em 20 níveis.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao estudo do desempenho das sondagens atmosféricas, até o presente momento o projeto foi desenvolvido utilizando arquivos de temperatura e umidade do sensor MODIS do satélite TERRA, posteriormente a mesma metodologia será aplicada aos arquivos do sensor AIRS do satélite AQUA. Resultados preliminares mostram que o sensor MODIS, tem a tendência de superestimar os valores umidade na atmosfera em relação aos dados de radiossonda, porém apresentam alta correlação ( $R > 0.7$ , 300 amostras). O perfil de umidade apresenta erros maiores quando a atmosfera está mais seca. Em termos da temperatura, os valores estimados apresentam um bom acordo com os dados de radiossonda, exceto a superfície. Os erros dos perfis na superfície indicam que os processos físicos à superfície devem ser melhores descritos no modelo de inferência. Importante notar que análises detalhadas precisam ser realizadas para se entender melhor e principalmente explicar as diferenças entre os perfis inferidos e observados. Os próximos estágios deste projeto de Iniciação Científica incluirão a análise da qualidade dos perfis inferidos via sensor AIRS utilizando os dados de radiossonda e a metodologia apresentada neste estudo. Neste contexto, futuras análises do sistema metodológico será adaptado para funcionar de maneira operacional. Adicionalmente, o estudo de avaliação deverá ser realizado utilizando um maior número de amostras.

Luiz Henrique Gonçalves  
Bolsista PIBIC

Dra. Simone Sievert da Costa  
Orientadora

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CINTRA, R. S. C.; LIMA, W. F.; ESPINOZA, E. S.; VELHO, H. F. C. Inclusão de dados ATOVS no sistema de assimilação de dados GPSAS do CPTEC. **In: Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 2005.

COSTA, S. M. S. ; Rodrigues, J. V. ; GONCALVES, W. A. ; SOUZA, R. A. F. . Performance of sounding retrievals from AIRS, GOES10, MODIS and HIRS Radiances during Mini-Barca campaign June 2008. In: XIV - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. XIV - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos : INPE, 2009. v. unico.

LI, J.; HUANG, H. L. Retrieval of atmospheric profiles from satellite sounder measurements by use of the discrepancy principle. **Applied Optics**, v. 38, n. 6, p. 916-923, 1999.

MINISTÉRIO DA DEFESA COMANDO DA AERONÁUTICA, Manual de Estações Meteorológicas de Altitude, 2007.

MOSTEK, A., UCCELINI, L. W., PETERSEN, R. A., CHESTERS, D. Assessment of VAS soundings in the analysis of a preconvective environment. **Monthly Weather Review**, v. 114, p. 62-87, 1986.

SOUZA, R. A. F. ; CEBALLOS, Juan Carlos . Análise de desempenho de diferentes sistemas de sondagem sobre Rondônia durante o experimento RACCI/LBA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 129-141, 2006.

WARK, D.Q.; FLEMING, H.E. Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites: Introduction. **Monthly Weather Review**, v.94, n.1, p. 351-362, 1966.

ZHER, R. M.; PURDOM, J. F. W.; WEAVER, J. F.; GREEN, R. N. Use of VAS Data to Diagnose the Mesoscale Environment of Convective Storms. **Weather and Forecasting**, v.3, p. 33-49, 1988.

# ANEXO A: ARTIGO SUBMETIDO AO CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA

## Sondagens e Gases Atmosféricos derivados a partir de Dados de Satélites: Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na DSA-CPTEC/INPE

Jurandir Ventura Rodrigues 1, Ramon Campos Braga 1, Simone Sievert da Costa 1, Luiz Henrique Gonçalves 1, Weber Andrade Gonçalves 1, Rodrigo Augusto Ferreira de Souza 2, Glauber Lopes Mariano 1

1 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Caixa Postal 01 – 12630000 - Cachoeira Paulista - SP, Brasil, {jurandir.rodrigues, simone.sievert, weber.goncalves, luiz.goncalves, ramon.braga, glauber.mariano}@cptec.inpe.br

2

Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Manaus - AM, Brasil, souzaraf@gmail.com

**ABSTRACT:** Knowledge of temperature and humidity field distribution is essential for a wide variety of applications, such as meteorological weather forecast, data assimilation and nowcasting. In order to provide temperature and humidity fields, retrieval schemes based on the radiances observed by satellite have been developed and freely distributed to the meteorological centers. This work aims to show the availability of the thermodynamics and gases data generated from different satellite radiances sensors (AIRS, GOES10, MODIS and HIRS). Additionally, it aims to present some preliminary results on the evaluation of clear sky sounding retrievals operationally processed at DSA-CPTEC/INPE.

**Palavra-chave:** Inferência de sondagens e gases atmosféricos, Perfis termodinâmicos

**1 - INTRODUÇÃO:** Atualmente, os satélites meteorológicos têm contribuído significativamente na detecção, observação e assimilação de parâmetros atmosféricos. A Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) pertence ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e gera vários produtos a partir de informações de satélite. Neste trabalho serão destacados os produtos de sondagens, os quais englobam perfis verticais de temperatura, umidade e concentração de gases atmosféricos. O objetivo é mostrar o método de inferência, a disponibilidade de dados e área de cobertura do satélite. No decorrer desse trabalho serão mencionados alguns resultados do Grupo de Sondagens da DSA-CPTEC que trouxeram números importantes na avaliação dos produtos.

**2 - MATERIAL E MÉTODOS:** A Tabela 1 mostra resumidamente as especificações dos satélites, sensores e pacotes computacionais utilizados na DSA para inferência dos perfis termodinâmicos. As antenas para recepção dos dados dos satélites AQUA e TERRA estão localizadas em Cuiabá, e aquelas dos satélites NOAA18 e GOES situam-se em Cachoeira Paulista, na DSA. As seções 2.1 – 2.5, apresentam breve descrição de cada produto operacional.

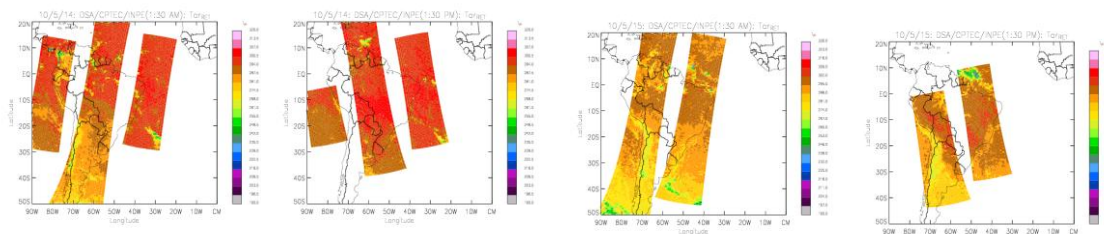
**Tabela 1** – Sensor do satélite e esquema operacional utilizado em perfis verticais na DSA-CPTEC/INPE.

Características técnicas	Sensor de inferência de sondagens e algoritmos de processamento					
	AQUA	NOAA18	AQUA	GOES10	AQUA	TERRA
Satélite	AQUA	NOAA18	AQUA	GOES10	AQUA	TERRA
Sensor	AIRS	HIRS	AIRS	GOES-Sounder	MODIS	MODIS
Órbita	Polar	Polar	Polar	Geoestacionário	Polar	Polar
Resolução Espacial do Produto (Km)	50	100	50	10	5	5
Passagem do satélite	~ 5 e 17 UTC	~ 3, 5, 16 e 18 UTC	~ 5 e 17 UTC	1H /setor (A.Sul = 4 setores)	~ 5 e 17 UTC	~ 2, 14 e 15 UTC
Esquema do Modelo de Inversão	NASA Susskind (2003)	IAPP (Li ET al., 2000)	IMAPP v5.2.1 U.Wisc.	Ma et al., 1999 algoritmo	IMAPP – MODIS (MYD07)	IMAPP – MODIS (MOD07)
N. de níveis recuperados	100	42	28;100	40	20	20
N. de canais recuperação	2378(20)	20	27	19 (18)	36 (12)	36 (12)

First Guess	NCEP (gblav)	Regressã o	Regressão	CPTEC Global Model T213L42	Regressão	Regressã o
<b>Localização da Antena de Recepção</b>	-	Cach.Pta Lat:-22.68 Lon:-45.00	Cuiabá Lat:-15.90 Lon:-56.1	Cach.Pta Lat:-22.68 Lon:-45.00	Cuiabá Lat:-15.90 Lon:-56.1	Cuiabá Lat:-15.90 Lon:-56.1
<b>Dt.Início do Produto Dt.Final do Produto</b>	08/2005	10/2006	04/2007	07/2007 02/2009	09/2007	09/2007

## 2.1 - AQUA-AIRS-NASA

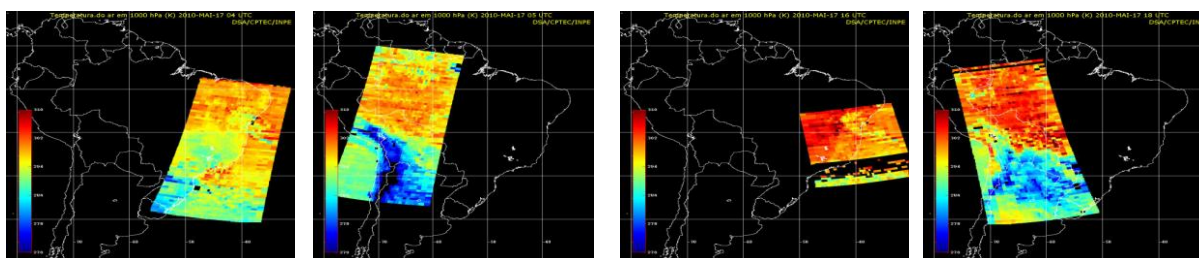
O modelo usado para inferência deste produto foi desenvolvido por Chris Barnet (2003). Este modelo permite derivar diversas variáveis atmosféricas ( Temperatura da Superfície; Nebulosidade; Água líquida; Pressão do topo de nuvem; Temperatura do ar; Água Precipitável; Tropopausa), incluindo os gases atmosféricos de efeito estufa (CO, CO2, O3, NO. O produto utiliza basicamente 3 dados no processamento: arquivos de radiâncias nível 1B da NASA dos sensores AIRS (*Advanced Infrared Sounder*), AMSU (*Advanced Microwave Sounding Unit*) e a condição inicial proveniente das análises do NCEP denominado GBLAV. Utiliza-se um método estatístico e o algoritmo denominado RTA (*Rapid transmittance algorithm*). A Figura 1 mostra a cobertura do satélite AQUA, onde ocorre certa variação por conta da órbita do satélite polar.



**Figura 1.** Exemplo de passagem do satélite AQUA (quase polar) sobre a América do Sul

## 2.2 - AQUA-AIRS-IMAPP

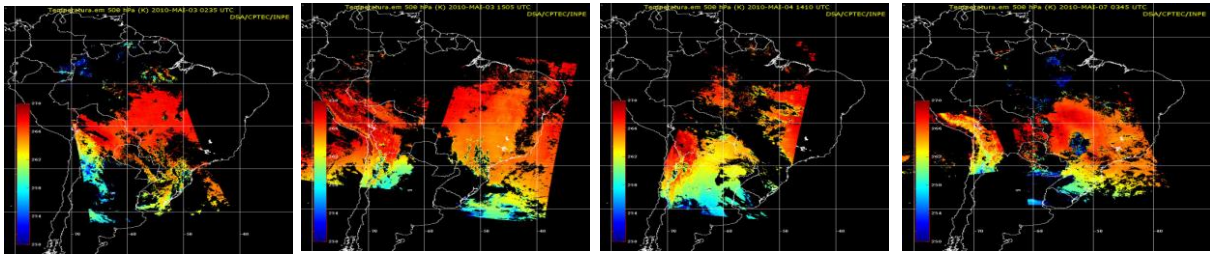
Desenvolvido pela Universidade de Wisconsin/NASA e adaptado para América do Sul, utiliza os arquivos de dados brutos ingestados pela antena de Cuiabá. A Figura 1 mostra a cobertura realizada nas passagens do satélite Aqua para esse produto. O processamento utiliza o pacote computacional IMAPP - *International MODIS/AIRS Processing Package*, especificamente para atender os dados do sensor AIRS. É derivado operacional do Sistema de Observação da Terra, software desenvolvido pela NASA (Jet Propulsion Laboratory) e Universidade de Wisconsin. NASA inversion model – é um processo de inversão baseado fisicamente para recuperação de sondagens combinado com medidas de radiância AIRS, microonda e infravermelho. Gera arquivos de sondagens contendo as seguintes variáveis: Água Precipitável; Altura na Tropopausa; Concentração CO; Nebulosidade; Pressão do Topo de Nuvem; Temperatura da Superfície e Temperatura do Ar.



**Figura 3.** Exemplo de passagem do satélite AQUA sobre a América do Sul

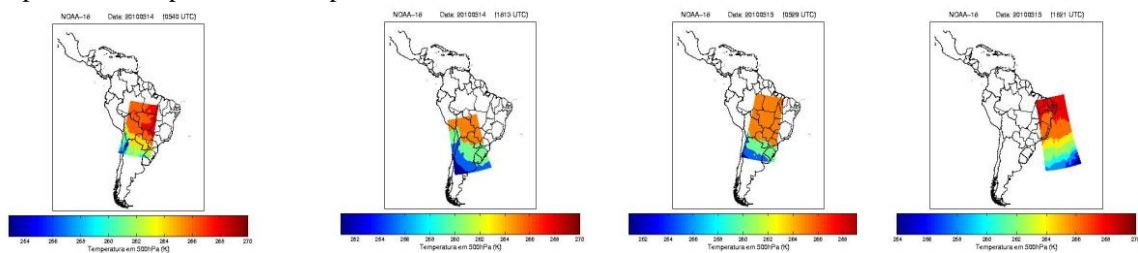
## 2.3- PRODUTOS MODIS – AQUA e TERRA

O sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites AQUA e TERRA, não é essencialmente um sondador, mas possui canais com resolução espectral necessária para gerar sondagens. Para processamento é utilizado o pacote computacional IMAPP - *International MODIS/AIRS Processing Package*, desenvolvido pela NASA (Jet Propulsion Laboratory) e Universidade de Wisconsin. É utilizado arquivo de radiância e geolocalização como entrada de dados, gerando variáveis de sondagens: Temperatura de Superfície; Temperatura do Ar; Temperatura de Orvalho; Ozônio Total; Água Precipitável e Índices de Instabilidade (K, Totais e Levantamento).



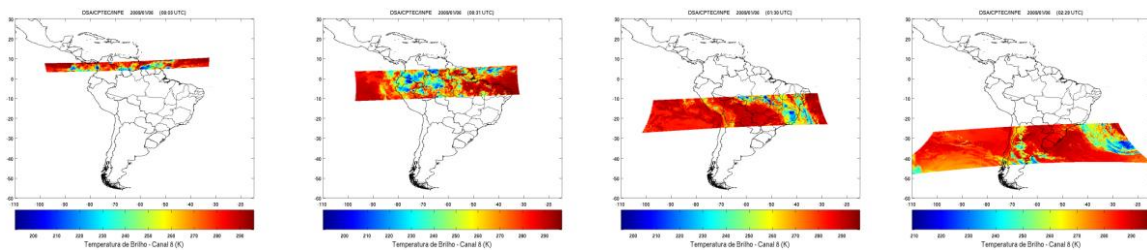
**Figura 6.** Exemplo de passagem do satélite Terra sobre a América do Sul

**2.4 - NOAA-18:** Utiliza o pacote computacional IAPP (*International ATOVS Processing Package*), que recupera os parâmetros atmosféricos em 4 etapas: detecção e remoção de nuvens, ajuste de baías, recuperação de regressão e recuperação física não-linear. Utiliza dados de entrada: HIRS (nível L1D), dados de modelo de previsão, observações de superfície e dados de topografia. Gera arquivos de sondagens contendo as seguintes variáveis: Temperatura do ar; Umidade; Total de Ozônio; Água Precipitável e Temperatura da Superfície.



**Figura 2.** Exemplo de passagem do satélite NOAA18 sobre a América do Sul

**2.5 - GOES-10/12:** É um satélite de órbita Geoestacionária. A cada hora é gerada a passagem cobrindo por setor até completar a América do Sul. Não ocorre grande variação de cobertura como o caso dos satélites polares, conforme mostra a Figura 4. O Sondador GOES10 foi desenvolvido por CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*), baseado em um algoritmo físico não-linear. Usa um *first-guess* de temperatura e perfil de vapor de água obtido de um espaço-tempo e interpolação dos campos fornecidos pelo modelo de previsão do CPTEC. Este algoritmo usa um método iterativo não-linear Newtonian para encontrar a melhor solução para a inversão da equação de transferência radiativa. Gera produtos de Temperatura, Razão de Mistura.



**Figura 4.** Exemplo de passagem do satélite GOES10 sobre a América do Sul

**3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A seção 3.1 apresenta breve descrição do desempenho dos produtos de sondagens

**3.1 Dados gerados no Grupo de Sondagens:** Utilizando dados de radiossonda da Campanha Minibarca sobre a região Amazônica, Costa et al., (2008) mostra que no geral os produtos gerados pelos diversos pacotes da DSA empregados para inferir perfis termodinâmicos sobre a América do Sul apresentam um bom acordo com os dados de radiossonda. Naquele estudo, destacou-se o pacote computacional IMAPP-AIRS, o qual apresentou o melhor desempenho na maioria dos níveis de pressão. Este sistema de inferência permite observar com precisão estruturas bem definidas, como inversão de temperatura. O trabalho de Gonçalves et al. (2008), mostra que os totais de água precipitável gerados a partir de perfis termodinâmicos do GOES apresentam bias por volta de 2 g/Kg e correlação de 0.81 com dados de radiossonda. O esquema de inferência do GOES apresenta boa qualidade para sondagens de temperatura. Embora os erros em umidade sejam consideravelmente pequenos para GOES10, a correlação entre



radiossonda e perfil é baixa ( $R < 0,5$ ), entre 700 e 1000 mbar. De acordo com Gonçalves et al., 2008, a atualização da matriz de covariância do GOES10 para a região sobre a Amazônia é essencial para melhoria na qualidade dos perfis. Braga et al. (2010) avaliou a qualidade dos dados de água precipitável inferidos via os sensores AIRS e MODIS que estão a bordo dos satélites AQUA e TERRA, respectivamente. As comparações mostram que os valores do AIRS e MODIS possuem ERMQ inferiores a 15 mm sobre o Brasil. Com respeito ao viés e a valores de correlação, o MODIS apresentou valores maiores do que o AIRS. A correlação do MODIS é de 0.85 versus a do AIRS de 0.67. Estes estudos mostram que os campos de água precipitável e os perfis termodinâmicos inferidos via satélite apresentam uma boa qualidade sobre o Brasil, de modo que podem ser usados na avaliação do estado termodinâmico da atmosfera. Adicionalmente, a qualidade dos dados meteorológicos obtidos por sensores orbitais permitem utilizá-los juntamente com os dados observados e ampliar o monitoramento da atmosfera em regiões remotas, onde existem limitações de dados observacionais.

**3.2 Atividades de Pesquisa e Operacional:** O Grupo de Sondagens desenvolve validação mensal do Produto MODIS-Terra a partir de dados de superfície, com objetivo de estender para os outros produtos de satélite AQUA, NOAA e GOES. A cada mês será apresentada a validação utilizando-se dados de radiossonda processados pelo CPTEC, nos horários de 00 e 12 UTC.

Está sendo desenvolvido um processo de geração de gráficos Skill-T para plotagem dos pontos abrangentes pela cobertura do satélite, inicialmente para o produto do satélite NOAA18 e futuramente para os outros produtos de sondagens da DSA. Essa opção contribuirá para as análises de perfil de Temperatura, Temperatura em Ponto de Orvalho e índices de instabilidade. Outro foco importante será a interação desses dados em modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo) do CPTEC.

**4 – CONCLUSÕES:** Os esforços do grupo de sondagens também têm colaborado no aprimoramento de algoritmos de inferência de sondagens através de interação com os Centros Educacional, Tecnológico e Científico internacional como Universidade de Wisconsin, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NOAA ([National Oceanic and Atmospheric Administration](#)) e CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*). Estas colaborações têm agregado experiências importantes para os trabalhos do Grupo de Sondagens.

A partir de junho/2010 será implementado o produto de Sondagens utilizando o satélite GOES12, em substituição ao GOES10 encerrado em fevereiro/2009, trazendo várias expectativas para o Grupo de Sondagens. Cada satélite e sensor com as particularidades de resolução espacial, temporal, radiométrica e cobertura de área, sendo polar ou geoestacionário, busca suprir as necessidades de melhoria da confiabilidade dos produtos de sondagens e gases atmosféricos obtidos via satélite, confrontando com dados de superfície, obtendo maior benefício na Assimilação de Dados e Previsão de Tempo.

## 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Gonçalves, W. A.; Costa, S.M.S; Rodrigues, J.V.; Souza, R.A.F.; Angelis, C. F: Validação dos totais de água precipitável gerados a partir de perfis termodinâmicos recuperados pelo satélite GOES-10 sobre a região tropical da América do Sul. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2008.

Costa, S.M.S; Rodrigues, J.V.; Gonçalves, W. A.; Souza, R.A.F.: Performance of sounding retrievals from AIRS, GOES10, MODIS and HIRS Radiances during Mini-Barca campaign – June 2008. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2008.

Susskind, J., C.D. Barnet, and J.M. Blaisdell, "Retrieval of Atmospheric and Surface Parameters from AIRS/AMSU/HSB Data in the Presence of Clouds," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, No. 2, 2003.

Rudorff, Bernardo F.T., Shimabukuro, Yosio E., Ceballos, Juan C., "O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil", Vol. 1, No.1-21, 68-69,317-328, 2007

Página de Sondagens, Disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/sondagens/>. Acesso em: 28 de maio de 2010