

INPE-8348 – PUD/50

**Ministério da Ciência e Tecnologia  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**



10 a 14 de julho de 2000

**INPE  
São José dos Campos - SP**



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

# **TERCEIRO SEMINÁRIO SOBRE MEIO AMBIENTE E USO DE TECNOLOGIAS ESPACIAIS PARA PROFESSORES DE ENSINO FUNDAMENTAL E MÉDIO**

**Bernardo F. T. Rudorff  
Eduardo Fábio de Carvalho Loyolla  
Elisabete Caria Moraes  
Evlyn M. L. de Moraes Novo  
Flávio Jorge Ponzoni  
Gilvan Sampaio de Oliveira  
Iara R. C. A Pinto  
José Antonio Marengo  
José Carlos Neves Epiphânio  
Lênio Soares Galvão  
Marcelo M. F. Saba  
Maurício Alves Moreira  
Milton Campbel  
Nelson Jesus Ferreira  
Osmar Pinto Júnior  
Paulo Roberto Martini  
Plínio Carlos Alvalá  
Sérgio Henrique Soares Ferreira  
Teresa Galloti Florenzano**

**INPE  
São José dos Campos  
2000**

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Coordenadoria de Ensino, Documentação e Programas Especiais**

Atividade de Treinamento e Difusão de Conhecimentos em Ciência e Tecnologia Espacial

Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja

12227-010 - São José dos Campos, SP

Tel.: (012) 345.6862

**Organização das apostilas:**

Ana Cristina Machado Rodríguez

João Ávila

**Agradecimento:**

Ao Serviço de Informação e Documentação do INPE, pelas sugestões feitas quanto às normas de publicação.

## **APRESENTAÇÃO**

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, objetivando tornar o professor de ensino fundamental e médio multiplicador natural das tecnologias espaciais junto a suas unidades de ensino e à sociedade, apresenta neste documento um amplo material atualizado que servirá de apoio e complementação ao desenvolvimento de diversas disciplinas de acordo com os novos parâmetros curriculares.

A realização do III Seminário sobre Meio Ambiente e Uso de Tecnologias Espaciais para Professores de Ensino Fundamental e Médio, na cidade de São José dos Campos, SP, espelha o esforço conjunto de toda a equipe de organização e do corpo docente, bem como de todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a sua concretização. Em especial, deve ser ressaltado o apoio dos nossos patrocinadores que viabilizaram este evento.

Esperamos que este evento incentive a interação das instituições de ensino fundamental e médio com as atividades de pesquisa deste Instituto, proporcionando aos alunos uma maior conscientização das novas idéias e novas tecnologias.

**SEJAM TODOS BEM-VINDOS!**

**Elisabete Caria Moraes**  
Coordenadora do Evento

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> <b>SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO</b> ( <i>José Carlos Neves Epiphânio</i> ) .....	1 - 1
<b>CAPÍTULO 2</b> <b>FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO</b> ( <i>Elisabete Caria Moares</i> ) .....	2 - 1
<b>CAPÍTULO 3</b> <b>APLICAÇÕES DE SATÉLITES METEOROLÓGICOS</b> ( <i>Nelson Jesus Ferreira</i> ) .....	3 - 1
<b>CAPÍTULO 4</b> <b>TEMPESTADES E RELÂMPAGOS</b> ( <i>Marcelo M. F. Saba, Osmar Pinto Júnior e Iara R. C. A. Pinto</i> ) .....	4 - 1
<b>CAPÍTULO 5</b> <b>PREVISÃO DO TEMPO</b> ( <i>Sérgio Henrique Soares Ferreira</i> ) .....	5 - 1
<b>CAPÍTULO 6</b> <b>FENÔMENOS EL NIÑO E LA NIÑA</b> ( <i>Gilvan Sampaio de Oliveira</i> ) .....	6 - 1
<b>CAPÍTULO 7</b> <b>MEIO AMBIENTE E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS</b> ( <i>Eduardo Fábio de Carvalho Loyolla</i> ) .....	7 - 1
<b>CAPÍTULO 8</b> <b>CAMADA DE OZÔNIO</b> ( <i>Plínio Carlos Alvalá</i> ) .....	8 - 1
<b>CAPÍTULO 9</b> <b>MONITORAMENTO DA COBERTURA VEGETAL ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITES</b> ( <i>Flávio Jorge Ponzoni, Evelyn M. L. de Moraes Novo e Lênio Soares Galvão</i> ) .....	9 - 1
<b>CAPÍTULO 10</b> <b>ATLAS DOS REMANESCENTES FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA</b> ( <i>Flávio Jorge Ponzoni</i> ) .....	10 - 1

<b>CAPÍTULO 11</b> <b>MONITORAMENTO OCEÂNICO POR TECNOLOGIA ESPACIAL</b> ( <i>Milton Campbel</i> ) .....	11 - 1
<b>CAPÍTULO 12</b> <b>ÁGUA: RECURSOS RENOVÁVEIS</b> ( <i>Evlyn M. L. de Moraes Novo</i> ) .....	12 - 1
<b>CAPÍTULO 13</b> <b>IMAGENS PARA MAPEAMENTO GEOLÓGICO E LEVANTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS: RESUMO PARA USO DOS CENTROS DE ATENDIMENTO A USUÁRIOS - ATUS DO INPE</b> ( <i>Paulo Roberto Martini</i> ) .....	13 - 1
<b>CAPÍTULO 14</b> <b>SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À GEOGRAFIA</b> ( <i>Teresa Galloti Florenzano</i> ) .....	14 - 1
<b>CAPÍTULO 15</b> <b>SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA</b> ( <i>Maurício Alves Moreira e Bernardo F. T. Rudorff</i> ) .....	15 - 1
<b>CAPÍTULO 16</b> <b>SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL</b> ( <i>Lênio Soares Galvão</i> ) .....	16 - 1
<b>CAPÍTULO 17</b> <b>PANAMAZÔNIA: O DOMÍNIO DA FLORESTA AMAZÔNICA NA AMÉRICA DO SUL</b> ( <i>Paulo Roberto Martini</i> ) .....	17 - 1
<b>CAPÍTULO 18</b> <b>CONCEITOS GERAIS DO CLIMA E DO EFEITO ESTUFA NA MUDANÇA CLIMÁTICA (PARTE I E II)</b> ( <i>José Antonio Marengo</i> ) .....	18 - 1

# **CAPÍTULO 1**

## **SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO**

**José Carlos Neves Epiphani<sup>o</sup>**

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE**

---

E.mail: [epiphani@ltid.inpe.br](mailto:epiphani@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>1-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>1-7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1-9</b>
<b>2. CARACTERÍSTICAS ORBITAIS DOS SATÉLITES .....</b>	<b>1-10</b>
2.1 ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA .....	1-10
2.2 ÓRBITA BAIXA .....	1-11
<b>3. PROGRAMA LANDSAT .....</b>	<b>1-13</b>
<b>4. PROGRAMA SPOT .....</b>	<b>1-19</b>
<b>5. PROGRAMA BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>1-24</b>
<b>6. SATÉLITES NOAA .....</b>	<b>1-28</b>
<b>7. PROGRAMA EOS (EARTH OBSERVING SYSTEM) .....</b>	<b>1-29</b>
<b>8. PROGRAMAS DE RADAR .....</b>	<b>1-31</b>
<b>9. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>1-34</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>1 – SATÉLITE CBERS E SEUS COMPONENTES.....</b>	<b>1-26</b>
---	-------------

## LISTA DE TABELAS

<b>1 - PROGRAMA LANDSAT .....</b>	<b>1-14</b>
<b>2 - PARÂMETROS DO ETM+/LANDSAT-7 .....</b>	<b>1-15</b>
<b>3 - BANDAS ESPECTRAIS DO ETM+/LANDSAT-7.....</b>	<b>1-16</b>
<b>4 - SENSORES DO SPOT-4.....</b>	<b>1-20</b>
<b>5 - CÂMERA CCD DO CBERS.....</b>	<b>1-25</b>
<b>6 - CARACTERÍSTICAS DO AVHRR-3/NOAA-K, L E M .....</b>	<b>1-29</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Para que haja o sensoriamento remoto é necessário que haja uma “medição”, à distância, das propriedades dos objetos ou alvos. As principais propriedades “primárias” dos alvos que são medidas pelos sensores remotos são a capacidade de reflexão e de emissão de energia eletromagnética. Essas propriedades primárias podem ser usadas diretamente, de uma forma “bruta”, através de uma imagem de um sensor remoto. Essa é a forma mais comum de uso dos produtos de sensoriamento remoto, pois são as imagens na forma como as conhecemos. Por exemplo, um objeto tortuoso e de baixa reflexão (escuro) num certa imagem traduz-se a nós como sendo um rio. Porém, aquelas propriedades primárias podem sofrer transformações e permitir-nos fazer inferências sobre características secundárias dos alvos. Por exemplo, quando uma imagem de um sensor remoto entra num modelo que a relaciona com a fotossíntese da vegetação, gera-se um novo produto, ou uma nova imagem que, agora, passa a representar uma propriedade do alvo que não foi medida diretamente pelo sensor remoto. No caso do rio, se houver uma equação ou um modelo que permita um relacionamento entre reflectância medida por satélite e quantidade de sedimentos num meio aquático, pode-se gerar uma imagem secundária que expressa a quantidade de sedimentos.

De qualquer modo que se veja um produto de sensoriamento remoto, seja ele primário ou secundário, há sempre a necessidade de que a propriedade de reflexão ou emissão do alvo seja medida, mensurada, por um sensor remoto. Esses tais sensores remotos fazem parte do que se denomina “sistemas de sensoriamento remoto”. Os chamados “sistemas de sensoriamento remoto” são os veículos e instrumentos necessários à coleta de dados para serem analisados pela comunidade científica e de usuários em geral. E há uma estreita associação entre sensoriamento remoto e satélites. É que, embora outros sistemas façam parte do sensoriamento remoto, como os radiômetros de campo e de laboratório, e as fotografias aéreas e outros sistemas que operam em aeronaves, são os satélites que, a cada dia, mais e mais se tornam os instrumentos quotidianos dos profissionais de sensoriamento remoto. Assim, é necessário que haja um conhecimento dos principais satélites e de suas características.

Os satélites são veículos colocados em órbita da Terra e que promovem continuamente a aquisição de dados relacionados às propriedades primárias dos objetos. Por estarem a grandes altitudes (tipicamente entre 600 e 1.000 km) têm a capacidade de abranger em seu campo de visada uma grande porção de superfície terrestre. Ao mesmo tempo, como têm que orbitar ao redor da Terra, promovem uma cobertura que se repete ao longo do tempo, permitindo o acompanhamento da evolução das propriedades de reflexão ou emissão dos objetos e dos fenômenos relacionados.

Neste capítulo serão abordados os principais satélites em operação e, particularmente, aqueles voltados para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. Ainda será dada ênfase naqueles que o Brasil tem mais se utilizado. Assim, serão descritos os sistemas Landsat, SPOT, NOAA, Terra, Radarsat e ERS (todos programas internacionais) e o CBERS e o SSR/MECB (do Brasil). Porém, antes de descrever os sistemas propriamente ditos, será feita uma introdução sobre órbitas dos satélites e aspectos relacionados, cujos princípios aplicam-se a todos os sistemas.

## **2. CARACTERÍSTICAS ORBITAIS DOS SATÉLITES**

Os satélites podem apresentar uma grande variação quanto ao padrão orbital em relação à Terra. Os que mais interessam para o sensoriamento remoto enquadram-se em duas grandes categorias: os de órbita baixa e os de órbita alta. Estes últimos são os geoestacionários e têm sua maior aplicação no campo da meteorologia, sendo apenas marginal sua aplicação em sensoriamento remoto. Os de órbita baixa englobam a maioria dos satélites de sensoriamento remoto, e serão discutidos mais pormenorizadamente.

### **2.1 ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA**

Os satélites nesta órbita estão a uma altitude de cerca de 36.000 km. São chamados geoestacionários porque sua órbita acompanha o movimento de rotação da Terra. Possuem uma velocidade de translação em relação à Terra que equivale ao movimento de rotação da Terra, de modo que, em relação à Terra, estão imóveis. Como ficam dispostos ao longo do Equador terrestre, e por causa da grande altitude podem ter uma

visão sinóptica, ou seja, completa de todo o disco terrestre compreendido pelo seu campo de visada. Além disso, como estão “fixos” em relação à Terra, permanecem voltados para o mesmo ponto da superfície e, assim, podem fazer um imageamento muito rápido daquela porção terrestre sob seu campo de visada. É por essa grande abrangência de superfície terrestre coberta em um curto intervalo de tempo que eles se prestam muito para a meteorologia, onde os fenômenos são muito dinâmicos.

## **2.2 ÓRBITA BAIXA**

Embora nesta categoria enquadrem-se inúmeros sistemas espaciais, a discussão a seguir será restrita às situações e características que abrangem os sistemas que mais interessam ao sensoriamento remoto. Sempre que couber, serão discutidos os impactos dos desvios em relação à situação usual.

Em geral, a órbita dos satélites de sensoriamento remoto enquadra-se no que se denomina órbita baixa, o que equivale a dizer órbitas com menos de 1.000 km de altitude.

Para os satélites de sensoriamento de órbita baixa, tal órbita é também circular, pois dessa forma o satélite fica sempre orbitando a uma altitude quase que fixa em relação à Terra, o que permite uma escala de imageamento praticamente constante para todas as imagens. Como a variação de altitude é pequena numa situação de circularidade, a variação de escala também é pequena. Toda órbita circular tem esta característica de manter a escala constante, o que facilita os trabalhos de interpretação e análise das imagens.

Outra característica de órbita para os satélites de sensoriamento remoto é a altitude. Ela tem se situado entre 700 e 1.000 km, aproximadamente. A altitude do satélite define uma série de outros parâmetros de engenharia do sistema, tem que obedecer às leis da mecânica orbital, e depende muito da definição do projeto da missão e características dos sensores destinados ao imageamento. No caso da série Landsat, por exemplo, a mudança de altitude entre a primeira geração (Landsat 1 a 3) e a segunda geração (Landsat 4 a 7) exigiu que o campo de visada do sensor *Thematic Mapper* (Mapeador

Temático, ou simplesmente TM), a bordo dos satélites da segunda geração, fosse aumentado a fim de manter a mesma faixa de imageamento do sensor *Multispectral Scanner System* (Sistema de Varredura Multiespectral, ou MSS), da geração anterior. Isso quer dizer que se fosse mantido mesmo ângulo de imageamento para as duas gerações, a faixa imageada no terreno seria menor na segunda geração, uma vez que sua altitude era menor.

Uma vez definido que a órbita é circular e que ela tem uma certa altitude em relação à Terra, descrevendo um círculo com raio praticamente fixo, é preciso definir o ângulo que esse plano da órbita fará com os pólos da Terra. Em geral os satélites de sensoriamento remoto têm órbita quase polar, com um pequeno e constante desvio do plano orbital em relação ao eixo norte-sul. O imageamento é descendente, em direção ao sul, quando a Terra está iluminada (embora pudesse também haver imageamento no sentido ascendente em certos comprimentos de onda). A órbita quase-polar tem a importante característica de permitir que a Terra toda (exceto os pólos) seja imageada após um certo número de órbitas. A cada órbita, cuja duração é de cerca de 100 minutos, o sistema (satélite e sensor) recobre uma faixa longitudinal e constante no terreno equivalente a um certa faixa de terreno. Essa faixa de imageamento varia de acordo com o sensor. Nessas condições, ocorrem aproximadamente 14,5 órbitas diárias e, como o perímetro da Terra no equador é de cerca de 36.000 km, após um certo número de dias e um certo número de órbitas, a Terra toda será imageada.

No projeto da missão e, particularmente da característica orbital, para fins de sensoriamento remoto há uma preferência para que haja uma ciclicidade das passagens ou dos recobrimentos. Isso quer dizer que é desejável que, após determinado número de dias, o satélite volte a recobrir a mesma faixa de terreno. Isso é conseguido através de um projeto orbital adequado, no qual fatores como altitude e velocidade do satélite são considerados. Também a faixa imageada no terreno em cada órbita é um fator importante, já que faixas de imageamento mais estreitas determinarão ciclos de revisitas mais longos, e faixas mais largas diminuirão o tempo entre uma visita e outra. Ou seja, se a faixa de terreno que o sistema (satélite mais sensor) consegue imagear é estreita, haverá necessidade de muitas órbitas para cobrir toda a superfície da Terra. Ao

contrário, se a faixa de imageamento é mais larga, exige-se menos tempo para que esse recobrimento seja completo.

Entre outros fatores na determinação da configuração de um sistema de imageamento há um que diz respeito ao horário do dia em que deverá ser efetuado o imageamento. Em geral, os satélites de sensoriamento remoto possuem órbita chamada heliossíncrona, ou seja, sincronizada com o Sol. Isso quer dizer que a cada órbita o satélite cruza a linha do Equador no mesmo horário. Esta característica de órbita é importante pois assim todas as imagens são sempre obtidas aproximadamente no mesmo horário, e as variações entre imagens podem ser atribuídas às propriedades intrínsecas dos alvos, e não a influências de posicionamento angular do sol. Para que isso possa ser conseguido, é necessário que o ângulo entre a normal ao plano da órbita do satélite e a linha terra-sol seja mantido constante. Isso significa que a precessão do plano orbital do satélite deve estar numa taxa que seja equivalente à taxa da translação da Terra ao redor do Sol. Isso é obtido através do estabelecimento de uma relação apropriada entre o raio (ou o período) da órbita circular e o ângulo de inclinação da órbita do satélite.

### **3. PROGRAMA LANDSAT**

O primeiro satélite da série Landsat foi lançado no início dos anos 70, conforme a Tabela 1. Atualmente, no ano 2000, está operando o sétimo da série. Esta série de satélites é a principal no campo do sensoriamento remoto, não só por ser a de período de vida mais longo de fornecimento contínuo de dados, mas também pela notável facilidade de acesso e qualidade dos dados gerados.

A partir do final do anos 60 os Estados Unidos decidiram colocar em órbita um satélite de sensoriamento remoto. A estrutura do satélite recaiu sobre um projeto já em operação naquela época que era a dos satélites Nimbus, de meteorologia. Posteriormente, iniciando com o Landsat-4, foi projetada uma plataforma própria para esses satélites e também uma inovação quanto aos sensores a bordo. Assim, é comum falar em duas gerações para a série Landsat. Uma que compreende os três primeiros, e uma segunda, que compreende os quatro posteriores. O último da série, o de número 7, apresenta um

sensor que, embora muito semelhante aos três anteriores, tem certas características que são tidas como um avanço em relação a seus predecessores.

**TABELA 1 – PROGRAMA LANDSAT\***

Sistema	Lançamento (fim das operações)	Instru- mentos	Resolução (metros)	Comuni- cação	Altitude (km)	Revi- sita	Taxa de dados (Mbps)
Landsat-1	23/7/1972 (1/6/1978)	RBV MSS	80 80	TD com gravadores	917	18	15
Landsat-2	22/1/1975 (25/2/1982)	RBV MSS	80 80	TD com gravadores	917	18	15
Landsat-3	5/3/1978 (31/3/1983)	RBV MSS	30 80	TD com gravadores	917	18	15
Landsat-4	16/7/1982 (Transmissão TM terminou em 08/1993)	MSS TM	80 30	TD com TDRSS	705	16	85
Landsat-5	1/3/1984	MSS TM	80 30	TD com TDRSS	705	16	85
Landsat-6	5/10/1993 (5/10/1993)	ETM	15 (pan) 30 (ms)	TD com gravadores	705	16	85
Landsat-7	15/4/1999	ETM+	15 (pan) 30 (ms)	TD com gravadores de estado sólido	705	16	150

\*RBV = return beam vidicon; MSS = multispectral scanner system; TM = thematic mapper; ETM+ = enhanced thematic mapper plus; pan = pancromático; ms = multispectral; TD = transmissão direta; Mbps = mega bits por segundo.

Como se observa pela Tabela 1, os satélites de uma determinada série são lançados um a um, depois de um intervalo irregular de tempo. Cada satélite lançado tem uma vida útil esperada. Os primeiros satélites da série Landsat tinham vida útil de dois anos. Alguns duraram muito mais do que isso. Os últimos da série já tinham especificações de vida útil maiores, e também ultrapassaram em muito as especificações. O Landsat-5 é um caso exemplar, pois operou por mais de 15 anos. Porém, não é incomum a ocorrência de fracassos; o Landsat-6 foi perdido durante o lançamento, antes de ser posicionado em órbita.



Quanto à primeira geração da série Landsat, cabe destacar que o sensor MSS (Sistema de Varredura Multiespectral) demonstrou ser o principal instrumento a bordo dos Landsats. O sensor RBV (Sistema Vidicon de Feixes Retornantes, similar a um sistema de televisão), embora permitisse uma melhor resolução espacial (como no Landsat-3), acabou sendo descontinuado a partir do Landsat-4 por causa de sua baixa fidelidade radiométrica e de sua pequena cobertura espectral. Muitas dessas imagens do RBV estão disponíveis nos arquivos do INPE, em Cachoeira Paulista, SP.

O mais recente satélite da série é o Landsat-7, lançado em 15/04/1999, e o principal sensor a bordo é o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*, Mapeador Temático Avançado). Este sensor é uma continuação do TM anteriormente a bordo dos Landsats-4 a 6. As principais características do ETM+ são resumidas nas Tabelas 2 e 3. O ETM+ fornece uma imagem digital com uma visão sinóptica, repetitiva, multiespectral, com alta resolução espacial da superfície terrestre.

**TABELA 2 - PARÂMETROS DO ETM+/LANDSAT-7**

Tipo	radiômetro de varredura mecânica tipo “wiskbroom”	
Bandas	3 Bandas no Visível, 1 no infravermelho Próximo, 2 no Infravermelho Médio Refletido, 1 no Infravermelho Termal, 1 Pancromática	
Função	cobertura global periódica da superfície terrestre	
Faixa imageada no terreno	185 km ( $\pm 7,5^\circ$ )	
Massa	425 kg	
Potência	590 W (imageando), 175 W (repouso)	
Controle térmico	resfriador radiativo de 90 K	
Dimensões físicas	radiômetro	196 x 114 x 66 cm
	eletrônica auxiliar	90 x 66 x 35 cm

FONTE: King e Greenstone (1999, p.113)

**TABELA 3 - BANDAS ESPECTRAIS DO ETM+/LANDSAT-7**

Banda Espectral	Largura da Banda à meia amplitude (μm)	Dimensão do IFOV (μrad)	Dimensão nominal da amostra no terreno (m)
Pancromática	0,50-0,90	18,5 x 21,3	15
1 (visível, azul)	0,45-0,52	42,6	30
2 (visível, verde)	0,52-0,60	42,6	30
3 (visível, vermelho)	0,63-0,69	42,6	30
4 (infravermelho próximo)	0,76-0,90	42,6	30
5 (infravermelho médio refletido)	1,55-1,75	42,6	30
6 (infravermelho termal)	10,42-12,50	85,2	60
7 (infravermelho médio refletido)	2,08-2,35	42,6	30

FONTE: King e Greenstone (1999, p.113)

O satélite Landsat-7 tem uma órbita circular (escala praticamente constante), heliossíncrona (horário de cruzamento do Equador sempre às 10:00 ±15 minutos na órbita descendente), com uma inclinação de 98,2°, altitude de 705 km. Nesta configuração orbital, o Landsat-7 precederá o satélite Terra (a ser discutido adiante) de cerca de 30 minutos na mesma faixa de imageamento da superfície terrestre. A faixa de 185 km imageada pelo campo de visada (FOV – *field of view*) do ETM+ permite uma cobertura global da terra a cada 16 dias. Cada órbita dura aproximadamente 100 minutos. Neste tempo haverá um deslocamento no terreno de cerca de 2.400 km entre o centro de uma órbita e a seguinte. Como a Terra desloca-se para leste, as faixas imageadas vão se deslocando para oeste. Esse padrão de recobrimento orbital, onde são descritas as órbitas no sentido longitudinal e as imagens propriamente ditas, “recortadas” a cada 185 km na órbita, ou seja, no sentido latitudinal, formam o que se denomina *sistema de referência mundial*. Esse sistema permite que se localize uma imagem correspondente a qualquer ponto da Terra através de dois números, correspondentes à órbita (sentido longitudinal) e ao ponto (sentido latitudinal). Assim,

por exemplo, uma imagem do ETM+/Landsat-7 de São José dos Campos, SP, é referenciada como sendo a 219/76, lida como “órbita 219, ponto 76”.

O ETM+ é um sensor que possui dois planos focais, onde ficam localizadas as matrizes de detectores. Cada matriz de detectores é responsável pela detecção de uma banda. Há, portanto, oito matrizes, sendo que as quatro primeiras (bandas 1-4, correspondentes às três do visível e à do infravermelho próximo) ficam no plano focal primário. As quatro seguintes (pancromática, infravermelhos médios, e infravermelho termal) encontram-se num plano focal secundário e refrigerado. Ambos os planos focais, apesar de fisicamente separados, encontram-se opticamente alinhados, de modo que há o registro entre todas as bandas. Cada matriz é composta de 16 detectores (exceto a banda pancromática, que tem 32, e a do infravermelho termal, que tem oito). A função de cada uma dessas matrizes é promover o registro da radiância proveniente do terreno em cada uma das oito bandas. Esta matriz de oito bandas por 16 detectores por banda (oito na infravermelha termal e 32 na pan) tem uma largura de 480 metros no terreno, que são 16 linhas de 30 metros nas bandas 1-4, 32 linhas de 15 metros no pan, 8 linhas no infravermelho termal.

O ETM+ é um sensor que faz um imageamento através de dois movimentos perpendiculares entre si. O primeiro movimento é feito pelo deslocamento do próprio satélite ao longo de sua órbita. A projeção desse movimento, juntamente com o FOV (*field of view*, campo de visada), definem o que se denomina faixa de imageamento. No caso ETM+ esta faixa de imageamento é de 185 km. O segundo movimento necessário para constituir uma imagem no sistema de varredura mecânico multiespectral é produzido pelo movimento de um espelho oscilante transversalmente à faixa de imageamento.

O espelho oscilante projeta, no terreno, as matrizes de detectores que estão nos planos focais. A cada movimento lateral do espelho oscilante numa direção (leste para oeste, ou oeste para leste), são imageadas 16 linhas de 30 metros (32 de 15 metros no pan e 8 de 60 metros no infravermelho termal), ou 480 metros de largura e com 185 km de extensão. Em cada banda particular, um certo detector é responsável pelo imageamento

de uma linha completa. Porém, cada detector tem um IFOV (*instantaneous field of view*, campo de visada instantâneo) de apenas 30 metros (15 no pan e 60 no infravermelho termal). Portanto, para que uma linha de 185 km seja completamente “varrida” é necessário que cada um dos detector de cada banda seja acionado milhares de vezes (185.000 metros dividido pelo IFOV de cada detector – 15, 30 ou 60 metros, de acordo com a banda).

Se for fixada uma certa posição inicial do espelho oscilante, no terreno haverá a projeção de toda a matriz de detectores. Portanto, nesta posição, nenhum detector estará cobrindo uma mesma área no terreno. Nesta posição, são lidos os valores de radiação de cada elemento de terreno projetado em cada detector em particular. A esta seqüência singular de leitura de todos os detectores de todas as oito bandas dá-se o nome de *minor frame* (seqüência primária de leitura). Após esse *minor frame* o espelho desloca-se para leste ou para oeste (dependendo do sentido do espelho oscilante e o *minor frame* adjacente é lido. Vê-se que entre um *minor frame* e outro, há uma adjacência de elementos de 30 m no terreno (15 m para o pan e 60 m para o infravermelho termal). A continuação dessa seqüência de *minor frames* fará com que toda a linha seja coberta após um certo tempo, que equivale ao *major frame* (seqüência completa de leitura). Ao terminar um *major frame*, o espelho oscilante e o sistema de leitura e registro dos sinais terão varrido e lido mais de 6.000 *minor frames*; e também o espelho oscilante terá chegado ao fim de um FOV (185 km de largura), e imageado um comprimento no terreno (sentido descendente da órbita) equivalente a 480 m. Quando o espelho oscilante retornar para imagear outros 480 m, o satélite terá avançado em sua órbita o equivalente a 480 m no terreno e, assim, esse próximo conjunto de linhas (480 m) estará contíguo ao conjunto anterior, e assim por diante. Essa seqüência de *minor frames* nas linhas e a seqüência de *major frames* na direção do caminhamento da órbita forma a imagem.

Após a detecção do sinal proveniente do terreno, ele sofre processamentos internos e é gravado a bordo ou encaminhado na forma digital para uma estação em terra. No caso do Brasil, esta estação fica em Cuiabá, MT. Depois, é enviado para Cachoeira Paulista, SP, para os processamentos necessários à preparação dos produtos a serem arquivados

ou enviados aos usuários. Atualmente, o principal produto solicitado pelos usuários são as imagens na forma digital e gravados em CDROM.

#### **4. PROGRAMA SPOT**

O programa SPOT (*Satellite Pour Observation de la Terre*, Satélite Para Observação da Terra) é um programa Francês de satélites de sensoriamento remoto. O primeiro da série foi lançado em 22/2/1986, o segundo em 22/1/1990, o terceiro foi lançado em 26/9/1993, mas perdeu-se no lançamento. Em 22/3/1998 foi lançado, pelo veículo lançador Ariane, o SPOT-4 que, embora guarde muitas características dos seus predecessores 1-3, representa um avanço em vários sentidos. O sistema de observação da terra SPOT foi projetado pela Agência Espacial Francesa (CNES – Centre National d'Études Spatiales) e é operado por sua subsidiária Spot Image. Nesta seção a discussão será centrada no Spot-4, mas sempre que necessário haverá referência aos satélites anteriores ou mesmo a outros sistemas, particularmente ao Landsat.

O Spot-4 classifica-se como um satélite de órbita baixa, ficando a 830 km de altitude. Sua órbita é circular, o que garante que as todas cenas sejam adquiridas a uma altitude praticamente constante, garantindo constância na resolução espacial e na escala. A heliossincronicidade de sua órbita faz com que o Spot-4 passe sobre uma certa área sempre à mesma hora solar, o que permite que a cena apresente as mesmas condições de iluminação daquela cena durante todo o ano (as variações passam a ser creditadas à sazonalidade das estações do ano e às variações intrínsecas dos alvos). O ângulo entre o plano orbital do Spot-4 e a direção Terra-Sol é praticamente constante e de  $22,5^\circ$ , fazendo com que o cruzamento com o equador no sentido descendente norte-sul ocorra à hora solar de 10:30. A sua órbita também é quase polar, sendo que o ângulo entre o plano da órbita e o plano equatorial é de  $98,8^\circ$ , garantindo que toda a terra seja recoberta durante um ciclo de revisita (considerando a possibilidade de visada fora do nadir). Como a órbita é em fase, o satélite passa sobre o mesmo ponto após um número inteiro de dias que, para as visadas no nadir, é de 26 dias. Neste período o Spot-4 terá completado 369 órbitas ao redor da terra. Cada revolução orbital dura 101,5 minutos. Em cada órbita o Spot-4 cruza o plano equatorial duas vezes, uma no sentido norte-sul,

ou órbita descendente, durante o período iluminado do dia; o segundo cruzamento ocorre no sentido ascendente sul-norte durante o período noturno.

O Spot-4 foi concebido para ser um satélite com características bastante diferenciadas em relação ao Landsat. As principais diferenças são sua alta resolução espacial, sistema de imageamento por varredura eletrônica (*pushbroom*) e capacidade de visada lateral. O seu sistema de imageamento é constituído por dois sensores denominados HRVIR (*haute resolution visible et infra rouge*, alta resolução no visível e infravermelho). Na verdade são dois sensores idênticos, colocados um ao lado do outro. A largura da faixa de imageamento de cada um é de 60 km, perfazendo 117 km de largura, pois há um recobrimento de 3 km no equador.

Um outro sensor a bordo do Spot-4 e também de interesse para o sensoriamento remoto é o Vegetation. A Tabela 4 apresenta algumas características dos HRVIR e do sensor Vegetation.

**TABELA 4 - SENSORES DO SPOT-4**

Bandas ( $\mu\text{m}$ )	HRVIR		Vegetation (VGT)	
	Resolução espacial (m)	Faixa de imageamento (km)	Resolução espacial (km)	Faixa de imageamento (km)
B0 (azul)	-	-	1,1 km	2.250 km
B1 (verde, 0,50 a 0,59 $\mu\text{m}$ )	20 m	60 km	-	-
Pan (vermelho, 0,61 a 0,68 $\mu\text{m}$ )	10 m	60 km	-	-
B2 (vermelho, 0,61 a 0,68 $\mu\text{m}$ )	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
B3 (infravermelho próximo, 0,78 a 0,89 $\mu\text{m}$ )	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
MIR (infravermelho médio, 1,58 a 1,75 $\mu\text{m}$ )	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
Alinhamento HRVIR/VGT	0,3 pixel do VGT			
Calibração absoluta	9%		5%	
Cobertura global da Terra	26 dias		1 dia	

Cada um dos HRVIR possui 4 bandas espectrais, conforme a Tabela 4. A banda pancromática possui a mesma faixa espectral da banda B2 (vermelho) no Spot-4, mas era uma banda separada (0,51 a 0,70  $\mu\text{m}$  nos Spots anteriores). Esse instrumento de imageamento é projetado para cobrir instantaneamente uma linha completa de pixels de uma só vez ao longo do FOV. Isso é conseguido usando uma matriz linear de detectores do tipo CCD (*charge-coupled device*, ou dispositivo de cargas acopladas). A radiação proveniente do terreno é separada por dispositivos ópticos especiais em quatro bandas espectrais. As matrizes lineares de CCD operam no modo chamado *pushbroom*. Um telescópio de grande abertura angular forma uma imagem instantânea dos elementos adjacentes do terreno na matriz de detectores no plano focal do instrumento. Isso significa que num mesmo instante uma linha inteira (de 60 km de largura por 10 ou 20 m de comprimento, para o modo monoespectral (M) ou multiespectral (X), respectivamente). Após a leitura dos valores de radiância em todos os detectores do CCD, o satélite terá avançado 20 ou 10 metros (modo X ou P, respectivamente) no terreno, e uma nova linha de detectores será lida. Ou seja, o próprio movimento do satélite é que produz a varredura no sentido da latitudinal da órbita, enquanto que o imageamento longitudinal (transversal ao sentido da órbita) é promovido pelo arranjo matricial fixo de detectores. Os sinais gerados pelos detectores (que são fotodiodos) são lidos seqüencialmente num determinado intervalo de tempo. Assim, embora o arranjo linear de detectores não faça a “varredura” da linha para serem sensibilizados pela luz, os detectores são varridos eletronicamente para gerar o sinal de saída.

O telescópio de cada HRVIR tem um campo de visada (FOV) de  $4^\circ$ , o que, à altitude de 830 km, corresponde a uma largura de 60 km no terreno. Esta largura é vista instantaneamente pela linha de 6.000 detectores da matriz linear de detectores. Assim, cada HRVIR gera uma imagem de 60 km de largura ao longo da órbita. Cada detector gera um pixel por vez, e cada pixel tem uma dimensão de 10 m por 10 m no modo de alta resolução. Quando detectores adjacentes são varridos (lidos) eletronicamente aos pares, eles geram pixels correspondentes a uma área no terreno medindo 20 m x 20 m resultando numa imagem com 20 m de resolução espacial. O movimento do satélite ao

longo de sua órbita resulta em varreduras de linhas sucessivas e isso completa a imagem.

O HRVIR tem dois modos de operação quanto à resolução espacial, dependendo se os detectores são lidos um a um (modo M, de monoespectral) ou em pares (modo X, de multiespectral). A luz que entra no sistema óptico é dividida em quatro feixes correspondentes a quatro bandas espectrais por um divisor espectral constituído de prismas e filtros. Esses feixes são posteriormente focalizados nas quatro matrizes de detectores (uma para cada banda). Dessa forma, quatro linhas de detectores geram simultaneamente quatro planos espectrais para uma mesma linha no terreno; portanto, as imagens geradas por cada banda para uma mesma superfície do terreno são perfeitamente registradas, pois cada um de seus pixels proveio simultaneamente de um mesmo feixe eletromagnético.

Os HRVIRs têm três modos de imageamento: o multiespectral (modo X) correspondendo às bandas B1, B2 e B3, mais a banda do infravermelho médio, com uma resolução espacial no terreno equivalente a 20 metros; o modo monoespectral (M) correspondendo à banda B2 (vermelho) com uma resolução de 10 metros no terreno; e o modo X + M que combina os modos X e M. O imageamento feito por cada instrumento HRVIR é inteiramente independente entre si.

Na entrada óptica de cada HRVIR do Spot-4 há um espelho com um mecanismo que permite o desvio da visada para uma faixa de terreno adjacente à projeção da órbita no terreno. Isso quer dizer que o Spot-4 tem a possibilidade de ter visadas laterais, fora do nadir. Esse redirecionamento da visada para as laterais pode ser de  $\pm 27^\circ$  em relação ao nadir. Esse desvio é controlado por um mecanismo que permite uma graduação lateral com incrementos de  $0,3^\circ$ . Tal característica pode ser usada para adquirir uma imagem, em resposta a uma solicitação de programação pelo usuário, em qualquer posição afastada de até 450 km para ambos os lados da trajetória do satélite no terreno; isso é conseguido com os ângulos extremos ( $+27^\circ$  ou  $-27^\circ$ ). Outra função dessa característica é a de ser usada principalmente para a obtenção de imagens de um mesmo local mas em ângulos diferentes para a geração de pares estereoscópicos com as finalidades de



restituição fotogramétrica e mapeamento do relevo. Também é usada para permitir o posicionamento do instrumento para a direção de uma fonte de calibração.

Um aspecto sensível do Spot-4 é a calibração, que se dá de duas maneiras. A finalidade da calibração é a obtenção de valores radiométricos entre os pixels que guardem uma relação entre si e também que guardem uma relação com as propriedades de reflexão da energia eletromagnética dos alvos. O primeiro modo de calibração é aquele chamado calibração intra-banda, ou também de normalização de respostas dos detectores CCD. O objetivo dessa calibração é balancear a resposta dos 3.000 detectores de cada banda quando o instrumento vê uma superfície perfeitamente uniforme. Ou seja, para uma mesma banda, todos os detectores têm que gerar o mesmo sinal quando são sensibilizados por uma mesma fonte. A segunda calibração é chamada de calibração absoluta e tem a finalidade de medir a responsividade dinâmica do instrumento através do estabelecimento de uma relação precisa entre uma fonte externa perfeitamente estável (o Sol) e o sinal de saída do instrumento. O sistema de calibração é usado a intervalos regulares para verificar e, se necessário, ajustar a resposta do instrumento. Alguns dos efeitos que podem suscitar de ajustes compensatórios são mudanças na transmissividade dos componentes ópticos como resultado do envelhecimento em órbita, distorções mecânicas causadas por variações de temperatura, variações no ruído gerado pela eletrônica do imageamento ou dos detectores do CCD.

Um outro sensor a bordo do Spot-4 e de interesse para o sensoriamento remoto é o Vegetation (vegetação, VGT). Este sensor é uma câmera multiespectral, também num sistema de imageamento do tipo *pushbroom*, mas de baixa resolução espacial (1,1 km, Tabela 4). As funções desse sensor são permitir um monitoramento contínuo, regional e global da biosfera continental e das culturas. Com seu grande campo angular (FOV de 101°, o que corresponde a uma faixa de imageamento de 2.250 km) consegue cobrir 90% da terra num só dia, e os outros 10% restantes no dia seguinte. Como há coincidência de bandas entre o HRVIR e o VGT, os dois sistemas são bastante complementares.

Da mesma forma que o Landsat, o Spot transmite o sinal de imagens para estações localizadas em diversas partes da Terra. Além disso, tem um sistema de gravação a bordo, que permite o armazenamento de até 40 minutos de gravação (uma cena HRVIR de 60 km por 60 km é imageada em menos de 15 segundos).

## **5. PROGRAMA BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**

O Brasil possui basicamente dois programas de sensoriamento remoto. Um, é denominado CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Sensoriamento Remoto, com descrição mais pormenorizada na internet, no endereço: <http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/index.html>), e o outro MECB (*Missão Espacial Completa Brasileira*, cuja descrição pode ser encontrada também na internet no endereço: <http://www.inpe.br/programas/mecb/default.htm>) (INPE, 2000a,b).

O programa Cbers é uma missão conjunta entre o Brasil, através do INPE, e a China, através da CAST (Agência Chinesa de Ciência e Tecnologia), e envolve a construção, lançamento e gerenciamento operacional de dois satélites de sensoriamento remoto. O primeiro foi lançado em 14/10/1999 a partir da base de lançamentos de Tayuan, pelo veículo lançador Longa Marcha 4B.

O Cbers é um satélite com massa de 1.450 kg, com dimensões de 1,8 x 2,0 x 2,2 m, além de ter os painéis solares com 6,3 x 2,6 m. Está a uma altitude de 778 km, em órbita circular (período de 100,26 minutos), quase polar (inclinação de 98,5° em relação ao plano equatorial), heliossíncrona com cruzamento do equador no sentido norte-sul às 10:30 da manhã. Nesta configuração orbital obterá imagens aproximadamente com mesma escala, recobrirá quase que inteiramente a Terra a intervalos regulares de 26 dias, e os imageamentos de um mesmo ponto sempre se darão a uma mesma hora solar.

A constituição de sua carga útil é muito interessante, pois traz características de diversos outros satélites, e ainda oferece novidades em termos de imageamento. Possui três sensores a bordo: a câmera CCD (*charge-coupled device*, dispositivo de cagas acopladas), o imageador por varredura mecânica IRMSS (*infrared multispectral*

*scanner system*, sistema varredor multiespectral de infravermelho), e a câmera WFI (*wide field imager*, imageador de grande campo de visada).

A câmera CCD/Cbers apresenta semelhanças com o HRVIR do Spot-4. Suas principais características estão na Tabela 5 e uma visão de seus constituintes está na Figura 1.

**TABELA 5 - CÂMERA CCD DO CBERS**

Bandas espectrais	0,51 - 0,73 $\mu\text{m}$ (pancromático) 0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ (azul) 0,52 - 0,59 $\mu\text{m}$ (verde) 0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ (vermelho) 0,77 - 0,89 $\mu\text{m}$ (infravermelho próximo)
Resolução espacial no terreno	20 m x 20 m
Resolução temporal	26 dias no nadir; até 3 dias com visada lateral
FOV	8,3°
Faixa de imageamento	113 km
Visada lateral	$\pm 32^\circ$
Taxa de dados	2 x 53 Mbits/segundo

FONTE: INPE (2000)

A câmera CCD/Cbers é um sensor que cobre as faixas espectrais do visível e se estende até o infravermelho próximo. Com esse conjunto de bandas consegue-se atender uma grande parcela da demanda por dados de sensoriamento remoto. Além disso, possui uma banda pancromática que cobre todo o visível e, ao contrário do Spot-4, esta banda do Cbers é mais larga, porém com menor resolução espacial. O fato de cobrir todo o visível permite um aproveitamento da experiência e das técnicas de fotointerpretação feitas sobre fotografias aéreas preto e branco normais.

A sua faixa de imageamento é maior que a do Spot, mas menor que a do Landsat. A capacidade de imageamento lateral, ou fora do nadir, em ângulos bastante amplos ( $\pm 32^\circ$ ), é uma vantagem comparativa importante em relação aos sistemas existentes. Essa maior capacidade de visada lateral permite que se possam fazer revisitas com até 3 dias entre passagens. Isso é uma característica relevante em situações de ocorrência de eventos que precisam ser monitorados em curto espaço de tempo.

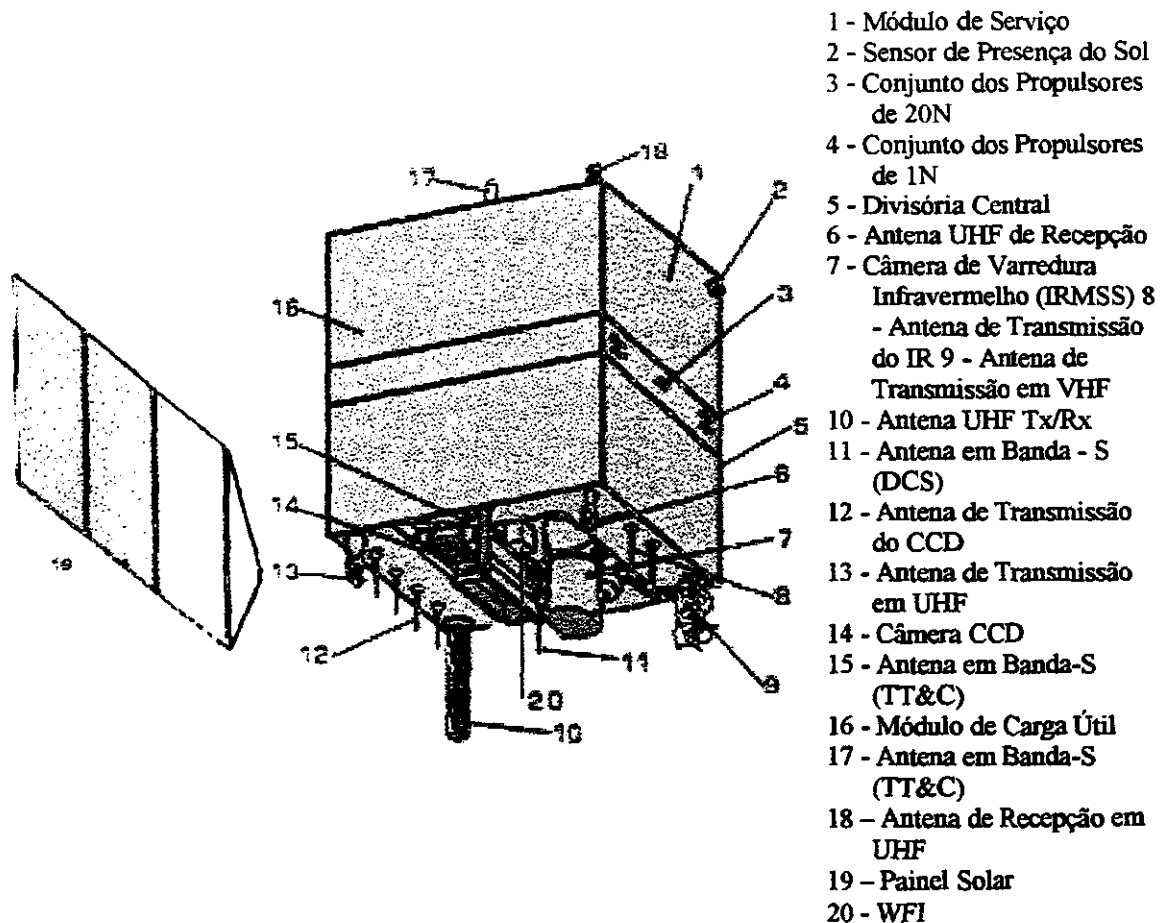


Fig 1 - Satélite CBERS e seus componentes.  
 FONTE: INPE (2000)

Outro componente do Cbers é o imageador por varredura mecânica (IRMSS). Esse sensor opera com um FOV de  $8,8^\circ$ , o que equivale a 120 km de largura no terreno. Possui quatro bandas espectrais, sendo uma que abrange desde o visível até o infravermelho próximo (0,50 a  $1,1 \mu\text{m}$ ), duas no infravermelho médio ( $1,55$  a  $1,75 \mu\text{m}$  e  $2,08$  a  $2,35 \mu\text{m}$ ). Essas três bandas espectrais possuem resolução espacial de 80 metros no terreno. Uma quarta banda espectral localiza-se no infravermelho termal ( $10,4$  a  $12,5 \mu\text{m}$ ). Sua resolução temporal é de 26 dias, e não possui capacidade de visada fora do nadir.

O último sensor a bordo do Cbers e de interesse para o sensoriamento remoto é a câmera WFI (imageador de grande campo de visada). É um sensor baseado na

tecnologia CCD; portanto, não possui componentes móveis para o imageamento, o qual é feito eletronicamente na direção transversal à órbita, e passivamente pelo próprio deslocamento do satélite no sentido da órbita. A WFI/Cbers possui apenas duas bandas espectrais: uma na região do vermelho (0,63 a 0,69  $\mu\text{m}$ ) e outra na do infravermelho próximo (0,77 a 0,89  $\mu\text{m}$ ). A WFI/Cbers possui um FOV de 60°, o que corresponde a uma faixa de 890 km no terreno. Isso garante ao sensor um período de revisita de apenas cinco dias. Como em todo sistema há uma solução de compromisso entre os diversos requisitos da missão, no caso da WFI/Cbers, para ter essa resolução temporal e cobrir uma faixa extensa de terreno a cada passagem, houve um sacrifício da resolução espacial, que passou a ser de 260 m.

A WFI/Cbers, apesar da baixa resolução espacial, apresenta-se como um sensor de alto potencial de aplicação. Possui características intermediárias entre todos os sistemas existentes para o estudo da superfície terrestre. Sua resolução espacial não é tão boa quanto a do ETM+/Landsat-7 (30 m na maioria das bandas) mas também não é como a do AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer* da National Oceanic and Atmospheric Administration, Radiômetro Avançado com Resolução Muito Alta), que é de 1,1 km. O nome deste sensor pode induzir a um equívoco de entendimento quanto à sua resolução espacial. Porém, é que o AVHRR/NOAA é originariamente um sensor meteorológico e, para esta aplicação, a resolução espacial de 1,1 km é muito alta; ao contrário do que ocorre para boa parte das aplicações de sensoriamento remoto, onde são exigidas resoluções melhores do que essa. Além disso, a WFI/Cbers, embora não possua a alta resolução temporal de um dia do AVHRR/NOAA, também não possui a baixa resolução temporal do HRVIR/Spot, que é de 26 dias no nadir. Com essas características, é provável que se consiga identificar diversas aplicações que demandam tais resoluções intermediárias.

As suas duas bandas espectrais são dispostas em pontos estratégicos do espectro eletromagnético e são destinadas principalmente ao estudo da vegetação. Essas duas regiões (vermelho e infravermelho próximo) são os locais em que a vegetação apresenta o maior contraste espectral. Ou seja, a banda do vermelho é de alta absorção de energia, e a do infravermelho próximo é de alta reflexão. Esse contraste deverá ser explorado

através dos índices de vegetação, que visam exatamente a realçar a vegetação representada numa cena de sensoriamento remoto.

Os dados do Cbers são gravados por estações terrenas; no caso Brasil, a estação está em Cuiabá, MT. O processamento dos dados para que sejam gerados os produtos a serem distribuídos aos usuários é feito em Cachoeira Paulista, SP. O catálogo para verificação de cobertura de imageamento e qualidade de imagens pode ser acessado a partir da internet no seguinte endereço: <http://www.dgi.inpe.br/index.html> (INPE, 2000a).

## 6. SATÉLITES NOAA

A NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que é uma agência governamental dos Estados Unidos, é responsável pelos satélites também chamados NOAA (Kidwell, 1997). A série de satélites NOAA tem sido de grande importância no campo da meteorologia. São satélites de órbita heliosíncrona, circular a aproximadamente 850 km. Entre os sensores a bordo, um que será aqui descrito é o AVHRR-3/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, Radiômetro Avançado de Muito Alta Resolução). Como esclarecido anteriormente, esta resolução pode ser considerada muito alta para aplicações em meteorologia; mas para muitas aplicações de sensoriamento remoto, esta resolução do AVHRR-3/NOAA é considerada baixa. O AVHRR-3 faz parte dos sensores a bordo dos satélites NOAA K, L e M (que recebem após o lançamento os números de 15, 16 e 17, respectivamente).

O AVHRR-3/NOAA é um radiômetro imageador de varredura mecânica que opera em seis bandas espectrais (Tabela 6). Os dados adquiridos durante cada passagem permitem, após o processamento em terra, a análise de parâmetros de interesse em hidrologia, oceanografia, uso da terra e meteorologia. Os dados dos canais 1, 2 e 3A são usados para monitorar a energia refletida nas poções do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Esses dados permitem a observação da vegetação, de nuvens, lagos, linhas de costa, neve, aerossóis e gelo. Os dados dos canais 3B, 4 e 5 são usados para determinar a energia radiativa da temperatura da superfície terrestre, da água, e do mar bem como das nuvens sobre eles. Apenas cinco canais podem ser transmitidos simultaneamente; os canais 3A e 3B são comutados para passagens

diurnas/noturnas, conforme necessário, enquanto que o 3B só opera durante as passagens matutinas do satélite. A Tabela 6 apresenta as características dos canais do AVHRR-3/NOAA. O campo de visada (FOV) do AVHRR-3/NOAA é de  $\pm 55,4^\circ$ , o que equivale a 2.250 km de largura de faixa imageada no terreno. Com esta largura de faixa e com a taxa de 14 revoluções orbitais por dia, a terra toda é coberta a cada dia. Portanto, a resolução temporal do AVHRR-3/NOAA é muito maior que a dos outros satélites de sensoriamento remoto vistos até aqui. Porém, há o sacrifício da resolução espacial que, no seu caso, é de 1,1 km para os pixels no nadir. Os dados do AVHRR-3/NOAA podem ser recebidos por antenas menores e também a custos reduzidos.

**TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO AVHRR-3/NOAA-K, L E M**

Canal	Banda espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolução espacial (no nadir, em km)
1 (visível)	0,580 – 0,68	1,1
2 (infravermelho próximo)	0,725 – 1,00	1,1
3A (infravermelho médio)	1,580 – 1,64	1,1
3B (infravermelho médio)	3,550 – 3,93	1,1
4 (infravermelho termal)	10,300 – 11,3	1,1
5 (infravermelho termal)	11,500 – 12,5	1,1

FONTE: NOAA (2000)

## 7. PROGRAMA EOS (EARTH OBSERVING SYSTEM)

O programa EOS (*Earth Observing System*, Sistema de Observação da Terra) é um programa de longo prazo (pelo menos 15 anos), cuja missão é gerar conhecimento científico em profundidade sobre o funcionamento da Terra como um sistema. Tem-se como premissa que esse conhecimento científico forneceria os fundamentos para o entendimento das variações naturais e induzidas pelo homem no sistema climático da Terra e também forneceria uma base lógica para as tomadas de decisão quanto às políticas ambientais (King, 1999). É um programa que envolve vários países e uma grande gama de satélites e sensores.

O primeiro grande satélite desse programa denomina-se Terra, anteriormente chamado EOS/AM-1. O nome “Terra” surgiu após um concurso nacional (nos Estados Unidos) entre estudantes de nível elementar e médio, cuja ganhadora foi uma aluna de 13 anos. O satélite Terra, lançado em 18/12/1999, está numa órbita circular a 705 km de altitude, quase polar, heliossíncrona, cruzando o equador às 10:30 da manhã na órbita descendente, e à 1:30 da madrugada no sentido ascendente.

Esse satélite possui cinco sensores: MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*, Espectrorradiômetro de Imageamento de Moderada Resolução), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Termal e Reflexão), MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*, Espectrorradiômetro Imageador em Múltiplos Ângulos), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System Network*, Sistema de Medição de Energia Radiante da Terra e Nuvens), e MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*, Medição da Poluição na Troposfera). A seguir será feita uma breve descrição dos três primeiros sensores.

O Modis é um sensor com 36 bandas espectrais, cobrindo desde o limite inferior do visível (0,366  $\mu\text{m}$ ) até o infravermelho termal (14,385  $\mu\text{m}$ ). É um sistema de varredura transversal à direção da órbita, cujo espelho faz a varredura a uma taxa de 20,3 rpm. Cada varredura cobre uma faixa de 2.330 km no sentido transversal à órbita e 10 km no sentido longitudinal à órbita, no nadir. Suas dimensões são de 1,0 m x 1,6 m x 1,0 m, e massa de 250 kg. Sua resolução espacial é dependente das bandas, sendo de 250 m para as bandas 1 e 2, de 500 m para as bandas 3-7, e de 1.000 m para as bandas 8-36. As principais aplicações são traçar limites terra/nuvens, avaliar propriedades da superfície terrestre (vegetação, principalmente), nuvens e aerossóis, cor oceânica, fitoplâncton, biogeoquímica, vapor d'água na atmosfera, nuvens do tipo cirrus, temperatura da superfície e das nuvens, medições de ozônio.

O sensor Aster tem 405 kg e possui três subsistemas, um para cada região espectral, com alta resolução espacial. Na região do visível/ infravermelho próximo tem três bandas com 15 m de resolução espacial, sua faixa de imageamento é de 60 km, e pode



fazer visadas laterais de  $\pm 24^\circ$ , pode cobrir até 318 km fora do nadir. Esse sub-sistema é composto de dois telescópios, sendo que um deles pode apontar para trás na mesma direção da órbita, permitindo que se gerem imagens estéreo. O sub-sistema responsável pela região do infravermelho médio mede a radiação em seis bandas entre 1,60  $\mu\text{m}$  e 2,46  $\mu\text{m}$ , com 30 m de resolução espacial, e numa faixa de imageamento de 60 km. O terceiro sub-sistema do sensor Aster é responsável pela medição da radiação em cinco bandas espectrais no infravermelho termal, entre 8,125  $\mu\text{m}$  e 11,65  $\mu\text{m}$ , com resolução espacial de 90 m e faixa de imageamento de 60 km. Esses dois últimos sub-sistemas possuem capacidade de apontamento de  $\pm 8,54^\circ$  lateralmente, o que permite que qualquer ponto na superfície possa ser imageado pelo menos a cada 16 dias.

O terceiro sensor do Terra aqui descrito é o Mistr. Este sensor faz imagens da terra em nove direções de apontamentos diferentes. Uma câmera aponta para o nadir e outras oito cobrem diferentes ângulos de visada ( $26,1^\circ$ ,  $45,6^\circ$ ,  $60,0^\circ$ , e  $70,5^\circ$  para frente e para trás na direção da órbita), as resoluções espaciais variam de 250 m no nadir a 275 m para a câmera com ângulo mais extremo. A faixa de imageamento é de 360 km e, além disso, cada câmera possui quatro bandas espectrais entre o visível e o infravermelho próximo.

## 8. PROGRAMAS DE RADAR

O termo radar vem de *radio detection and ranging*, ou detecção de alvos e avaliação de distâncias por ondas de rádio. A operação dos radares se dá em comprimentos de onda bem maiores que os do visível e infravermelho. Operam entre 40 GHz (banda K-alfa) e 300 MHz (banda P) (ou entre 0,8 cm e 100 cm). Os radares, como geram sua própria iluminação, podem funcionar tanto durante o dia como durante a noite e, para alguns comprimentos de onda, praticamente não sofrem interferências atmosféricas (Short, 1998). Essas duas características são importantes, pois ao poderem imagear a qualquer hora, podem otimizar seu posicionamento em relação ao Sol para captar energia solar em seus painéis solares e também operar em horários onde as estações de recepção estão com mais tempo livre, evitando congestionamentos. E, ao serem praticamente imunes às condições atmosféricas, oferecem grande certeza de aquisição de imagens em condições

adequadas para uso; os satélites que operam na região ótica têm grande quantidade de imagens inaproveitáveis por causa da cobertura de nuvens.

Em geral um sistema radar é constituído dos seguintes elementos: um gerador que envia pulsos a intervalos regulares a um transmissor, este o envia um duplexador (ou multiplexador), que o envia a uma antena direcional que modula e focaliza cada pulso num feixe transmitido ao alvo; os pulsos que retornam são captados pela mesma antena e enviados a um receptor que os converte (e amplifica) em sinais de vídeo, que são conduzidos a um dispositivo de gravação que pode armazená-los digitalmente para processamento posterior. Cada pulso dura apenas alguns microssegundos (em geral há cerca de 1.500 pulsos por segundo). O conhecimento da teoria radar é um tanto quanto complexa, exigindo conhecimentos de várias áreas, entre elas as de física, geometria, eletrônica, e processamento de sinais.

Atualmente há dois grandes programas que envolvem o imageamento da superfície terrestre por sensores radar: o ERS (*European Remote Sensing Satellite*, Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto) e o Radarsat, do Canadá.

O programa ERS é europeu e iniciou-se com o ERS-1, cujo lançamento deu-se em 17/7/1991 pelo lançador francês Ariane-4, a partir da base de lançamentos de Kourou, na Guiana Francesa. O ERS-2 foi lançado em 21/4/1995 (Francis et al., 1995). Os dois satélites têm órbita síncrona com o Sol, com cruzamento do equador, no percurso descendente, às 10:30 da manhã, hora local; a órbita é quase polar ( $98,5^\circ$ ), com altitude média de 780 km, e tem um intervalo de revisita de 35 dias. O ERS-2, que é muito semelhante ao ERS-1, pesa cerca de 2,3 toneladas, tem dimensões de 2 m x 2 m de base e 3 m de altura, e tem um painel solar de 12 m x 2,4 m.

O ERS-2 é constituído de vários sensores. Um de especial interesse para o sensoriamento remoto é o radar imageador, com antena de 10 m, e que pode operar no chamado modo “imagem”, em banda C (frequência de 5,3 GHz ou comprimento de onda de 5,6 cm), com polarização VV (transmissão e recepção verticais), e num ângulo de visada fixo em  $23^\circ$  no meio da faixa de imageamento. Fornece imagens com resolução espacial de 30 m x 30 m, numa cena de 100 km x 100 km. Esse modo de

operação é o mais largamente utilizado para aplicações terrestres do ERS. Mas esse radar também pode operar no modo onda (*wave mode*, modo onda) e, então, adquire imagens de 5 km x 5 km a cada 200 ou 300 km num sistema de amostragem, com aplicação em oceanografia.

O ERS-2 tem ainda um radar para a medição da velocidade e direção do vento sobre os oceanos; um radar altímetro para fazer medições precisas dos sinais de retorno provenientes dos oceanos e das superfícies de gelo; um radiômetro de varredura mecânica que opera nos comprimentos de onda de 1,6; 3,7; 11 e 12  $\mu\text{m}$ , com resolução espacial de 1 km x 1 km (no nadir) e com uma largura de faixa de imageamento de 500 km. Também leva um instrumento denominado GOME (*Global Ozone Monitoring Experiment*, Experimento de Monitoramento Global do Ozônio).

O outro satélite com sistema radar de grande importância para o sensoriamento remoto é o Radarsat, do Canadá, lançado em 4/11/1995. O Radarsat tem órbita circular de 798 km de altitude, circulando a Terra a cada 100,7 minutos, 14 vezes por dia, com inclinação de  $98,6^\circ$  em relação ao equador. Sua órbita é heliosíncrona, mas com passagem pelo equador às 6:00 (descendente), hora local; e o período de revisita é de 24 dias para um mesmo modo de operação e ângulo de incidência, embora possa ter imageamentos distanciados de apenas 4,5 dias para ângulos de incidência diferentes. Essa configuração orbital permite que o Radarsat explore ao máximo as condições iluminação de seu painel solar, e ao mesmo tempo passa sobre as estações de recepção em horários não utilizados por outros sistemas evitando, assim, conflitos de gravação no momento da aquisição das imagens (CCRS, 2000).

O Radarsat, com massa de 3.200 kg, opera na banda C (frequência de 5,3 GHz ou comprimento de onda de 5,6 cm), em polarização HH (transmissão e recepção da onda eletromagnética polarizada horizontalmente). É um sistema versátil, possui vários modos de imageamento, pode variar o ângulo de incidência (com antena de 15 m x 1,5 m direcionada para a esquerda no hemisfério sul) desde  $20^\circ$  até  $50^\circ$ , a largura da faixa de imageamento pode variar de 35 km a 500 km, e as resoluções espaciais podem variar de 10 m a 100 m. A filosofia que norteia o sistema é a de fornecer o mais prontamente

possível a imagem adquirida ao usuário. O tempo decorrido entre a aquisição e o recebimento pode ser tão rápido quanto um dia.

## 9. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS). **Radarsat program**. [online]

<<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>>. May 2000.

Centre National d'Études Spatiales (CNES). **SPOT program**. [online].

<[http://spot4.cnes.fr/spot4\\_gb/index.htm](http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/index.htm)>. May 2000.

European Space Agency (ESA). **ERS satellite**. [online].

<<http://services.esrin.esa.it/erslist.htm>>. May 2000.

Francis, C.R. et al. The ERS-2 spacecraft and its payload. **ESA Bulletin**, n. 83, p. 12-31, Aug. 1995.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Aquisição de imagens**. [online].

<<http://www.dgi.inpe.br>>. May 2000a.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa CBERS**. [online].

<<http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/index.html>>. May 2000b.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa MECB**. [online].

<<http://www.inpe.br/programas/mecb/default.htm>>. May 2000c.

Kidwell, K.B. **NOAA polar orbiter data users guide**. Suitland, NOAA, 1997. 120p.

King, M.D. **EOS science plan**. Greenbelt, NASA, 1999. 397p.

King, M.D.; Greenstone, R. **EOS reference handbook**. Greenbelt, NASA, 1999. 361p.

[online]. <[http://eos.nasa.gov/eos\\_homepage/misc\\_html/refbook.html](http://eos.nasa.gov/eos_homepage/misc_html/refbook.html)>. May 2000.

Lauer, D.T.; Morain, S.A.; Solomonson, V.V. The Landsat program: its origins, evolution, and impacts. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 831-838, July 1997.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Landsat program**. [online]. <landsat.gsfc.nasa.gov>. May 2000.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **Introduction to the NOAA KLM system**. <<http://www2.ncdc.noaa.gov:80/docs/klm/>>. May 2000./

Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 308p.

Short, N.M. **The remote sensing tutorial**. CDROM. Washington, NASA, 1998.

# **CAPÍTULO 2**

## **FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

**Elisabete Caria de Moraes\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

\* e.mail : [bete@met.inpe.br](mailto:bete@met.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>2-5</b>
<b>1. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>2-7</b>
1.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	2-7
1.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....	2-9
1.3 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA .....	2-13
1.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE OBJETOS NATURAIS .....	2-16
1.5 SISTEMA SENSOR .....	2-18
1.6 NÍVEIS DE COLETAS DE DADOS .....	2-19
<b>2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>2-22</b>





## LISTA DE FIGURAS

<b>1 – COMPRIMENTOS DE ONDA .....</b>	<b>2-8</b>
<b>2 – O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....</b>	<b>2-10</b>
<b>3 – CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA ENERGIA SOLAR NA ATMOSFERA .....</b>	<b>2-14</b>
<b>4 – TRANSMITÂNCIA ESPECTRAL DA ATMOSFERA .....</b>	<b>2-15</b>
<b>5 – INTERAÇÃO DA ENERGIA ELETROMAGNÉTICA COM O OBJETO .....</b>	<b>2-16</b>
<b>6 – NIVEIS DE COLETAS DE DADOS .....</b>	<b>2-21</b>

## **1. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. A transferência destas informações se faz através da energia eletromagnética, também denominada de radiação eletromagnética. Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos.

A quantidade e qualidade da energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resulta das interações entre energia eletromagnética e estes objetos. Essas alterações são determinadas pelas propriedades físico-químicas e biológicas desses objetos e podem ser identificadas nas imagens e nos dados de sensores remotos. Portanto, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características. Logo os sensores orbitais são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais.

### **1.1 RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.**

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin). Desta maneira, todo corpo com temperatura absoluta acima de zero pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética.

O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre. A energia eletromagnética que não precisa de um meio material para se propagar, sendo definida como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz ( $c = 300.000 \text{ Km/s}$ , onde "c" é a velocidade da luz).

A distância entre dois pontos semelhantes, como mostra a Figura 1, define o comprimento de onda e, o número de ondas que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo, define a frequência da radiação eletromagnética.

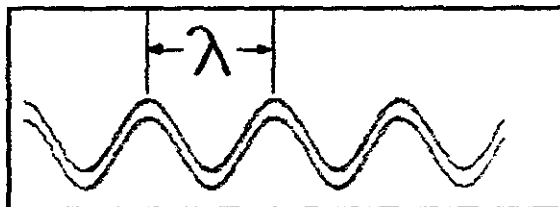


Fig. 1 – Comprimento de onda

Dado que a velocidade de propagação das ondas eletromagnética é diretamente proporcional à sua frequência e comprimento de onda, esta pode ser expressa por:

$$c = f \cdot \lambda \quad (1)$$

onde:

$c$  = velocidade da luz (m/s)

$f$  = frequência (ciclo/s ou Hz)

$\lambda$  = comprimento de onda (m)

A quantidade de energia ( $Q$ ) emitida, transferida ou recebida na forma de energia eletromagnética, está associada a cada comprimento de onda ou frequência e é definida por:

$$Q = h \cdot f = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34}$  joule segundo (J.s)) e a unidade que quantifica esta energia é dada em Joule (J). Através desta equação verifica-se que quanto maior a quantidade de energia maior será a frequência ou menor será o comprimento de onda a ela associada e vice-versa.

Devido a ordem de grandeza destas variáveis é comum utilizar unidades submúltiplas do metro para comprimento de onda e múltiplas do Hertz para frequência, como:

micrometro:  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

nanometro:  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

quilohertz:  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$

megahertz:  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$

## **1.2 ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO**

A energia eletromagnética pode ser ordenada de maneira contínua em função de seu comprimento de onda ou de sua frequência, sendo esta disposição denominada de espectro eletromagnético. Este apresenta subdivisões de acordo com as características de cada região. Cada subdivisão é função do tipo de processo físico que dá origem a energia eletromagnética, do tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto sobre o qual esta incide, e da transparência da atmosfera em relação à radiação eletromagnética. O espectro eletromagnético se estende desde comprimentos de onda muito curtos associados aos raios cósmicos, até as ondas de rádio de baixa frequência e grandes comprimentos de onda, como mostra a Figura 2.

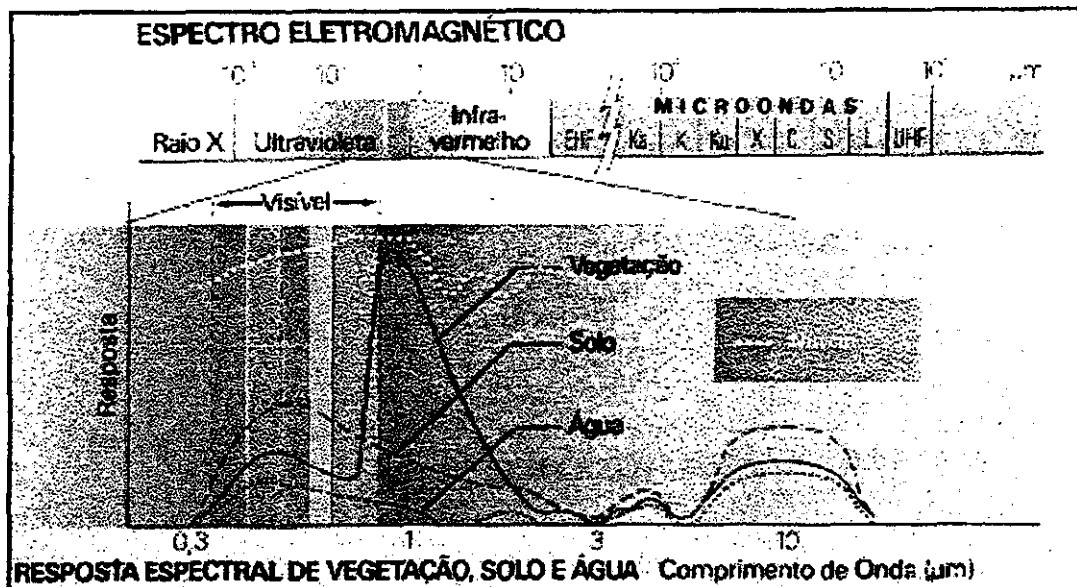


Fig. 2 - O espectro eletromagnético.

A medida que se avança para a direita do espectro eletromagnético as ondas apresentam maiores comprimentos de onda e menores frequências. A faixa espectral mais utilizada em sensoriamento remoto estende-se de 0,3  $\mu\text{m}$  a 15  $\mu\text{m}$ , embora também utilize a faixa de microondas. Podem-se observar na Figura 2 a existência das seguintes regiões:

*Radiação Gama:* é emitida por materiais radioativo e, por ser muito penetrante (alta energia), tem aplicações em medicina (radioterapia) e em processos industriais (radiografia industrial).

*Raio X:* é produzido através do freamento de elétrons de grande energia eletromagnética. Seu médio poder de penetração o torna adequado para uso médico (raio X) e industrial (técnicas de controle industrial).

*Ultravioleta (UV):* é produzida em grande quantidade pelo Sol, sendo emitida na faixa de 0,003  $\mu\text{m}$  até aproximadamente 0,38 $\mu\text{m}$ . Seu poder de penetração a torna nociva aos seres vivos, porém esta energia eletromagnética é praticamente toda absorvida pela camada de ozônio atmosférico.

*Visível (LUZ)*: é o conjunto de radiações eletromagnéticas que podem ser detectadas pelo sistema visual humano. A sensação de cor que é produzida pela luz está associada a diferentes comprimentos de ondas. As cores estão associadas aos seguintes intervalos espectrais.

violeta: 0,38 a 0,45  $\mu\text{m}$

azul: 0,45 a 0,49  $\mu\text{m}$

verde: 0,49 a 0,58  $\mu\text{m}$

amarelo: 0,58 a 0,6  $\mu\text{m}$

laranja: 0,6 a 0,62  $\mu\text{m}$

vermelho: 0,62 a 0,70  $\mu\text{m}$

*Infravermelho (IV)*: é a região do espectro que se estende de 0,7 a 1000  $\mu\text{m}$  e costuma ser dividida em três sub-regiões:

IV próximo: 0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$

IV médio: 1,3 a 6  $\mu\text{m}$

IV distante: 6 a 1000  $\mu\text{m}$

A energia eletromagnética no intervalo espectral correspondente ao infravermelho próximo é encontrada no fluxo solar ou mesmo em fontes convencionais de iluminação (lâmpadas incandescentes), enquanto as energias eletromagnéticas correspondentes ao intervalo espectral do infravermelho médio e distante (também denominadas de radiação termal) são provenientes da emissão eletromagnética de objetos terrestres.

*Microondas*: são radiações eletromagnéticas produzidas por sistemas eletrônicos (osciladores) e se estendem pela região do espectro de 1mm até cerca de 1m, o que corresponde ao intervalo de frequência de 300GHz a 300MHz. Os feixes de microondas são emitidos e detectados pelos sistemas de radar (*radio detection and ranging*).

*Radio:* é o conjunto de energias de frequência menor que 300MHz (comprimento de onda maior que 1m). Estas ondas são utilizadas principalmente em telecomunicações e radiodifusão.

Algumas regiões do espectro eletromagnéticos tem denominações que indicam alguma propriedade especial, como por exemplo:

*Espectro óptico:* refere-se a região do espectro eletromagnético que compreende as energias que podem ser coletadas por sistemas ópticos (ultravioleta, visível e infravermelho).

*Espectro solar:* refere-se a região espectral que compreende os tipos de energia emitidas pelo Sol. Cerca de 99% da energia solar que atinge a Terra encontra-se concentrada na faixa de 0,28 a 4  $\mu\text{m}$ .

*Espectro visível:* refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas percebido pelo sistema visual humano, também denominado de luz.

*Espectro termal:* refere-se ao conjunto das energias eletromagnéticas emitidas pelos objetos terrestres e encontra-se nos intervalos espectrais correspondente ao infravermelho médio e distante.

Quando consideramos o Sol como fonte de energia eletromagnética (ou fonte de iluminação) os sensores detectam a energia refletida pelos objetos terrestres, portanto o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro solar. Quando a Terra atua como fonte de energia eletromagnética os sensores detectam a energia emitida pelos corpos terrestres, portanto o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro termal. Esta distinção torna possível o tratamento separado desses dois tipos de energia eletromagnética, facilitando o estudo de transferência de energia radiante.

### 1.3 ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

A energia eletromagnética ao atravessar atmosfera terrestre pode ser absorvida, refletida e espalhada. Os gases presentes na atmosfera apresentam capacidade de absorção muito variáveis em relação ao comprimento de onda da energia solar incidente no sistema terra-atmosfera e da energia emitida pela superfície terrestre. Existem regiões do espectro eletromagnético para os quais a atmosfera absorve muito da energia incidente no topo da atmosfera, às vezes não deixando chegar quase nada de energia na superfície terrestre. Esta interação da energia com a atmosfera pode ser comparada com uma cortina que age como um filtro e, dependendo de seu tecido, atenua ou até mesmo impede a passagem da luz. Neste caso os diferentes tipos de tecidos da cortina poderia ser comparado com os diferentes gases existentes na atmosfera terrestre, os quais atenuam a energia eletromagnética diferentemente.

A Figura 3 mostra a distribuição do espectro de energia eletromagnética do Sol no topo da atmosfera e na superfície terrestre observada ao nível do mar. As áreas sombreadas representam as absorções devido aos diversos gases presentes numa atmosfera limpa. Os principais gases absorvedores da radiação eletromagnética são vapor d'água ( $H_2O$ ), oxigênio ( $O_2$ ), ozônio ( $O_3$ ) e gás carbônico ( $CO_2$ ). Os gases  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NO$  e  $N_2O$  ocorrem em pequenas quantidades e também exibem espectros de absorção.

Cerca de 70% da energia solar está concentrada na faixa espectral compreendida entre 0,3 e 0,7  $\mu m$  e como a atmosfera absorve muito pouco nesta região, grande parte da energia solar atinge a superfície da Terra. Também existem regiões no espectro eletromagnético para os quais a atmosfera é opaca (absorve toda a energia eletromagnética). Na região do ultravioleta e visível, o principal gás absorvedor da energia eletromagnética solar é o ozônio ( $O_3$ ), o qual protege a terra dos raios ultravioletas que são letais a vida vegetal e animal. Na região do infravermelho os principais gases absorvedores são o vapor d'água ( $H_2O$ ) e o dióxido de carbono ( $CO_2$ )



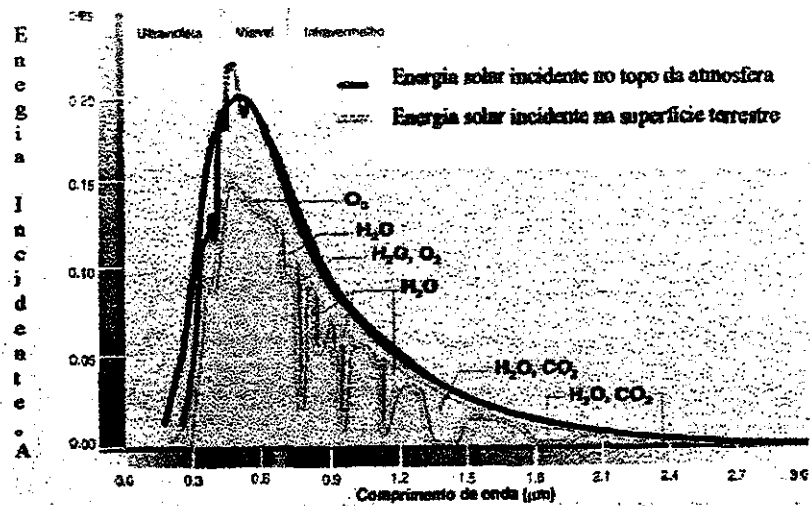


Fig. 3 - Curvas da distribuição espectral da energia solar na atmosfera/superfície terrestre.

Existem regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera quase não afeta a energia eletromagnética, isto é, a atmosfera é transparente à energia eletromagnética proveniente do Sol ou da superfície terrestre. Estas regiões são conhecidas como janelas atmosféricas. Nestas regiões são colocados os detectores de energia eletromagnética, e portanto onde é realizado o sensoriamento remoto dos objetos terrestres. A Figura 4 apresenta as janelas atmosféricas e as regiões afetadas pelos principais gases atmosféricos.

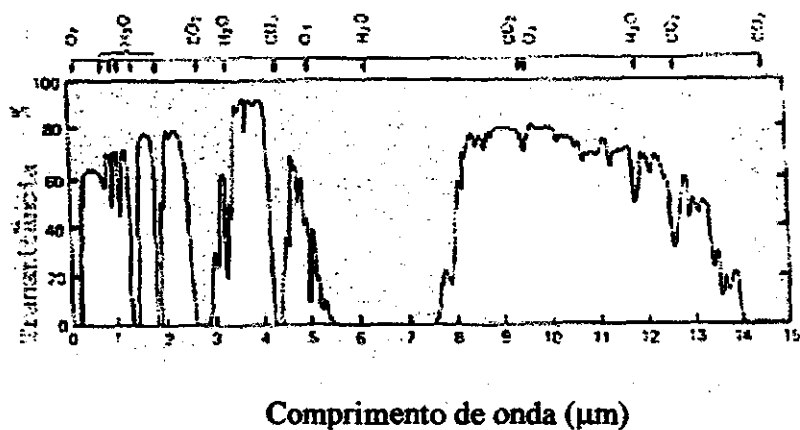


Fig. 4 – Transmitância espectral da atmosfera

A atmosfera quase não absorve a energia eletromagnética emitida pelos objetos que compõem a superfície terrestre, com exceção de uma pequena banda de absorção do ozônio, centrada em 9,6  $\mu\text{m}$ . Nesta janela atmosférica o sistema terra-atmosfera perde energia para o espaço mantendo assim o equilíbrio térmico do planeta. Essas considerações são válidas para a atmosfera limpa, pois tanto nuvens ou poluentes tendem a absorver a energia eletromagnética. As nuvens absorvem toda a energia na região do infravermelho, e emitem radiação eletromagnética proporcionalmente a sua temperatura. Acima de 14  $\mu\text{m}$  a atmosfera é quase que totalmente opaca a energia eletromagnética, ou seja, absorvem toda a energia eletromagnética com comprimentos de onda acima deste valor.

As interações da energia eletromagnética com os constituintes atmosféricos influenciam a caracterização da energia solar e terrestre disponíveis para o sensoriamento remoto de recursos naturais. A energia eletromagnética ao atingir a atmosfera é por esta espalhada, e parte desta energia espalhada retorna para o espaço, vindo a contaminar a energia refletida ou emitida pela superfície e que são detectadas pelos sensores orbitais.

## 1.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE OBJETOS NATURAIS

O fluxo de energia eletromagnética ao atingir um objeto (energia incidente) sofre interações com o material que o compõe, sendo parcialmente refletido, absorvido e transmitido pelo objeto, como pode ser visto na Figura 5.

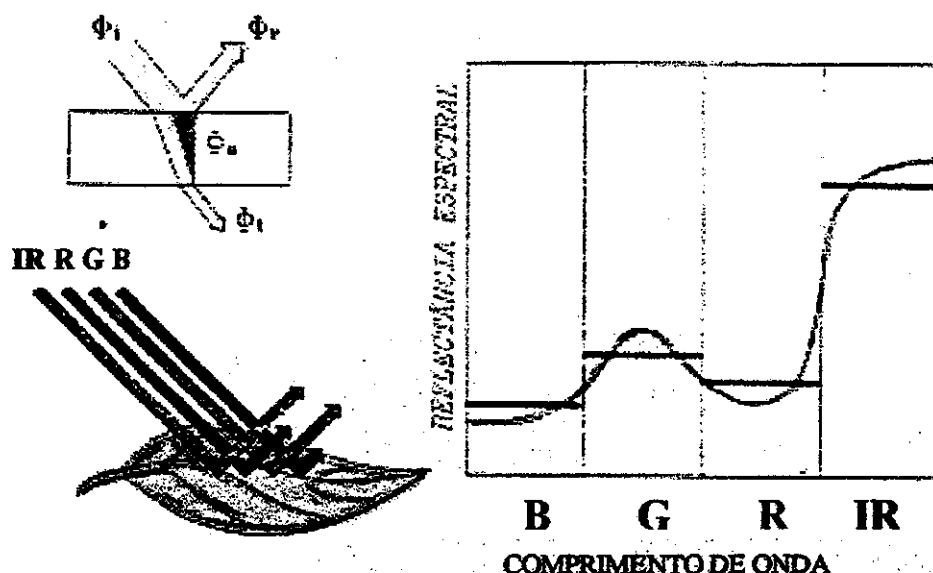


Fig. 5 - Interação da energia eletromagnética com o objeto.

A absorção, reflexão e transmissão da energia incidente poder ser total ou parcial, guardando sempre o princípio de conservação de energia. A capacidade de um objeto absorver, refletir e transmitir a radiação eletromagnética é denominada, respectivamente, de absortância, reflectância e transmitância, sendo que valores variam entre 0 e 1.

O comportamento espectral de um objeto pode ser definido como sendo o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, também conhecido como a assinatura espectral do objeto. A assinatura espectral do objeto define as feições deste, sendo que a forma, a intensidade e a localização de cada banda de absorção é que caracteriza o objeto.

Os objetos interagem de maneira diferenciada espectralmente com a energia eletromagnética incidente, pois os objetos apresentam diferentes propriedades físico-química e biológica. Estas diferentes interações é que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres sensoriados remotamente, pois são reconhecidos devido a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda. A Figura 2 apresenta os espectros de reflectância de alguns objetos bastante freqüentes nas imagens de sensoriamento remoto como, água, solo, areia, vegetação e nuvens.

O conhecimento do comportamento espectral dos objetos terrestres é muito importante para a escolha da região do espectro sobre a qual pretende-se adquirir dados para determinada aplicação.

As características básicas observadas no comportamento espectral destes objetos são:

A *vegetação sadia* apresenta alta absorção da energia eletromagnética na região do espectro visível, que é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese. Dentro do espectro visível a absorção é mais fraca na região que caracteriza a coloração da vegetação. A alta reflectância no infravermelho próximo (até 1,3 $\mu$ m) é devido a estrutura celular, sendo que a partir deste comprimento de onda é o conteúdo de água na vegetação quem modula as bandas de absorção presentes no comportamento espectral desta.

O comportamento espectral de *rochas* é resultante dos espectros individuais dos minerais que as compõem. Os minerais apresentam características decorrentes de suas bandas de absorção. Portanto a absorção é o principal fator que controla o comportamento espectral das rochas.

O comportamento espectral dos *solos* é também dominado pelas bandas de absorção de seus constituintes. As combinações e arranjos dos materiais constituintes dos solos é que define o seu comportamento espectral, sendo que os principais fatores são a

constituição mineral, a matéria orgânica, a umidade e a granulometria (textura e estrutura) deste.

A água pode-se apresentar na natureza em três estados físicos, os quais apresentam comportamento espectral totalmente distintos. O comportamento espectral da *água líquida pura* apresenta baixa reflectância (menor do que 10%) na faixa compreendida entre 0,38 e 0,7 $\mu$ m e máxima absorção acima 0,7 $\mu$ m. O comportamento espectral de *corpos d'água* é modulado principalmente pelos processos de absorção e espalhamento produzidos por materiais dissolvidos e em suspensão neste, pois é verificado que a presença de matéria orgânica dissolvidas em corpos d'água desloca o máximo de reflectância espectral para o verde-amarelo, enquanto que a presença de matéria inorgânica em suspensão resulta num deslocamento para a direção do vermelho.

O comportamento espectral de *nuvem* apresenta elevada reflectância (em torno de 70%), em todo o espectro óptico com destacadas bandas de absorção em 1, 1,3 e 2 $\mu$ m.

Com intuito de melhor interpretar as imagens de satélites, muitos pesquisadores têm se dedicado a pesquisa fundamental, ou seja, a obtenção e a análise de medidas da reflectância dos objetos terrestres em experimento de campo e de laboratório, os quais possibilitam uma melhor compreensão das relações existentes entre o comportamento espectral dos objetos e as suas propriedades.

## 1.5 SISTEMA SENSOR

Os sensores remotos são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética (em determinadas faixas do espectro eletromagnético) proveniente de um objeto, transformá-las em um sinal elétrico e registrá-las, de tal forma que este possa ser armazenado ou transmitido em tempo real para posteriormente ser convertido em informações que descrevem as feições dos objetos que compõem a superfície terrestre. Portanto, as variações de energia eletromagnética da área observada podem ser coletadas por sistemas sensores imageadores ou não-imageadores.

Os sistemas imageadores fornecem como produto uma imagem da área observada, como por exemplo temos os “*scanners*” e as câmaras fotográficas, enquanto que os sistemas não-imageadores, também denominados radiômetros ou espectroradiômetros, apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos.

Os sistemas sensores também podem ser classificados como ativos e passivos. Os sensores passivos não possuem fonte própria de energia eletromagnética, como por exemplo os sensores do satélite *Landsat 5*, os radiômetros e espectroradiômetros. Os sensores ativos possuem uma fonte própria de energia eletromagnética. Eles emitem energia eletromagnética para os objetos terrestres a ser imageados e detectam parte desta energia que é refletida por estes na direção deste sensores. Como exemplo podemos citar o radar e qualquer câmera fotográfica com *flash*. Os sistemas fotográficos foram os primeiros equipamentos a serem desenvolvidos e utilizados para o sensoriamento remoto de objetos terrestres

As principais partes de um sensor são:

a) *coletor*: é um componente óptico capaz de concentrar o fluxo de energia proveniente da amostra no detector;

b) *filtro*: é o componente responsável pela seleção da faixa espectral da energia a ser medida;

c) *detetor*: é um componente de pequenas dimensões feito de um material cujas propriedades elétricas variam ao absorver o fluxo de energia, produzindo um sinal elétrico.

d) *processador*: é um componente responsável pela amplificação do fraco sinal gerado pelo detetor e pela digitalização do sinal elétrico produzido pelo detector; e

e) *unidade de saída*: é um componente capaz de registrar os sinais elétricos captados pelo detector para posterior extração de informações.

A qualidade de um sensor geralmente é especificada pela sua capacidade de obter medidas detalhadas da energia eletromagnética. As características dos sensores estão relacionadas com a resolução geométrica, espectral e radiométrica.

A *resolução geométrica* ou *espacial* representa a capacidade de realização de medidas sobre amostras de pequenas dimensões. A resolução do elemento de superfície medido depende principalmente do detector, da altura do posicionamento do sensor em relação ao objeto. Para um dado nível de posicionamento do sensor, quanto menor for a resolução geométrica deste maior será o grau de distinção entre objetos próximos. Por exemplo, o sistema sensor do *Thematic Mapper* do *Landsat 5* possui uma resolução espacial de 30 metros em suas bandas.

A *resolução espectral* refere-se a melhor ou pior caracterização do objeto em relação a largura espectral em que opera o sensor, portanto define o intervalo espectral em que são realizadas as medidas, e conseqüentemente a composição espectral do fluxo de energia que atinge o detector. Quanto maior for o número de medidas num determinado intervalo de comprimento de onda melhor será a resolução espectral da coleta. Por exemplo, o *Landsat 5* possui os sensores TM e *Multispectral Scanning System* (MSS). O sensor TM apresenta algumas bandas espectrais mais estreitas do que o sensor MSS, portanto nestas bandas o TM apresenta melhor resolução espectral do que o MSS.

A *resolução radiométrica* define a eficiência do sistema em detectar pequenos sinais, ou seja, refere-se a maior ou menor capacidade do sistema sensor em detectar e registrar diferenças na energia reflectância e/ou emitida pelos elementos que compõe a cena (rochas, solos, vegetações, águas, etc). Por exemplo, o sistema sensor TM do *Landsat 5* distingue até 256 tons distintos de sinais representando-os em 256 níveis de cinza.

Uma outra qualidade importante é a resolução temporal do sensor, que está relacionada com a repetitividade com que o sistema sensor pode adquirir informações referentes ao objeto. Por exemplo, o *Landsat 5* possui uma repetitividade de 16 dias.

Para melhor interpretar os sinais coletados faz-se necessário o conhecimento das condições experimentais como: fonte de radiação, efeitos atmosféricos, características do sensor, geometria de aquisição de dados, tipo de processamento e estado do objeto.

## 1.6 NÍVEIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os sistemas sensores podem ser mantidos no nível orbital (satélites) ou suborbital (acoplados em aeronaves ou mantidos ao nível do solo), como pode ser visualizado na Figura 6.

Ao nível do solo é realizada a aquisição de dados em campo ou em laboratório onde as medidas são obtidas utilizando-se radiômetros ou espectroradiômetros.

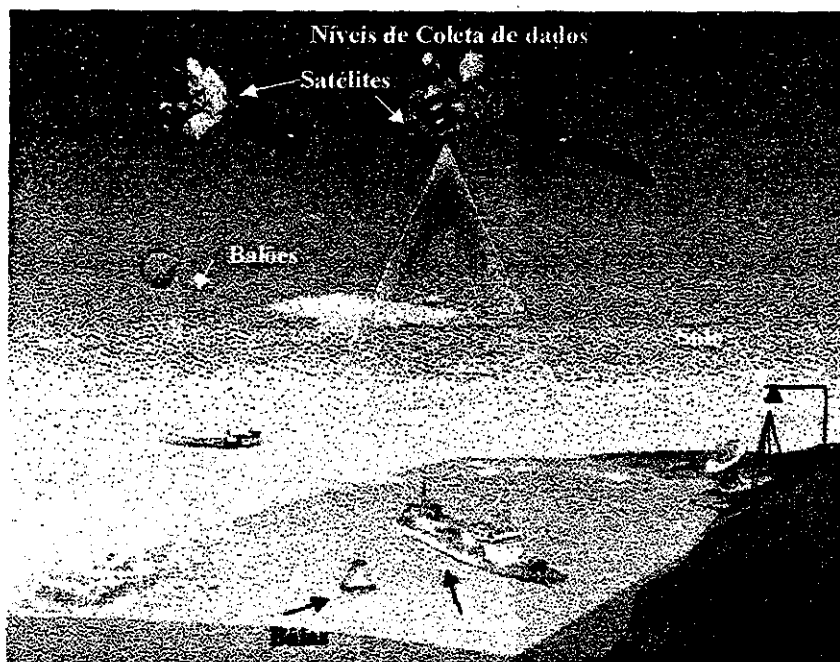


Fig. 6 – Níveis de Coleta de Dados

Fonte : Moreira (1999)



Ao nível de aeronaves os dados de sensoriamento remoto podem ser adquiridos por sistemas sensores de varredura óptico-eletrônico, sistemas fotográficos ou radar, e a resolução espacial destes dados dependerá da altura do vôo no momento da aerolevantamento.

A obtenção de dados no nível orbital é realizada através de sistemas sensores a bordo de satélites artificiais. O sensoriamento remoto neste nível permite a repetitividade das informações, bem como um melhor monitoramento dos recursos naturais para grandes áreas da superfície terrestre.

## **2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Moreira, M. A. **Níveis de coletas de dados.** (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999). Comunicação Pessoal.

Novo, E. M. L. M. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.* São Paulo. ed. : Edgard Blücher, 1989, 308p.

Steffen, A. C., Moraes, E. C. *Introdução à radiometria.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VII. Curitiba, 10-14. Maio, 1993. Tutorial São José dos Campos. INPE, 1993. 7p.

Steffen, A. C., Moraes, E. C., Gama, F. F. *Radiometria óptica espectral.* In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, VIII. Salvador, 14-19. Abr., 1996. Tutorial São José dos Campos. INPE, 1996. 43p.

## **CAPÍTULO 3**

# **APLICAÇÕES DE SATÉLITES METEOROLÓGICOS**

**Nelson Jesus Ferreira\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e-mail: [nelson@ltid.inpe.br](mailto:nelson@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>3-5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3-7</b>
<b>2. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....</b>	<b>3-7</b>
<b>3. TIPOS DE ÓRBITAS.....</b>	<b>3-8</b>
3.1 SATÉLITES METEOROLÓGICOS GEOESTACIONÁRIOS.....	3-8
3.2 SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR.....	3-11
<b>4. TIPOS DE IMAGENS.....</b>	<b>3-12</b>
4.1 INFRAVERMELHO.....	3-13
4.2 VISÍVEL.....	3-15
4.3 VAPOR D'ÁGUA.....	3-17
<b>5. APLICAÇÕES DE DADOS (IMAGENS) TRANSMITIDOS POR SATÉLITES.....</b>	<b>3-18</b>
5.1 MONITORAMENTO DE NEVOEIROS.....	3-19
5.2 ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO.....	3-22
5.3 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO.....	3-25
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>3-27</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>3-27</b>

## LISTA DE FIGURAS

1. POSIÇÃO TÍPICA DE UM SATÉLITE GEOSTACIONÁRIO.....	1-9
2. REGIÃO MONITORADA PELO GOES/EAST .....	1-10
3. REGIÃO MONITORADA PELO GOES/WEST .....	1-10
4. REGIÃO MONITORADA PELO METEOSAT .....	1-10
5. REGIÃO MONITORADA PELO ELEKTRO .....	1-10
6. REGIÃO MONITORADA PELO GMS .....	1-11
7. REGIÃO MONITORADA PELO FENGYUN .....	1-11
8. ILUSTRAÇÃO DO TRAJETO DOS SATÉLITES DE ORBITA POLAR ..	1-12
9. O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO SEGUNDO O COMPRIMENTO DE ONDA (EIXO DIREITO) E FREQUÊNCIA (EIXO ESQUERDO) .....	1-13
10a. IMAGEM INFRAVERMELHO, SATÉLITE GOES-8, 18/10/99, 16:00 HORAS .....	1-14
10b. IMAGEM INFRAVERMELHO, SATÉLITE GOES-8, 08/05/2000, 06:00 UTC .....	1-15
11a. IMAGEM VISIVEL, SATÉLITE GOES-8, 18/10/99, 16:00 HORAS .....	1-16
11b. GOES 8, VÍSIVEL, 03Z, 08/05/2000 .....	1-16
11c. GOES 8, VÍSIVEL, 06Z, 08/05/2000 .....	1-16
11d. GOES 8, VÍSIVEL, 09Z, 08/05/2000 .....	1-17
11e. GOES 8, VÍSIVEL, 12Z, 08/05/2000 .....	1-17
11f. GOES 8, VÍSIVEL, 18Z, 08/05/2000 .....	1-17

<b>11g. GOES 8, VÍSEL, 18Z, 09/05/2000 .....</b>	<b>1-17</b>
<b>12. IMAGENS VAPOR D'ÁGUA, SATÉLITE GOES-8, 18/10/99, 16:00 HORAS .....</b>	<b>1-18</b>
<b>13. IMAGEM DE SATÉLITE PROCESSADA APRESENTANDO EM AMARELO AS REGIÕES COM NEVOEIROS OU NUVENS DE STRATUS .....</b>	<b>1-21</b>
<b>14. IMAGEM DE SATÉLITES APRESENTANDO EM CORES FALSAS A LOCALIZAÇÃO DE CHUVA NA AMÉRICA DO SUL E VIZINHANÇAS ...</b>	<b>1-23</b>
<b>15. DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL DA CHUVA SOBRE RORAIMA, DADOS OBTIDOS PELO RADAR PR A BORDO DO TRMM .....</b>	<b>1-24</b>
<b>16. DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA CHUVA AO LONGO DA LINHA A (FIGURA ANTERIOR), DADOS OBTIDOS PELO RADAR PR A BORDO DO TRMM .....</b>	<b>1-24</b>
<b>17. IMAGEM MÉDIA DE NDVI .....</b>	<b>1-26</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os satélites meteorológicos fazem parte do grupo de satélites de sensoriamento remoto e monitoramento do meio ambiente. O interesse pelo uso de satélites para monitorar as condições meteorológicas em nosso planeta seguiu a evolução dos programas espaciais americano e russo na década de sessenta. Com o advento dos primeiros satélites meteorológicos, os meteorologistas tiveram condições de monitorar e conhecer melhor os diferentes sistemas de tempo presentes na atmosfera terrestre.

No início, as imagens transmitidas pelos satélites, eram essencialmente utilizados para observação de nuvens. Valendo-se de conhecimentos da física, os meteorologistas aprenderam a associar as diferentes fases do ciclo de vida de uma tempestade (linha de instabilidade, furacões, frentes frias etc.) com o comportamento ou padrão das nuvens. Assim, olhando-se para a configuração da área de nebulosidade (conjunto de nuvens) associada a uma frente fria numa imagem de satélite, é possível saber se ela está dissipando ou intensificando. Com o avanço tecnológico foram desenvolvidos sensores (instrumentos de observação que ficam a bordo do satélite) sofisticados que monitoram "fotografam" o nosso planeta de formas diferentes, possibilitando assim outras aplicações, tais como a identificação de nuvens, de queimada, geada, chuva etc.

## **2. CARACTERÍSTICAS GERAIS**

Os dados transmitidos pelos satélites meteorológicos podem ser convertidos em imagens fotográficas ou processados na forma digital. A qualidade desses dados depende das características do satélite utilizado. Essencialmente existem dois tipos de satélites meteorológicos: os geoestacionários e os de órbita polar. Os geoestacionários tem a mesma velocidade de rotação da Terra e os de órbita polar orbitam em um plano quase perpendicular ao equador, mantendo sempre o mesmo ângulo com o sol.

A energia (proveniente de nosso Planeta) detectada pelos sensores instalados a bordo dos satélites meteorológicos, é transmitida à Terra em forma de sinais eletrônicos. Esses sinais, associados a temperatura e refletividade dos alvos, podem ser convertidos

diretamente em tonalidades de cinza (imagem fotográfica) ou então processados na forma digital. Os sinais digitais contêm muito mais informações do que as imagens em papel fotográfico, onde os inúmeros níveis de cinza não podem ser vistos. Os dados digitais podem ser retificados para mapas de diferentes escalas e transformados em imagens gradeadas. Além disso, a escala de cinza pode ser alterada para identificar áreas de interesse, tais como a temperatura da superfície terrestre e nuvens. Neste caso, pode-se utilizar inclusive cores falsas para destacar essas áreas. Finalmente, os dados digitais podem ser processados para inferir informações sobre vento, temperatura, umidade etc.

### **3. TIPOS DE ÓRBITAS**

Como mencionado anteriormente, os satélites meteorológicos podem ser classificados de acordo com sua órbita, em geoestacionários e de órbita polar.

#### **3.1 SATÉLITES METEOROLÓGICOS GEOESTACIONÁRIOS:**

Os satélites geoestacionários fornecem imagens de uma mesma região geográfica, a cada 30 minutos, no canal visível (sensor equivalente ao que o olho humano enxerga) durante o dia, e no espectro infravermelho (sensor que mede a energia/temperatura emitida pelos corpos) dia e noite. O menor elemento de área (resolução espacial) detectado pelos satélites varia de 1 km até 8 km. Os satélites geoestacionários ou geosíncronos, orbitam no plano equatorial da Terra (Figura 1) a cerca de 36.000 km de altura sobre um ponto fixo na superfície terrestre. Nesta altura, o período orbital do satélite coincide com a rotação da Terra, e o satélite parece estar estacionado sobre o mesmo ponto no equador. Como o campo de visada de um satélite geoestacionário é fixado, ele sempre vê a mesma região geográfica. Isto é ideal para acompanhar de maneira quase continua a evolução do estado da atmosfera e dos padrões de nuvens numa certa região.

O satélite GOES-8 é um satélite geoestacionário americano que atualmente monitora o nosso continente. Os satélites geoestacionários medem em tempo real, significando que

eles transmitem fotografias para estações de recepção em Terra, assim que as "câmeras" obtêm a foto. Uma sucessão de fotos desse satélite pode ser mostrada em seqüência para produzir um filme mostrando movimentos de nuvens. Isto possibilita aos meteorologistas monitorar a evolução dos sistemas meteorológicos. A direção e velocidade do vento também podem ser determinadas monitorando-se os movimentos de nuvens.

Atualmente existem os seguintes satélites meteorológicos geoestacionários:

GOES-EAST (norte americano); monitora as Américas, Figura 2;

GOES-WEST(norte americano); monitora o Oceano Pacífico Leste, Figura 3;

METEOSAT (europeu); monitora a Europa e África, Figura 4;

ELEKTRO (russo); monitora a Ásia Central e Oceano Índico, Figura 5;

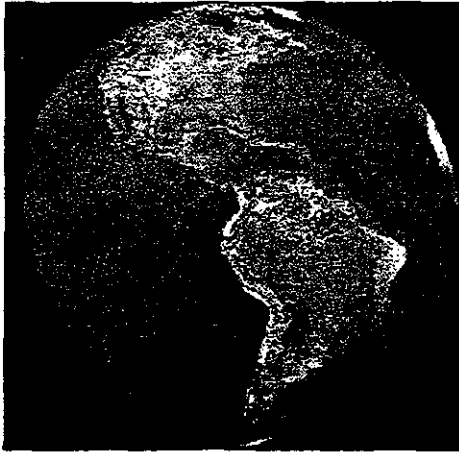
GMS (japonês); monitora o Japão, Austrália e o Pacífico Oeste, Figura 6;

FENGYUN-2 (chinês); monitora a China e oceano Índico, Figura 7.

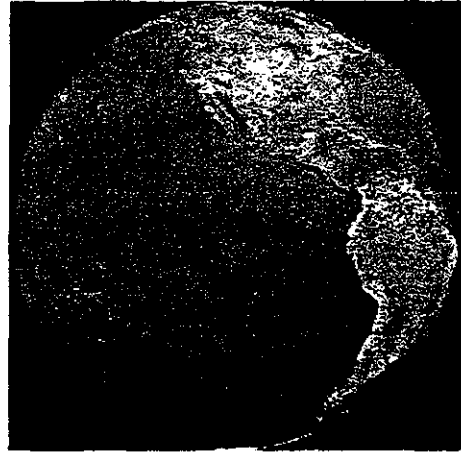


Fig. 1 - Posição típica de um satélite geoestacionário  
Fonte : Fourmilab (2000)





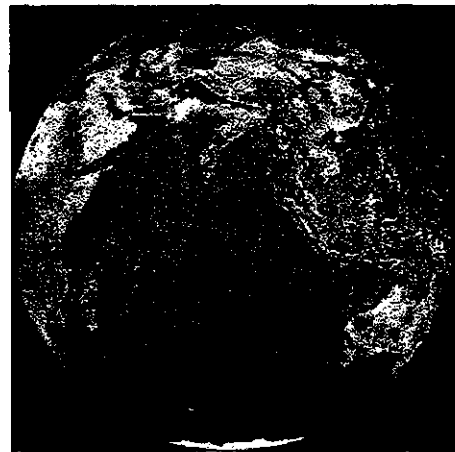
**Fig. 2 - Região monitorada pelo GOES EAST**  
Fonte: Fourmilab (2000)



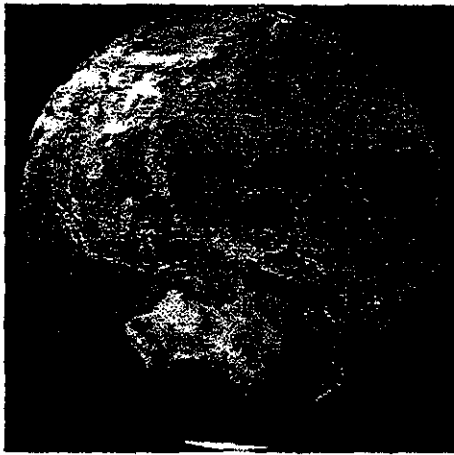
**Fig. 3 - Região monitorada pelo GOES WEST**  
Fonte: Fourmilab (2000)



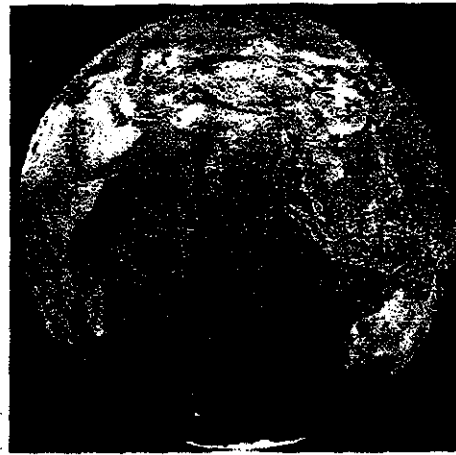
**Fig. 4 - Região monitorada pelo METEOSAT**  
Fonte: Fourmilab (2000)



**Fig. 5 - Região monitorada pelo ELEKTRO**  
Fonte: Fourmilab (2000)



**Fig. 6 - Região monitorada pelo GMS**  
Fonte: Fourmilab (2000).



**Fig. 7 - Região monitorada pelo FENGYUN**  
Fonte: Fourmilab (2000)

### **3.2 SATÉLITES DE ÓRBITA POLAR**

Os satélites de órbita polar aproximadamente seguem os meridianos, passando sobre os pólos norte e sul em cada revolução (Figura 8). Tipicamente, esses satélites são colocados numa órbita síncrona com o sol, numa altura entre 700 a 850 Km, com período orbital de cerca de 100 minutos. Como a Terra gira para leste abaixo do satélite, cada passagem monitora uma área a oeste da passagem anterior. Os satélites de órbita polar têm a vantagem de fotografarem nuvens diretamente abaixo deles. Desta forma podem fornecer informações detalhadas sobre tempestades, sistemas de nuvens, queimadas e cobertura vegetal.

Estes satélites são também chamados de heliosíncronos, por manterem constante a sua posição angular relativa ao sol. Eles são colocados em órbita circular, polar, com período em torno de 100 minutos. A observação da Terra a partir destes satélites é feita, sobre uma mesma região, em passagens que se repetem a cada seis horas, alternadamente, quando se dispõe de dois satélites.

Atualmente os satélites meteorológicos de órbita polar (NOAA 14 e 15) carregam inúmeros sensores para medir variáveis meteorológicas, tais como temperatura, umidade e ozônio, fornecendo informações importantes para os meteorologistas,

agricultores, pescadores e pilotos. Dentre essas variáveis destacam-se as medidas da temperatura da superfície do mar e medidas de radiação.

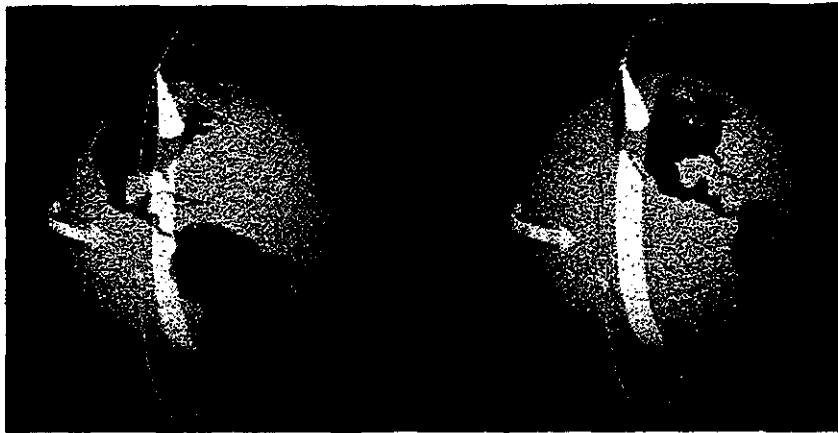


Fig. 8 - Ilustração do trajeto dos satélites de Órbita Polar  
Fonte: Fourmilab (2000)

#### 4. TIPOS DE IMAGENS

A radiação, quando disposta de acordo com os comprimentos de onda (distância entre duas cristas consecutivas de uma onda), forma um arranjo contínuo, conhecido como espectro eletromagnético (Figura 9). A energia radiante transmitida pelo sol abrange uma ampla faixa, que vai desde os raios gama e raios X (ondas muito curtas) até as ondas de rádio (ondas longas). Nossos sentidos são capazes de detectar a radiação somente quando seus comprimentos de onda situam-se dentro da região do espectro entre aproximadamente 0,1 e 100 micra. Nessa faixa de comprimento de onda, a radiação chamada infravermelha pode causar aquecimento num corpo receptor, na faixa (banda) entre aproximadamente 1,0 a 100 micra. O nervo ótico do olho é sensível à radiação de luz visível na banda estreita entre 0,38 e 0,76 micra. Em Meteorologia, o trecho do espectro que é de maior interesse compreende uma parte do infravermelho (de 8 a 16 micra) e a luz visível (de 0,38 a 0,76 micra). A seguir, apresenta-se as principais características dos sensores utilizados para medir a energia proveniente dessas faixas espectrais.

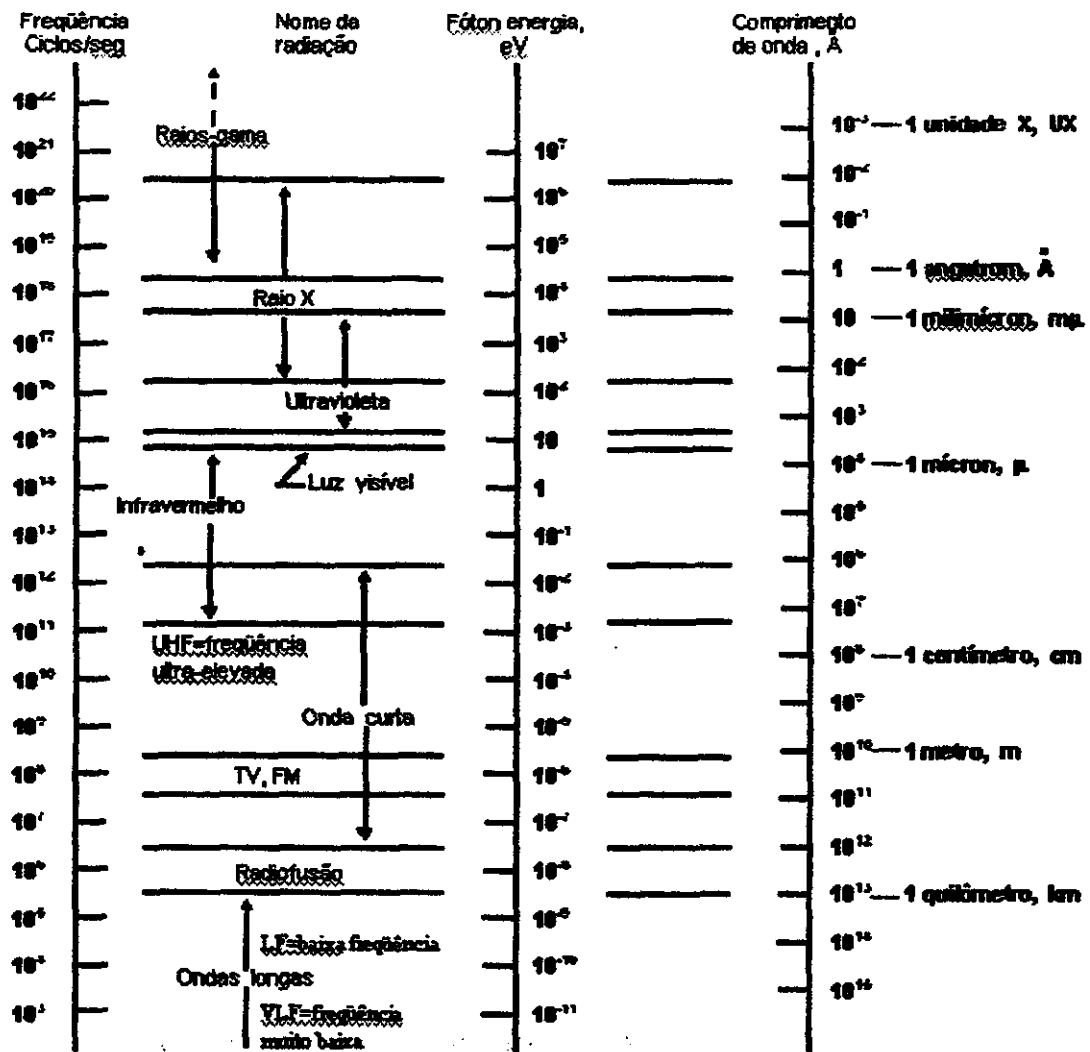


Fig. 9 - O espectro eletromagnético segundo o comprimento de onda (eixo direito) e freqüência (eixo esquerdo).

#### 4.1 INFRAVERMELHO

Os dados no infravermelho são obtidos através dos sensores que medem a radiação de ondas longas, emitidas por nuvens e por superfícies continentais e oceânicas. Baseados em instrumentos adequadamente calibrados, essas medidas podem ser convertidas nas temperaturas dos corpos detectados, e dispostos como tons de cinza em papel fotográfico, ou então, processados na forma digital. Quanto mais quente a superfície, mais radiação infravermelha é emitida. Assim, numa imagem de satélite, nuvens com topos frios e/ou com grande desenvolvimento vertical, apresentam-se com tonalidade branca enquanto que as nuvens baixas são relativamente mais quentes, e portanto

apresentam tonalidade cinza escura. Assim, as imagens no infravermelho (Figura 10) são utilizadas para distinguir tanto diferenças de temperatura em nuvens como também da superfície da Terra ou do mar. No caso de nuvens, estas diferenças trazem informações sobre a altitude delas. A grande vantagem dos sensores infravermelho é que eles fornecem imagens dia e noite.



Fig. 10(a) - Imagem Infravermelho, satélite GOES-8, 18/10/99, 16:00 horas.  
Fonte: INPE (1999)

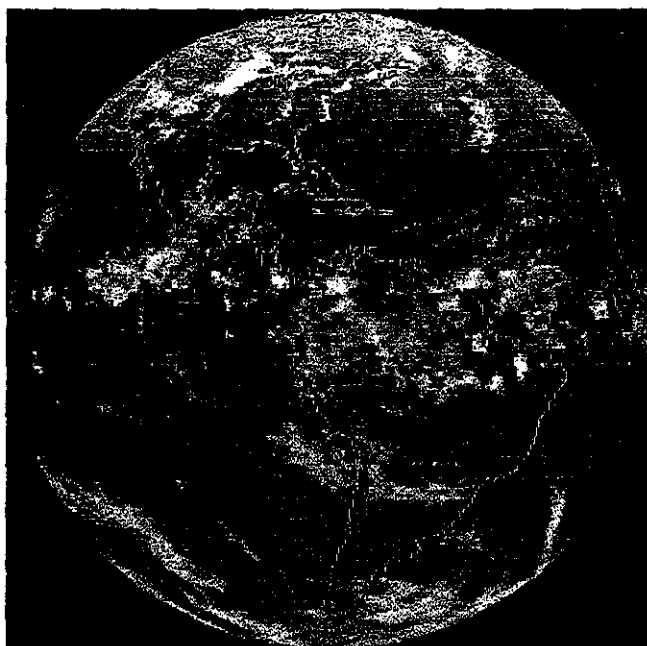


Fig. 10(b) - Imagem Infravermelho, satélite GOES-8, 08/05/2000, 06:00 UTC  
Fonte: UWM (ano)

#### 4.2 VISÍVEL

Os dados no espectro visível são transmitidos pelos sensores instalados a bordo dos satélites meteorológicos, que medem a radiação refletida na porção visível do espectro eletromagnético. Isto é equivalente a tirar fotos em branco e preto da Terra. As áreas brilhantes (Figura 11-a) mostram onde o sol está sendo refletido de volta para o espaço devido a cobertura de nuvens. Nuvens e neve parecem brancas e os oceanos e superfície continental parecem escuros. A refletividade de uma nuvem está relacionada com a espessura da mesma. As imagens no visível são bastante utilizadas para a identificação de estruturas e tipos de nuvens. Uma limitação desse tipo de dados é que eles são disponíveis só durante o dia. As Figuras 11-b a 11-g, exemplifica cobertura diurna dessas imagens

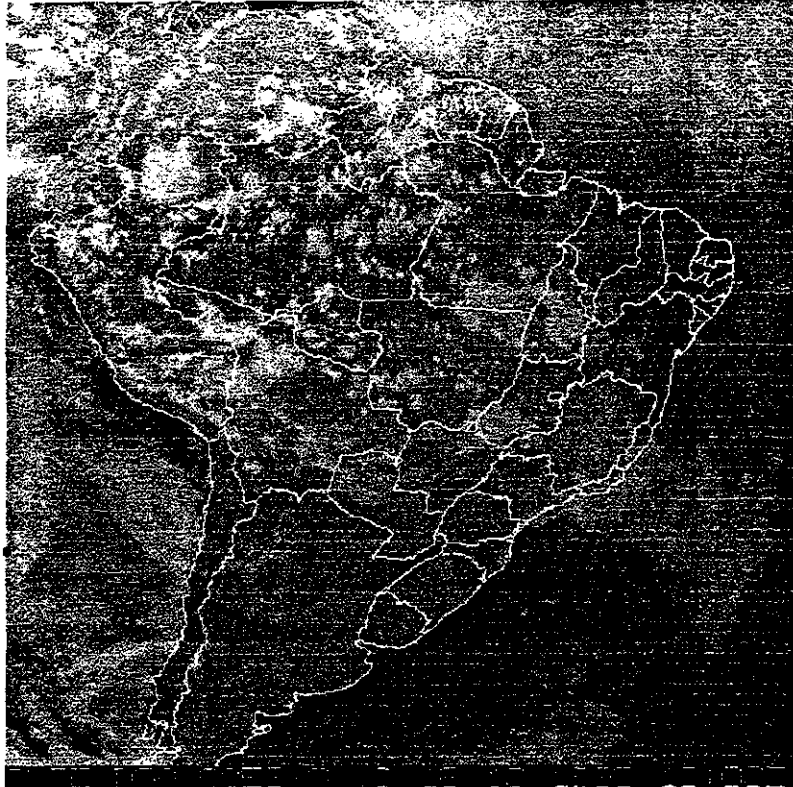


Fig. 11(a) - Imagem Visível, satélite GOES-8, 18/10/99, 16:00 horas.  
Fonte: INPE (1999)

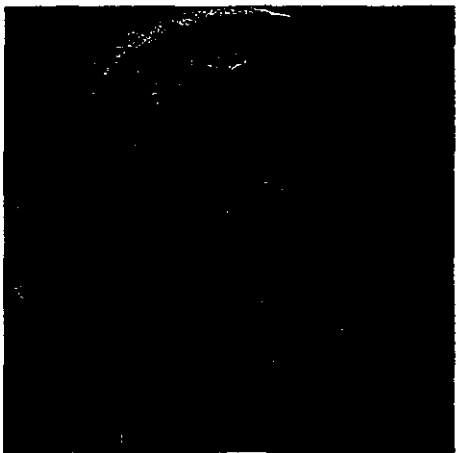


Fig. 11(b)- GOES8,visível, 03Z,08/05/2000  
Fonte : Fourmilab (2000)

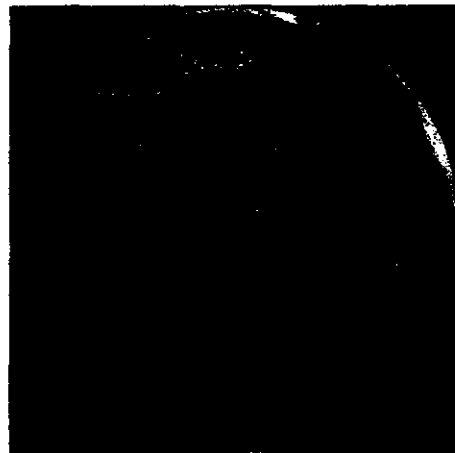


Fig. 11(c)- GOES8,visível,06Z, 08/05/2000  
.....Fonte : Fourmilab(2000)



Fig. 11(d)-GOES8,visível,09Z, 08/05/2000  
Fonte: Fourmilab (2000)



Fig. 11(e)-GOES8,visível,12 Z ,08/05/2000  
Fonte: Fourmilab (2000)



Fig. 11(f) -GOES8,visível, 18Z,08/05/2000  
Fonte: Fourmilab (2000)



Fig. 11(g)-GOES8,visível,18Z, 09/05/2000  
Fonte: Fourmilab (2000)

### 4.3 VAPOR DE ÁGUA

Alguns satélites são equipados com sensores de vapor de água que podem mapear a distribuição de umidade na média troposfera (Figura 12), cerca de 5 quilômetros de altura. Essas informações também são úteis para monitorar os movimentos horizontais e verticais dos ventos. Isto é de grande utilidade para os meteorologistas localizarem correntes de jato (ventos fortes em aproximadamente 10 km de altura), ciclones (centro de pressões baixa) e anticiclones (centro de pressões altas).

Por outro lado, os satélites meteorológicos também podem receber informações ambientais (nível de rios, temperatura, precipitação, vento, pressão etc.) a partir de



plataformas de coleta de dados localizadas na superfície terrestre (nível de rios, abalos sísmicos, etc.).Essas informações são automaticamente retransmitidas para estações terrenas de recepção.

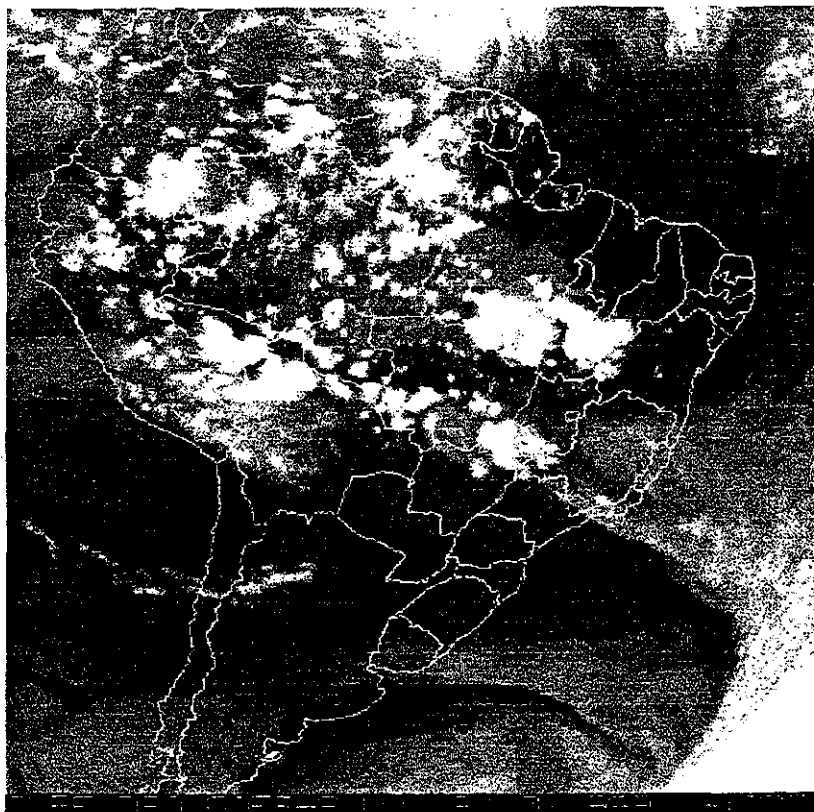


Fig. 12 - Imagem Vapor de água, satélite GOES-8, 18/10/99, 16:00 horas.  
Fonte : INPE (1999)

## **5. APLICAÇÕES DE DADOS (IMAGENS) TRANSMITIDAS POR SATÉLITES**

Aplicações de dados transmitidas por satélites meteorológicos são utilizadas em análises meteorológicas e também em aplicações específicas.

Em análise meteorológica, as imagens de satélites são utilizados para auxiliar o meteorologista em previsão de tempo. Nessa caso, as imagens são úteis para obter onde se localiza um dado sistema de tempo e também para inferir outras informações associadas (tipo e intensidade das nuvens presentes, velocidade do deslocamento das

nuvens, chuva etc.). No que se refere a **aplicações específicas**, as imagens de satélites podem ser utilizadas para monitorar nevoeiros e estimativas de chuva via satélites.

## **5.1 MONITORAMENTO DE NEVOEIROS**

Os nevoeiros formam-se quando o vapor de água que permanece no ar desloca-se próximo da superfície terrestre formando uma nuvem microscópicas gotículas de água líquida. O nevoeiro pode ser considerado como uma grande stratus (nuvem baixa) cuja a altura da base se encontra no chão. Geralmente os nevoeiros estão associado a um tempo bom, mas eles podem reduzir a visibilidade próxima a superfície a distância menores que 1 km, causando sérios problemas para aeroportos e rodovias. Após o nascer do sol, a radiação solar aquece o solo e as suas camadas de ar vizinhas, dissipando gradualmente os nevoeiros. Os nevoeiros são classificado de acordo com a visibilidade associada, em:

Nevoeiro leve: visibilidade de 1km ou mais

Nevoeiro Moderado: visibilidade de 500 a 1000 metros

Nevoeiro Denso: visibilidade de 300 a 500 metros

Nevoeiro Forte: visibilidade inferior a de 300 metros.

Os nevoeiros geralmente formam-se em lugares baixos porque a medida que o ar se resfria, torna-se mais pesado ou denso, deslocando-se encosta abaixo. Um fator fundamental para formação de um nevoeiro é a presença de umidade, mais especificamente ar saturado. Parcelas de ar podem saturar-se pelo resfriamento do ar até atingir a temperatura do ponto de orvalho. Outra possibilidade seria aumentar o conteúdo de umidade próxima da superfície da terrestre. Os principais tipos de nevoeiro são:

**a) Nevoeiro de Radiação:** ocorre em noites claras, calmas e relativamente úmida, como resultado do resfriamento das camadas de ar adjacentes da superfície terrestre., devido a perda de radiação de ondas longa para o espaço e conseqüentemente, saturação do ar saturação do ar inferior e condensação do vapor de água existente no ar. Os nevoeiros

de radiação podem tornar-se fortes perto do solo porém são poucos espessos. Na maioria dos casos, apresentam maior expansão vertical e visibilidade mais reduzida pela manhã. Muitas vezes formam-se em terrenos baixos ou vales (nevoeiros de vales). A ausência de vento possibilita o resfriamento (por contato com o solo) acentuada por uma camada rasa de ar próxima da superfície. Como consequência observa-se uma forte inversão, abaixo da qual pode ocorrer nevoeiro.

**b) Nevoeiro de advecção:** ocorre quando há deslocamento de ar relativamente quente e úmido sobre superfície mais frias. Um ingrediente essencial para a formação desse tipo nevoeiro é a presença de relativamente quente e úmido. Ao pouco a massa de ar se esfriando até chegar a temperatura e ponto de orvalho e o vapor de água presente nessa massa começa a se condensar. Outro fator importante é a mistura turbulenta que estende a camada saturada até grande alturas. Os nevoeiros de advecção são os mais espessos, cobrem maiores áreas e mais persistentes nevoeiros de solo.

**c) Nevoeiro de Evaporação:** ocorre quando massa de ar frio desloca-se sobre superfícies líquidas relativamente quentes. Nesse caso, a umidade proveniente da água por evaporação, se junta ao ar frio, tornando-o saturado e provocando saturação. Pelo seu aspecto, lembra vapor se elevando da água. Também chamado de nevoeiro de vapor. Ocorrem sobre rios, lagos e oceanos.

**d) Nevoeiro de encosta ou de montanha:** ocorre quando o ar é forçado a subir a encosta de uma colina ou de montanha. À medida que esse ar sobe e se expande-se, ocorrem resfriamento até atingir o ponto de orvalho e houver umidade suficiente, ocorre a saturação e a consequente formação de nevoeiro. Os nevoeiros de encosta ou de montanha se dissipam quando o vento predominante muda de direção.

**e) Nevoeiros de vales associado ao resfriamento noturno:** é mais comum no inverno. Como o ar frio é mais pesado que a sua vizinhança, à medida que ocorre o resfriamento noturno ele tende a se concentrar no fundo dos vales, favorecendo a formação de nevoeiros.

f) **Outros:** podem também ocorrer formação de nevoeiros associados a frentes quentes ou chuvas. Neste caso, à medida que a chuva cai relativamente sobre o ar seco, ocorre evaporação das gotículas de água, aumentando assim o conteúdo de umidade local e favorecendo a formação temporária de nevoeiros.

Nevoeiros e stratus (nuvem baixa) podem ser identificados a noite em imagens de satélites infravermelho, através das diferenças de temperatura obtida entre imagens de satélites meteorológicos GOES (canal 4) e (canal 2). Como resultados tem-se valores positivos ou negativos, que são normalizados para fins de visualização em formas de imagens.

Na Figura 13, áreas com nevoeiros ou stratus apresentam valores positivos, os quais foram associados a cor vermelha (área com o valor moderados). As nuvens altas (cirrus) com valores negativos e, as regiões cuja a diferença de temperaturas são nulas ou muito pequenas corresponde a tonalidade cinza. Os nevoeiros apresentam diferenças de temperatura positivas porque a emissividade (poder de emissão de energia que os corpos apresentam) das gotículas de água em 3,9 microm é menor que em 10,7 microm.



Fig. 13 - Imagem de satélite processada apresentando em amarelo as regiões com nevoeiros ou nuvens de stratus.

Fonte : INPE (1999)

## 5.2 ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO

As estimativas de precipitação, a partir de dados transmitidos por satélites meteorológicos é uma excelente alternativa em função da cobertura espacial e temporal dos satélites geostacionário. Embora essas estimativas podem ser feitas utilizando-se diferentes canais espectrais e modelos físicos relativamente complexos, o uso de imagens infravermelho vem sendo feita a anos para esse fim. Neste caso, a forma mais simples e mais útil, é associar a chuva numa certa região com a distribuição da temperatura do topo das nuvens. Isto pode ser feito através de métodos estatísticos simples. Outra possibilidade é utilizar certas características do topo das nuvens (taxa de crescimento, gradiente horizontal de temperatura etc.) obtidas de uma sequência de imagens. Essas características que está associada a um aumento ou diminuição da taxa de precipitação podem ser incorporadas nos modelos que estima chuva. De um modo simples, uma imagem infravermelho as altas taxas de chuvas são observadas onde a temperatura do topo das nuvens é bem baixa (exceto na presença de nuvens cirrus). A Figura 14 apresenta um exemplo de estimativas de chuva, utilizando-se imagens do satélite GOES-8.

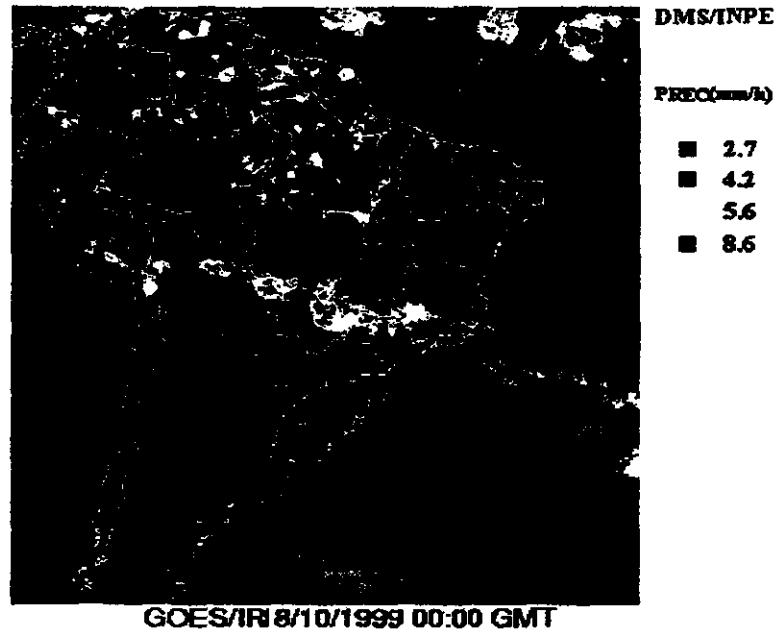


Fig. 14 - Imagem de satélites apresentando em cores falsas a localização de chuva na América do Sul e vizinhanças.

No final da década de 90, fruto de uma parceria entre a National Aeronautics and Space Administration (NASA) e a National Space Development Agency (NASDA), foi colocado em órbita a Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Neste caso, a grande inovação tecnológica desse satélite de órbita equatorial é a presença de um Radar para medir chuva na região tropical. O monitoramento dessa variável é essencial para inúmeras aplicações, tais como: estudos climáticos e hidrológicos, validação de modelos de previsão numérica de tempo, quantificação de fontes de energia nos trópicos, etc. As Figura 15 e 16 mostram respectivamente um exemplo da distribuição horizontal/vertical dessa variável sobre Roraima. Importante destacar que até recentemente não era possível monitorar chuva nos oceanos e regiões de difícil acesso como é o caso da Amazônia

WETAMC & TRMM/LBA 11/01/1999 19:33 UTC

PR: Intensidade da Chuva a 2 km de altura

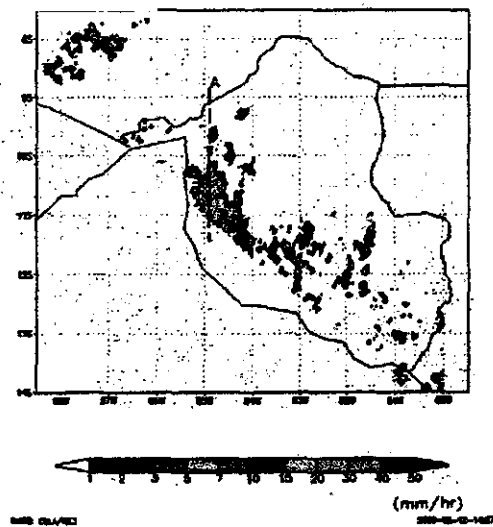


Fig. 15 - Distribuição horizontal da chuva sobre Roraima; dados obtidos pelo Radar PR a bordo do TRMM.

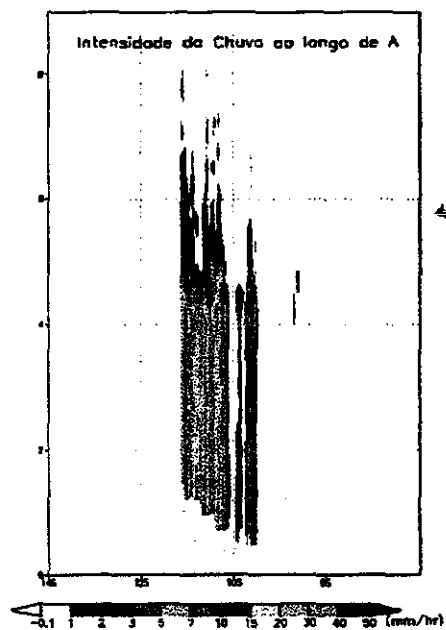


Fig. 16 - Distribuição Vertical da chuva ao longo da linha A (figura anterior); dados obtidos pelo Radar PR a bordo do TRMM

### 5.3 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Com o advento do sensoriamento remoto orbital, tornou-se possível o monitoramento da evolução espacial e temporal das mudanças na cobertura da superfície terrestre. A vegetação tem uma assinatura espectral específica quando comparada com a grande maioria dos alvos terrestres, assim, vários estudos relacionados à identificação e mapeamento da vegetação têm se baseado na premissa de contraste espectral entre a reflectância da vegetação e os elementos de fundo da cena (Rouse et al., 1974). A combinação entre a reflectância da vegetação nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, tem sido denominada índice de vegetação. Um dos índices de vegetação mais conhecidos é o índice de vegetação por diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) no qual a diferença entre a reflectância no canal do infravermelho próximo e no do vermelho é dividida pela sua soma (Sellers, 1989).

Na América do Sul, Liu et al. (1991), mostraram que as áreas de vegetação com estresse, indicadas pelo NDVI, correspondiam em sua maioria a áreas que sofreram impactos de seca provocadas pelo El Niño. Batista et al. (1997), utilizando dados de NDVI da Amazônia, do período de 1981 a 1991, determinaram os tipos de vegetação dominantes e ainda identificaram variações interanuais associadas a mudanças nas condições ambientais. Barbosa (1998), utilizando médias mensais de precipitação e NDVI, constatou que as distribuições espacial e temporal dessas variáveis na região do Nordeste do Brasil, têm padrões semelhantes e uma relação considerável. No caso da vegetação, há um interesse natural em seu monitoramento, uma vez que ela é uma fonte vital para sustentação da vida humana e animal em nosso planeta.

A Figura 17, obtida de Gurgel (2000) mostra a distribuição espacial média de NDVI sobre o Brasil. A escala de cores varia do vermelho ao preto. O vermelho representa as regiões com os maiores valores de NDVI e corresponde aos locais com vegetação mais densa e verde durante todo o ano. O preto representa: regiões onde a vegetação fica apenas alguns meses verde durante o ano; regiões com pouca ou nenhuma vegetação;



regiões de vegetação natural degradada pela ação do homem; ou ainda, regiões com água.

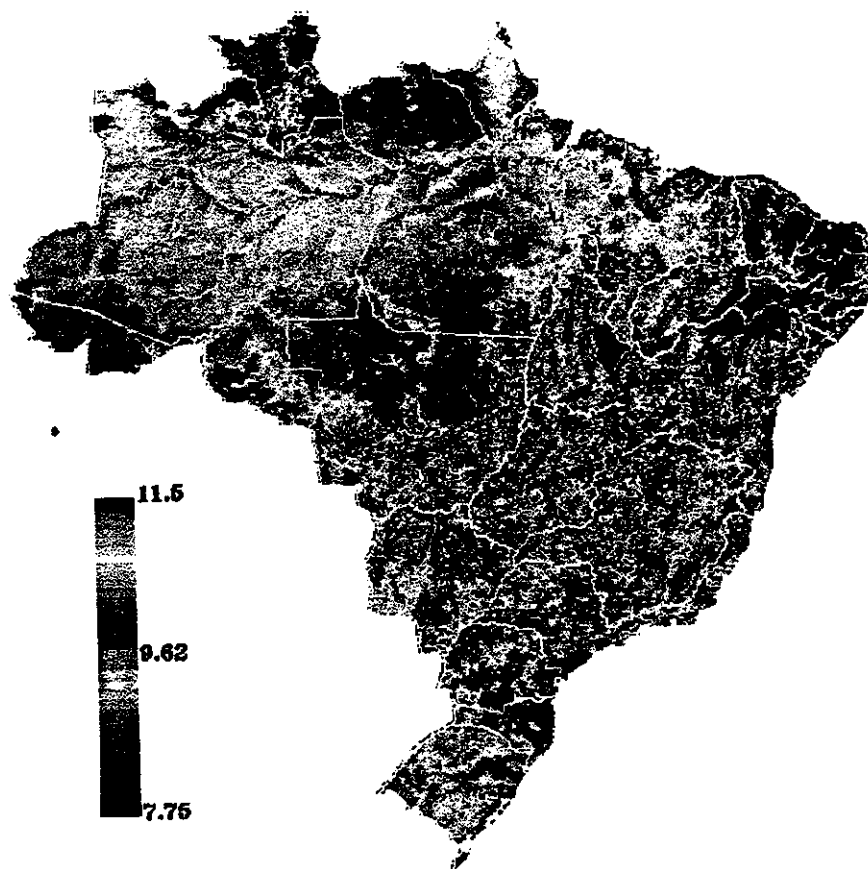


Fig. 17- Imagem média de NDVI.  
Fonte : Gurgel (2000)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O advento dos satélites meteorológicas possibilitou um avanço significativo no monitoramento e compreensão das condições climáticas em nosso Planeta. O monitoramento da cobertura de nuvens com alta resolução temporal é extremamente útil para a previsão de tempo, principalmente em situações em que ocorrem furacões, tempestades e geadas. Como consequência do avanço tecnológico, nas últimas décadas os dados transmitidos por esses satélites também passaram a ser utilizados para o monitoramento da temperatura da superfície dos oceanos, de queimadas, da cobertura vegetal, de ventos troposféricos, ozônio e uma gama de outras aplicações. É através das imagens de satélites que se detecta os primeiros indícios do nascimento do fenômeno El Niño. Os satélites meteorológicos são exemplos de sucesso de como ciência e tecnologia podem ser utilizadas para benefício de nossa sociedade.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ellrod, E., 1994: Detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. **NOAA Technical Report NESDIS 75**.
- Barbosa, H. A. **Análise espaço temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região nordeste do Brasil em 1982-85**. São José dos Campos. 164 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Batista, G. T.; Shimabukuro, Y. E.; Lawrence, W. T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 15, p. 3195-3210, Oct. 1997.
- Eyre, J.R.; Brownscombe, J.L.; Allan, R.J., 1984: Detection of fog at night using advanced very high resolution radiometer (AVHRR) imagery. **Meteorological Magazine**, 113, 266-271.

Fortune, M. A., e Ferreira, N. J., 1980: Introdução à interpretação de imagens de satélites. **INPE-1681-RPE/113**.

Gurgel, H. C., 2000: Variabilidade espacial e temporal do NDVI sobre o Brasil e suas conexões climáticas. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, **INPE**, São José' dos Campos, SP.

<http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/Earth>

**INPE – Divisão de Satélites Ambientais**

Krishna Rao, P.; Holmes, S. J., Anderson, R. K.; Winston, J. S., and Lehr, P. E., 1990: Weather satellites: systems, data, and environmental applications. **American Meteorological Society**, Boston, 503 pp.

Liu, W. T.; Massambani, O.; Festa, M. Normalized difference vegetation index for the south American continent used as a climatic variability indicator. In: **International Symposium of Remote Sensing of Environment**, 24, Rio de Janeiro, 1991. v.2 p. 725-732. **Proceedings**.

Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Beering, D. W.; Schell, J. A. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Austin: **Texas A. M. University, College Station**, 1974.

Sellers, P. J. Vegetation-Canopy spectral reflectance and biophysical processes. In: Asrar, G. ed. **Theory and application of Optical Remote Sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989. Cap. 8, p. 297-335.

**Universidade de Wisconsin – Madison – UWM, Space Science and Engineering Center**

## **CAPÍTULO 4**

# **TEMPESTADES E RELÂMPAGOS**

**Marcelo M. F. Saba\***

**Osmar Pinto Jr.**

**Iara R. C. A. Pinto**

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

\* e.mail : [saba@dge.inpe.br](mailto:saba@dge.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>1. UM POUCO DE HISTÓRIA .....</b>	<b>4-5</b>
<b>2. TEMPESTADES .....</b>	<b>4-5</b>
<b>3. RELÂMPAGOS .....</b>	<b>4-6</b>
<b>4. PROTEÇÃO .....</b>	<b>4-10</b>
<b>5. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>4-12</b>

## **1. UM POUCO DE HISTÓRIA**

Foi somente após a descoberta da eletricidade no início do século 18, que a natureza elétrica da atmosfera da Terra começou a ser desvendada. Em 1708, William Wall, ao ver uma faísca sair de um pedaço de âmbar carregado eletricamente, observou que ela era parecida com um relâmpago. Na metade do século, após a descoberta das primeiras propriedades elétricas da matéria, tornou-se evidente que os relâmpagos deveriam ser uma forma de eletricidade, associada de alguma maneira com as tempestades.

Benjamin Franklin foi o primeiro a projetar um experimento para tentar provar a natureza elétrica do relâmpago. Em julho de 1750, Franklin propôs que a eletricidade poderia ser drenada de uma nuvem por um mastro metálico. Se o mastro fosse isolado do solo, e um observador se aproximasse do mesmo, um fio aterrado, uma faísca saltaria do mastro para o fio quando uma nuvem eletrificada estivesse perto. Se isto ocorresse, estaria provado que as nuvens são eletricamente carregadas e, conseqüentemente, que os relâmpagos também são um fenômeno elétrico. Em maio de 1752, Thomas-François D'Alibard demonstrou que a sugestão de Franklin estava certa e que os relâmpagos, portanto, eram um fenômeno elétrico.

Em junho de 1752, Franklin realizou outro experimento com o mesmo propósito, desta vez utilizando uma pipa. Ao invés de utilizar um mastro metálico, ele optou por uma pipa, uma vez que ela poderia alcançar maiores altitudes e poderia ser usada em qualquer lugar. Novamente, faíscas saltaram de uma chave colocada na extremidade do fio preso à pipa em direção à sua mão.

## **2. TEMPESTADES**

Tempestades são caracterizadas por relâmpagos e trovões. Elas são produzidas por uma ou mais nuvens cumulonimbus (Cb), também conhecidas como nuvens de tempestade. Uma típica nuvem de tempestade tem um diâmetro de 10-20km, alcança altitudes de 10-20km, dura em média 30-90 minutos e move-se com uma velocidade de 40-50km/h.

Normalmente elas podem ser identificadas por seu largo e brilhante topo esbranquiçado, que projeta-se na direção dos ventos formando uma saliência denominada bigorna. Cerca de 2000 tempestades estão sempre ocorrendo, o que significa que 16 milhões ocorrem anualmente em nosso planeta.

A frequência de tempestades em um dado local depende de vários fatores, entre eles a topografia, a latitude, a proximidade de massas de água e a continentalidade. Uma pequena percentagem das tempestades que ocorrem todo ano são consideradas tempestades severas, isto é, produzem ao menos uma das seguintes características: granizo com diâmetro igual ou maior que 2cm, ventos de ao menos 90km/h ou tornados. Um tornado é uma coluna de ar girando violentamente que se estende da base da nuvem até o solo. Tempestades severas também costumam produzir ventos de alta intensidade conhecidos como rajadas.

Não se conhece exatamente como as nuvens de tempestade tornam-se eletricamente carregadas. A teoria mais aceita para explicar a produção de cargas requerida para eletrificar uma nuvem de tempestade assume que as partículas carregadas são produzidas por colisões de diferentes partículas de gelo no interior da nuvem.

### **3. RELÂMPAGOS**

Um relâmpago é uma corrente elétrica muito intensa que ocorre na atmosfera com típica duração de meio segundo e típica trajetória com comprimento de 5-10km. Ele é consequência do rápido movimento de elétrons de um lugar para outro. Os elétrons movem-se tão rápido que eles fazem o ar ao seu redor iluminar-se, resultando em um clarão, e aquecer-se, resultando em um som (trovão).

O trovão pode ser usado para calcular qual a distância de um relâmpago. Quando você enxergar o clarão, comece a contar os segundos até escutar o trovão. Divida o número de segundos por três (3) e você terá a distância aproximada do relâmpago em quilômetros. O erro médio associado com este método é de 20 %. Em parte, a origem

deste erro é devida ao fato de que a maioria dos relâmpagos tem longas ramificações. Assim, um relâmpago a três quilômetros de distância pode produzir um trovão após três segundos, indicando que uma ramificação está somente a um quilômetro de distância. Se você enxergar o clarão e não escutar o trovão, o relâmpago provavelmente está a mais de 20 quilômetros de você.

Um relâmpago é tipicamente associado com nuvens cumulonimbus ou de tempestade, embora possa ocorrer uma associação com explosões nucleares, vulcões ativos, tempestades de neve ou, mesmo, tempestades de poeira.

Dentro das tempestades, diferentes partículas de gelo tornam-se carregadas através de colisões. Acredita-se que as partículas pequenas tendem a adquirir carga positiva, enquanto que as maiores adquirem predominantemente cargas negativas. Estas partículas tendem então a se separar sobre a influência de correntes de ar ascendentes e descendentes e da gravidade, de tal modo que a parte superior da nuvem adquira uma carga líquida positiva e a parte inferior uma carga líquida negativa. A separação de carga produz então um enorme campo elétrico tanto dentro da nuvem como entre a nuvem e o solo. Quando este campo eventualmente quebra a resistência elétrica do ar, um relâmpago tem início. Em termos gerais, existem dois tipos de relâmpagos: relâmpagos na nuvem e relâmpagos no solo.

Relâmpagos na nuvem originam-se dentro das nuvens cumulonimbus, normalmente na região onde gotículas de água transformam-se em gelo, e propagam-se dentro da nuvem (relâmpagos intranuvem) ou fora da nuvem, rumo a outra nuvem (relâmpagos nuvem-nuvem) ou numa direção qualquer no ar (descargas para o ar). Relâmpagos no solo, por sua vez, podem originar-se na mesma ou em outras regiões dentro da nuvem cumulonimbus (relâmpagos nuvem-solo) ou no solo, abaixo ou perto da tempestade (relâmpagos solo-nuvem). Mais de 99 % dos relâmpagos no solo são relâmpagos nuvem-solo. Relâmpagos solo-nuvem são relativamente raros e geralmente ocorrem do topo de montanhas ou estruturas altas, ou ainda podem ser disparados de foguetes lançados em direção as tempestades. Relâmpagos no solo podem também ser



classificados em termos do sinal da carga do líder, negativa ou positiva, que inicia a descarga.

Cerca de 90 % dos relâmpagos nuvem-solo que ocorrem em nosso planeta são negativos. Cerca de 70 % do total de relâmpagos são relâmpagos na nuvem. Esta percentagem, entretanto, pode mudar substancialmente em determinadas tempestades. Embora eles sejam a maioria dos relâmpagos, eles são menos conhecidos do que os relâmpagos no solo, em parte porque eles são menos perigosos, em parte porque eles são escondidos pela nuvem.

Uma forma rara de relâmpagos, não incluída nas categorias acima, são os relâmpagos de bola. Um relâmpago de bola é o nome dado a uma esfera luminosa que geralmente ocorre perto das tempestades, mas não necessariamente simultaneamente a um relâmpago normal. Elas são geralmente vermelhas, amarelas, azuis, laranjas ou brancas, tem um diâmetro de 10 a 40 centímetros, aparecem próximo ao solo ou na atmosfera, e mantêm um brilho relativamente constante durante sua vida. Elas podem mover-se rápida ou lentamente, ou ficar paradas, podem ser silenciosas ou produzir estalos, duram de segundos a minutos (média de 4 segundos), e desaparecem lenta ou subitamente em silêncio ou produzindo um ruído.

Embora elas tenham sido observadas por mais de um século, não são bem conhecidas e permanecem um mistério.

Um relâmpago pode ser constituído por uma ou várias descargas, chamadas descargas de retorno. No primeiro caso, ele é chamado de relâmpago simples e, no segundo, de relâmpago múltiplo.

Acredita-se que os relâmpagos têm largo efeito sobre o meio ambiente: provocam incêndios, com isto participando na composição de equilíbrio das árvores e plantas; modificam as características da atmosfera ao redor das regiões onde ocorrem; quebram as moléculas do ar, as quais ao se recombinarem produzem novos elementos. Estes

novos elementos mudam o equilíbrio químico da atmosfera, afetando a concentração de importantes elementos com o ozônio, bem como misturam-se com a chuva e precipitam-se como fertilizantes naturais.

Relâmpagos exercem um papel em manter o campo elétrico de tempo bom na atmosfera, o qual é uma consequência da carga negativa líquida existente na Terra e da carga positiva líquida na atmosfera. Relâmpagos produzem fenômenos transientes na atmosfera superior, conhecidos como *sprites*, jatos azuis e *elves*. Estes fenômenos são fracas luzes quase invisíveis ao olho humano, que ocorrem na mesosfera, troposfera, e na baixa ionosfera, respectivamente. Observações de *sprites* e jatos azuis tem sido feitas com câmaras de alta sensibilidade e mais recentemente telescópios no alto de montanhas, apontadas na direção de tempestades centenas de quilômetros distantes.

Durante as duas últimas décadas, relâmpagos nuvem-solo têm sido detectados e mapeados em tempo real em largas regiões por vários sistemas de detecção. Alguns países, como os Estados Unidos, o Japão e o Canadá, estão inteiramente cobertos por tais sistemas. Sobre os Estados Unidos, uma média de 20-30 milhões de relâmpagos nuvem-solo têm sido detectados todo ano, desde 1989, ano em que tais sistemas começaram a cobrir integralmente todo o país. Outros países como o Brasil, estão parcialmente cobertos.

Estimativas aproximadas indicam que cerca de 100 milhões de relâmpagos nuvem-solo ocorrem no Brasil todo ano. Relâmpagos tem sido gerados por pequenos foguetes conectados a longos fios de cobre lançados na direção das tempestades. Quando o foguete é lançado, o fio preso a ele é desenrolado criando um caminho condutor por onde o relâmpago após iniciado se propaga. Esta técnica tem permitido a medida de campos elétricos e magnéticos bem próximos ao canal do relâmpago. Relâmpagos tem também sido detectados do espaço durante as duas últimas décadas através de sensores óticos a bordo de satélites e naves espaciais. Os satélites não conseguem distinguir entre relâmpagos no solo e nas nuvens. Eles tem mostrado que cerca de 50-100 relâmpagos

ocorrem a cada segundo em nosso planeta, a maior parte na região tropical (cerca de 70 %).

Finalmente, naves espaciais têm mostrado que a Terra não é o único planeta onde relâmpagos ocorrem. Relâmpagos tem também sido detectados em Vênus, Júpiter e Saturno e, provavelmente, ocorrem em Uranus e Netuno.

#### **4. PROTEÇÃO**

Os relâmpagos podem ser perigosos. Quando estão caindo próximo, você está sujeito a ser atingido diretamente por eles. A chance de uma pessoa ser atingida por um relâmpago é algo em torno de 1 para 1 milhão. Entretanto, a maioria das mortes e ferimentos não são devido a incidência direta e sim a efeitos indiretos associados a incidências próximas ou efeitos secundários dos relâmpagos.

A corrente do relâmpago pode causar sérias queimaduras e outros danos ao coração, pulmões, sistema nervoso central e outras partes do corpo, através de aquecimento e uma variedade de reações eletroquímicas. A extensão dos danos depende da intensidade da corrente, as partes do corpo afetadas, as condições físicas da vítima, e as condições específicas do incidente. Cerca de 20 a 30% das vítimas de relâmpagos morrem, a maioria delas por parada cardíaca e respiratória, e cerca de 70% dos sobreviventes sofrem por um longo tempo de sérias seqüelas psicológicas e orgânicas. As seqüelas mais comuns são diminuição ou perda de memória, diminuição da capacidade de concentração e distúrbios do sono. No Brasil é estimado que cerca de 100 pessoas morrem por ano atingidas por relâmpagos.

De modo a evitar os acidentes descritos acima, as regras de proteção pessoal listadas abaixo devem ser seguidas.

▸ **Se possível, não saia para a rua ou não permaneça na rua durante tempestades, a não ser que seja absolutamente necessário. Nestes casos, procure abrigo nos seguintes lugares:**

- carros não conversíveis, ônibus ou outros veículos metálicos não conversíveis;
- em moradias ou prédios que possuem proteção contra relâmpagos;
- em abrigos subterrâneos, tais como metrô ou túneis;
- em grandes construções com estruturas metálicas;
- em barcos ou navios metálicos fechados;
- em desfiladeiros ou vales.

▸ **Se estiver dentro de casa, evite:**

- usar telefone, a não ser que seja sem fio;
- ficar próximo de tomadas e canos, janelas e portas metálicas;
- tocar em qualquer equipamento elétrico ligado a rede elétrica.

▸ **Se estiver na rua, evite:**

- segurar objetos metálicos longos, tais como varas de pesca, tripés e tacos de golfe;
- empinar pipas e aeromodelos com fio;
- andar à cavalo;
- nadar;
- ficar em grupos.

▸ **Se possível, evite os seguintes lugares que possam oferecer pouca ou nenhuma proteção contra relâmpagos:**

- pequenas construções não protegidas, tais como celeiros, tendas ou barracos;
- veículos sem capota, tais como tratores, motocicletas ou bicicletas;
- estacionar próximo a árvores ou linhas de energia elétrica.

▸ Se possível, evite também certos locais que são extremamente perigosos durante uma tempestade, tais como:

- topos de morros ou cordilheiras;
- topos de prédios;
- áreas abertas, campos de futebol ou golfe;
- estacionamentos abertos e quadras de tênis;
- proximidade de cercas de arame, varais metálicos, linhas aéreas e trilhos;
- proximidade de árvores isoladas;
- estruturas altas, tais como torres, linhas telefônicas e linhas de energia elétrica.

Se você estiver em um local sem um abrigo próximo e sentir seus pêlos arrepiados ou sua pele coçar, indicando que um relâmpago está prestes a cair, ajoelhe-se e curve-se para a frente, colocando suas mãos nos joelhos e sua cabeça entre eles. Não deite-se no chão.

## **5. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR**

<http://www.lightning.dge.inpe.br/>

Pinto Jr., O. & Pinto, I. R. C. A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 1996. p. 108

## **CAPÍTULO 5**

# **PREVISÃO DO TEMPO**

**Sérgio Henrique Soares Ferreira\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE**

---

\* e.mail: [henrique@cptec.inpe.br](mailto:henrique@cptec.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>5-5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>5-7</b>
<b>2. UM BREVE HISTÓRICO DA METEOROLOGIA.....</b>	<b>5-8</b>
<b>3. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE.....</b>	<b>5-10</b>
<b>4. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE ALTITUDE.....</b>	<b>5-11</b>
<b>5. SATÉLITES METEOROLÓGICOS .....</b>	<b>5-11</b>
<b>6. PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS (PCD) .....</b>	<b>5-12</b>
<b>7. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS E PREVISÃO DO TEMPO .....</b>	<b>5-13</b>
<b>8. CONCLUSÃO.....</b>	<b>5-16</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>5-16</b>

## LISTA DE FIGURAS

- 1 - IMAGEM I.R. GOES8 01/05/00 12GMT ..... 5-12**
- 2 - IMAGEM VIS. GOES8 01/05/00 12GMT ..... 5-12**
- 3 - ANÁLISE MODELO GLOBAL - PRESSÃO (hPa)/ CPTEC  
01/05/00 00:00 GMT ..... 5-13**
- 4 - ANÁLISE MODELO GLOBAL - VENTOS (m/s)/ CPTEC -01/05/00  
..... 5-14**
- 5 - PREVISÃO MODELO GLOBAL - PRECIPITAÇÃO (mm)/CPTEC  
03/05/00 00:00GMT..... 5-15**



## 1. INTRODUÇÃO

Através dos tempos, a compreensão dos fenômenos atmosféricos tem ganhado relevada importância, devido aos prejuízos materiais e de vidas humanas, que o desconhecimento destes fenômenos podem ocasionar. Partindo do pressuposto que tais prejuízos podem ser minimizados, ou até mesmo evitados, grandes recursos têm sido aplicados à meteorologia em todos os países do mundo, tanto para o desenvolvimento da previsão do tempo, quanto para a climatologia. Tais recursos não restringem-se apenas aos centros de pesquisa e previsão do tempo, mas abrangem uma fabulosa rede internacional de informações e coleta de dados, mantida pelos países que integram a OMM (Organização Meteorológica Mundial).

Para compreender melhor como funciona esta rede de informações, para fins de previsão de tempo, é necessário compreender primeiramente a diferença entre tempo e clima. Embora estes dois conhecimentos estejam intimamente relacionados é importante observar que a previsão do tempo corresponde uma previsão diária do estado da atmosfera, enquanto a caracterização do clima constitui uma generalização ou integração das condições do tempo, para um certo período e uma determinada área. Em termos práticos, tanto para a previsão do tempo quanto para a previsão do clima é necessário um grande volume de dados. Estes provêm de estações meteorológicas distribuídas pelo mundo, das imagens de satélites e de radar, através de informações reportadas por aeronaves, navios e bóias oceânicas. No entanto, para o caso da previsão do tempo, todas estas informações devem chegar aos centros de previsão, o mais rápido possível, para que possam ser analisadas em tempo hábil.

Os resultados da previsão do tempo são divulgados nas mais variadas formas, popularizando uma cultura básica em meteorologia, que nem sempre é compreendida plenamente pelo público em geral, mas que passa a integrar-se cada vez mais a cultura geral do cidadão.

Iniciando por um breve histórico do desenvolvimento da meteorologia, abordaremos de forma sucinta o processo da previsão do tempo, desde a coleta das informações nos diversos tipos de estações até a elaboração dos boletins de previsão do tempo, sem no entanto, deixar de mostrar assuntos relacionados, que fazem parte da cultura geral e das disciplinas escolares. Portanto, enfocando os pontos de conexão entre as disciplinas escolares do ensino fundamental e os conceitos básicos de meteorologia e previsão de tempo.

## **2. UM BREVE HISTÓRICO DA METEOROLOGIA**

O estudo da atmosfera iniciou-se em tempos remotos. No Ocidente, os primeiros registros foram feitos por Aristóteles (século IV a.C.), mas foi somente no século XVII que começaram os primeiros passos significativos para início da meteorologia como ciência. Um fato importante foi a invenção do Barômetro por Torricelli em 1644. A partir da invenção deste instrumento começou a se desenvolver o conceito de pressão atmosférica, sua relação com as condições do tempo e a fundamentação das leis físicas nos séculos seguintes.

O barômetro de Torricelli constituía-se de um tubo de vidro fechado em uma das extremidades. Este tubo preenchido com mercúrio é emborcado em uma cuba contendo o mesmo líquido metálico. Desta forma, verificava-se na época que o peso da coluna de mercúrio era equilibrado pela pressão do ar, permanecendo aproximadamente à 760 mm de altura, isto é, indicando a pressão de 760 mmHg, o que equivale aproximadamente à 1013 hPa (hecto - Pascal) ou  $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , que também corresponde à pressão normal atmosférica ao nível médio do mar. Esta pressão varia com a altitude do lugar e também com as condições do tempo. O aumento dos valores de pressão está relacionado ao movimento descendente do ar, inibindo a formação de nuvens. Ao contrário, a diminuição da pressão, está relacionada ao movimento ascendente do ar, permitindo a condensação do vapor d'água e a formação de nuvens. Tais relações foram depois esclarecidas, através do estudo da dinâmica da atmosfera.

Além do barômetro, outros importantes instrumentos meteorológicos foram inventados na mesma época, tais como os anemômetros, termômetros, pluviômetros, etc.

O segundo passo significativo da meteorologia, rumo a viabilização da previsão do tempo, foi dado após a criação do telégrafo elétrico, por Samuel Morse em 1843. Era preciso reunir, de forma praticamente instantânea, as informações obtidas pelas diversas estações meteorológicas. Desta forma, em 1850 em Washington, foram mostradas ao público os primeiros mapas meteorológicos (Cartas Sinópticas de previsão do tempo), com informações recebidas através do telégrafo.

Outro grande passo importante foi dado em agosto de 1853, com a Primeira Conferência Meteorológica Internacional, celebrada em Bruchelas. O grande foco desta discorreu sobre a necessidade de padronização da forma de coleta e transmissão de informações meteorológicas, e da necessidade de cooperação internacional para disseminação destas informações, que começou a se concretizar de fato, após 1873, com a realização do Primeiro Congresso Internacional em Viena. Este foi um acontecimento sem precedentes na história da cooperação internacional em meteorologia, abrindo as portas para criação da OMM - WMO ( Organização Meteorológica Mundial - World Meteorological Organization)

No entanto, apesar de todo este aparato, não se conseguia fazer previsões do tempo confiáveis com mais de 1 dia de antecedência. Era possível avaliar através das cartas sinóticas as condições do tempo, conhecia-se como as massas de ar se comportavam em média, mas a previsão do estado futuro da atmosfera dependia principalmente da experiência do meteorologista, pois os cálculos numéricos necessários para a previsão são extremamente complexos. Tal problema tem sido resolvido recentemente com o desenvolvimento dos supercomputadores, que têm permitido a utilização de modelos numéricos de previsão do tempo, cada vez mais precisos e que integram toda a gama de dados meteorológicos.

O INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, através do CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos em Cachoeira Paulista - SP foi pioneiro no Brasil no uso de supercomputadores para a previsão do tempo, quando em 1994 inaugurou o seu primeiro supercomputador NEC - SX3. Desde então, o CPTEC tem produzido previsões confiáveis com até 6 dias, através do Modelo Global e até 3 dias com o Modelo Regional. Estas informações são disponibilizadas diariamente através da Internet desde 1996 (<http://www.cptec.inpe.br>).

### **3. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE SUPERFÍCIE**

São locais destinados a realização das observações meteorológicas, para a obtenção de dados, que caracterizam o estado presente da atmosfera. Estas estações, conforme a finalidade a que se destinam, podem ser agrupadas em diversas categorias. Dentre estas categorias, estão as chamadas estações sinóticas, que realizam as observações meteorológicas em horários padronizados internacionalmente. Os horários principais correspondem à 00, 06, 12, 18 (GMT) - "Greenwich Meridian Time". Após a realização das observações, o observador meteorológico, responsável pela estação, prepara os dados para serem enviados, em forma de boletins codificados, conforme norma da OMM.

Basicamente, uma estação meteorológica dispõe de um conjunto de instrumentos para avaliação das condições do tempo presente. O principal é o barômetro, destinado a medida da pressão atmosférica e a obtenção da pressão reduzida ao nível médio do mar. Além, deste instrumento, a estação possui um ajardinado, lugar onde normalmente é instalado um anemômetro, para a medida da direção e velocidade do vento; um pluviômetro ou pluviógrafo, para a medida de precipitação e um abrigo ventilado, onde encontra-se os instrumentos destinados a medida da temperatura do ar e da umidade relativa.

Além das medidas destes instrumentos, o observador meteorológico, relata as condições gerais do tempo, tais como, nebulosidade, visibilidade, etc.

#### **4. ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE ALTITUDE**

As estações meteorológicas de altitude destinam-se a determinação da estrutura vertical da atmosfera. Nestas, são normalmente empregadas as radiossondas, que consistem basicamente em um dispositivo eletrônico dotado de um transmissor de rádio e dos sensores de temperatura, umidade e pressão. Estes dispositivos são lançados através de balões, que podem atingir altitudes de até 40 quilômetros. Durante seu vôo, as informações obtidas pelo equipamento são transmitidas continuamente para um receptor na estação em terra. Como o balão viaja à deriva, a direção e velocidade dos ventos são calculadas por intermédio do sinal de localização, emitido pela própria radiossonda. Tais informações são codificadas e transmitidas para os centros de previsão do tempo, em horários padrões, conforme estabelecido pela OMM. No entanto, devido ao alto custo das radiossondagens, estas são realizadas apenas duas vezes ao dia nos horários de 00 e 12 GMT.

#### **5. SATÉLITES METEOROLÓGICOS**

Existe basicamente, dois tipos de satélites meteorológicos, os de órbitas geostacionárias e os de órbita polar. Ambos permitem obter diversos tipos de imagens e resultados numéricos, calculados através do processamento digital dessas imagens.

Como exemplo, a Figura 1 é um dos principais tipos de imagens obtidos por satélite para Previsão do tempo. Trata-se de uma imagem gerada pelo satélite geostacionário GOES - 8 no canal 4 ( Imagem Infravermelha). Nesta imagem, verifica-se as nuances de radiação térmica emitidas pela atmosfera e pela superfície da Terra. As regiões mais claras da imagem equivalem as regiões mais frias e normalmente estão associadas ao topo das nuvens mais altas. As partes mais escuras estão associadas as nuvens médias e baixas, ou ao solo descoberto.

A Figura 2, obtida pelo mesmo satélite da Figura 1 praticamente ao mesmo tempo corresponde ao canal 1 (Imagem Visível). A grosso modo, podemos dizer que está é

uma fotografia preto e branco da Terra onde podemos observar claramente as nuvens e as nuances de luz produzidas pelo Sol.

Neste caso, ambas as imagens evidenciam a passagem de uma frente fria sobre o Uruguai. Ao norte da América do Sul, uma faixa de nuvens aglomeradas marcam a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).



**Fig. 1 - Imagem I.R. GOES8  
01/05/00 12:00 GMT.**



**Fig. 2 - Imagem VIS. GOES8  
01/05/00 12:00 GMT**

## **6. PLATAFORMA DE COLETA DE DADOS (PCD)**

São estações meteorológicas, capazes de automaticamente obter quase todas as informações obtidas por uma estação meteorológicas de superfície convencionais.

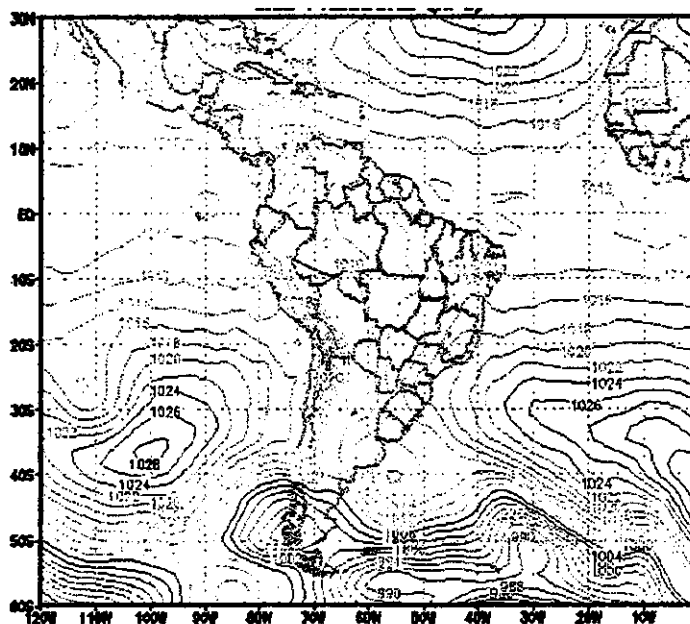
Dotada de painel solar, dispensa o uso de energia elétrica. Suas informações são transmitidas pelos satélites de coleta de dados (No Brasil, pelo SCD2 do INPE). Sua

utilização, estende-se nas áreas onde há poucas estações convencionais, ou em áreas de difícil acesso como, por exemplo, a Amazônia.

## 7. ANÁLISE DOS DADOS METEOROLÓGICOS E PREVISÃO DO TEMPO

As estações de Superfície, as imagens de satélites, as radiossondagens, junto com informações obtidas por navios, aviões e bóias integram a massa de dados para as previsões do tempo. Tais informações são analisadas através de cartas sinóticas, que caracterizam as condições de tempo presente. Desta forma, a previsão do tempo passa a ser uma extrapolação destas condições para tempo futuro.

Com a utilização de supercomputadores, o CPTEC tem realizado as análises e previsões através de modelos numéricos. A Figura 3 ilustra um recorte da análise dos campos de pressão do Modelo Global do CPTEC para as 00:00 horas GMT do dia 30/04/2000, isto é, apenas 12 horas antes das imagens de satélite das Figuras 1 e 2.



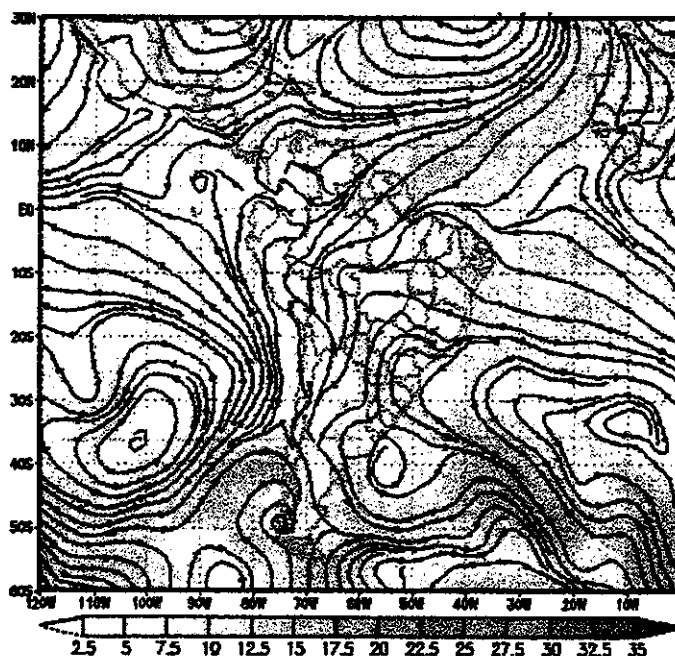
**Fig. 3 - ANÁLISE MODELO GLOBAL - PRESSÃO (hPa)  
/ CPTEC 30/04/00 00:00 GMT**

Através desta análise vemos dois grandes centros de alta pressão. Um sobre o Atlântico (1034 hPa 42S/04W), outro sobre o Pacífico (1028 hPa 35S/100W). Estes centros de

pressão caracterizam grandes massa de ar. Um outro centro de alta pressão encontra-se no litoral norte da Argentina (1016 hPa 40S/55W). Trata-se de uma massa de ar fria, em comparação com a Alta do Atlântico. A região de confronto entre as duas massas de ar é denominada região de frente, que neste caso, por caracterizar o avanço de massa de ar frio, sob a massa de ar quente, corresponde à uma frente fria. Embora, toda a região de frente se caracterize por baixas pressões, nuvens e chuva, podemos destacar um centro de baixas pressões com núcleo de maior intensidade em 67S/30W (960 hPa).

Uma característica interessante dos centros de alta pressão é a circulação dos ventos em torno destes centros. No Hemisfério Sul, ocorre no sentido anti-horário e no Hemisfério Norte, no sentido horário. Tal movimento é chamado de circulação anti-ciclônica, que em partes é decorrente do movimento de rotação da Terra.

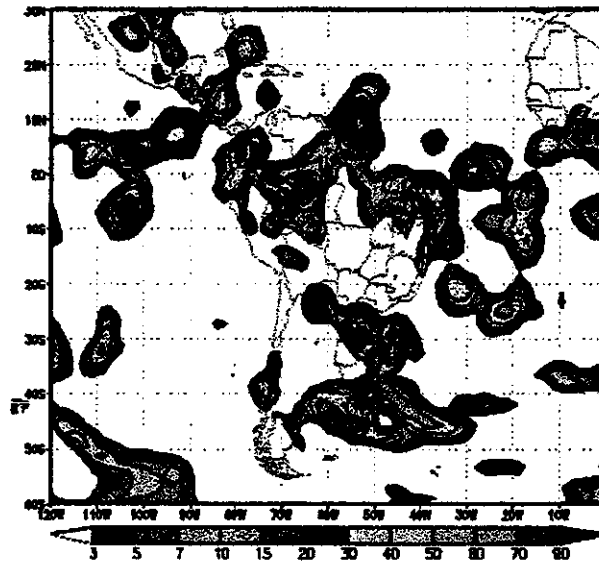
Nos centros de baixa pressão o movimento é invertido, isto é, horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte é chamado de circulação ciclônica. É o exemplo do centro de baixas pressões associado ao sistema frontal, cuja a circulação ciclônica dos ventos é mostrada na Figura 4.



**Fig. 4 - ANÁLISE MODELO GLOBAL- VENTOS (m/s) 01/05/00 00:00 GMT**



Da mesma forma que são apresentadas as análises das condições do tempo, são apresentados os resultados dos modelos numéricos de previsão do tempo, no entanto, além de caracterizar as condições de tempo futuro dos campos medidos (pressão, temperatura, vento, etc.) também apresenta campos derivados. Um dos mais importantes resultados do modelos de circulação geral é o campo de chuvas (Figura 5)



**Fig. 5 - PREVISÃO MODELO GLOBAL - PRECIPITAÇÃO (mm) / CPTEC  
03/05/00 00:00GMT**

Esta Figura corresponde a previsão de chuva acumulada em 24 horas para o dia 03/05/2000, isto é, a quantidade de chuva em mm, que deve cair entre às 00 GMT do dia 02/05/2000 à 00GMT do dia 03/05/2000. Em especial, podemos verificar grande quantidade de chuva prevista para o Rio Grande do Sul, decorrente da frente fria, que desloca-se do Uruguai para esta região e se alonga para o oceano. Chuvas são previstas, também em outras regiões, sobretudo no norte da América do Sul decorrente de núcleos convectivos que desenvolve-se nesta região.

Da mesma forma que foi gerada esta previsão, o Modelo Global do CPTEC gera previsões até 7 dias. Deve-se no entanto, observar que quanto mais longas forem as previsões do tempo, menos confiáveis serão.

Além do Modelo Global, o CPTEC ainda disponibiliza os resultados do Modelo Regional ETA, que utiliza uma grade de resolução de cálculo de 40 x 40 Km de área para até 3 dias de previsão, portanto bem mais preciso que o modelo Global, que utiliza uma grade de 200 x 200 Km.

Deste modo, exemplificamos como as informações meteorológicas são trabalhadas, até a saída das previsões numérica do tempo. O Último passo deste processo é a interpretação destas saídas pelos meteorologistas, que confeccionam os boletins escritos de previsão do tempo, para posteriormente divulgados. Tais boletins são atualizados diariamente na Internet.

## **8. CONCLUSÃO**

Para a previsão do tempo é necessário o envolvimento de grandes recursos e da cooperação entre os países. Os resultados são úteis para diversas áreas de atividade humana e também para a população em geral. No entanto, para que tais resultados possam ser melhor aproveitados, seja estes por especialistas ou pelo público em geral, não basta ter acesso às informações. É necessário noções gerais de meteorologia, e ainda conhecimentos das mais diversas áreas, tais como a física, matemática e geografia entre outras.

É portanto um exemplo da importância do trabalho do professor, que em sala de aula tem a responsabilidade de passar tais conhecimentos à população.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

World Meteorological Organization (WMO). **One Hundred Years of International Co-operation in Meteorology (1873-1973)**. WMO No.345, Geneva, 1973

Ahrens, C. D. **Meteorology Today: An introduction to Weather, Climate and the Environment**. 5.ed. West Publishing Company, 1994

Vianello, R.L. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa, UFV Imprensa  
Universitária, 1991.

## **CAPÍTULO 6**

# **FENÔMENOS EL NIÑO E LA NIÑA**

**Gilvan Sampaio de Oliveira\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e-mail: [sampaio@cptec.inpe.br](mailto:sampaio@cptec.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>6-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>6-7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6-9</b>
<b>2. O QUE É EL NIÑO?.....</b>	<b>6-9</b>
<b>3. O QUE É LA NIÑA?.....</b>	<b>6-12</b>
<b>4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>6-14</b>

## LISTA DE FIGURAS

- 1 - ANOMALIA DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR (EM GRAUS CELSIUS) EM DEZEMBRO DE 1997 ..... 6-11**
- 2 - ANOMALIA DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR (EM GRAUS CELSIUS) EM DEZEMBRO DE 1999 ..... 6-13**

## LISTA DE TABELAS

<b>1 - EPÍSDIOS DE EL NIÑO, INÍCIO, FINAL E DURAÇÃO EM MESES.....</b>	<b>6-10</b>
<b>2 - EPÍSDIOS DE LA NIÑA, INÍCIO, FINAL E DURAÇÃO EM MESES.....</b>	<b>6-13</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

Os fenômenos El Niño e La Niña despertaram muita curiosidade nos últimos anos. Em especial a imprensa vem divulgando notas sobre estes fenômenos. Mas de fato, o que é esse tal de El Niño ? E o que é La Niña ? Onde e quando esses fenômenos ocorrem ? Quais são os impactos desses fenômenos no Brasil ? Esse pequeno texto é exatamente para esclarecer algumas dúvidas sobre estes fenômenos que tanto chamam a atenção da população.

## **2. O QUE É EL NIÑO?**

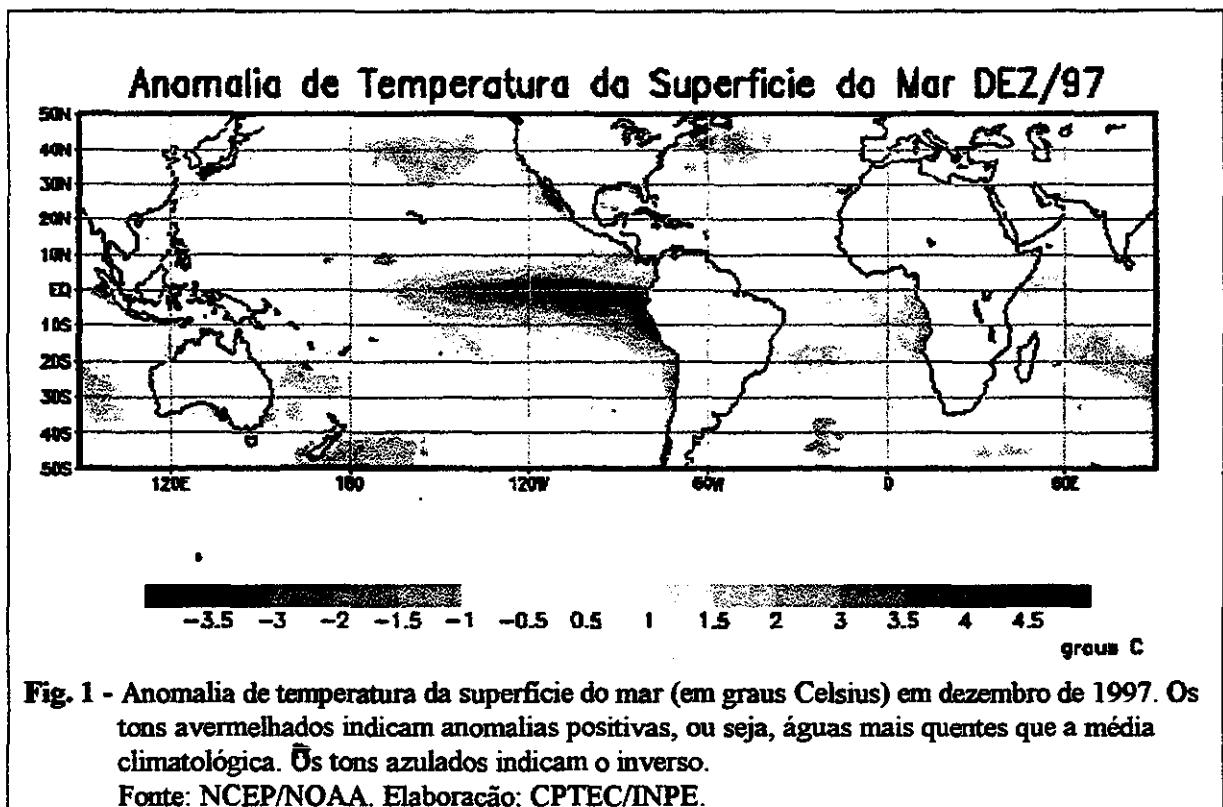
O fenômeno El Niño é caracterizado pelo aquecimento anômalo ou anormal das águas do Pacífico Equatorial Central e Oriental (desde a costa oeste da América do Sul). O aquecimento e o subsequente resfriamento num episódio típico de El Niño dura de 12 a 18 meses, tendo início no começo do primeiro ano, atingindo sua máxima intensidade durante Dezembro - Janeiro e terminando na metade do segundo ano. Não existe um ciclo bem definido para a configuração do El Niño. Em geral, entre 2 e 7 anos há um episódio.



**TABELA 1 - EPISÓDIOS DE EL NIÑO, INÍCIO, FINAL E DURAÇÃO EM MESES. MÉTODO DE KEVIN TRENBERTH (TRENBERTH, K. E. - 1997). AS CÉLULAS EM DESTAQUE INDICAM EVENTOS ACOPLADOS. FONTE DE DADOS: CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC)/NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION (NCEP)/NATIONAL WEATHER SERVICE (NWS)- ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA).**

Início	Fim	Duração (meses)
08/1951	02/1952	7
03/1953	11/1953	9
04/1957	01/1958	15
06/1963	02/1964	9
05/1965	06/1966	14
09/1968	03/1970	19
04/1972	03/1973	12
08/1976	03/1977	8
07/1977	01/1978	7
10/1979	04/1980	7
04/1982	07/1983	16
08/1986	02/1988	19
03/1991	07/1992	7
02/1993	09/1993	8
06/1994	03/1995	10
04/1997	05/1998	14

Em seu estágio maduro, as águas quentes ocupam uma região estreita e comprida próxima do equador que se estende desde a costa do Peru até por volta de 180° de longitude (linha de data internacional). Em alguns episódios, como o de 1982/83 e o de 1997/98, observam-se temperaturas da superfície do mar até 5°C acima da média histórica (Figura 1).



Esse aumento da temperatura das águas do Oceano Pacífico Equatorial provoca mudanças na circulação da atmosfera, o que induz a padrões meteorológicos e climáticos anômalos. No Brasil, os principais efeitos do fenômeno El Niño são:

- **Região Norte:** secas de moderadas a intensas no norte e leste da Amazônia. Aumento da probabilidade de incêndios florestais, principalmente em áreas de florestas degradadas.
- **Região Nordeste:** como no leste da Amazônia, secas de diversas intensidades no norte do Nordeste ocorrem durante a estação chuvosa de fevereiro a maio. Sul e oeste da Região não são significativamente afetados. Todavia, a Região como um todo é muito influenciada também pelas variações que ocorrem no Oceano Atlântico Tropical.
- **Região Sudeste:** Moderado aumento das temperaturas médias, principalmente no inverno e no verão. Não há padrão característico de mudança das chuvas durante a ocorrência do fenômeno, com exceção do extremo sul do Estado de São Paulo.

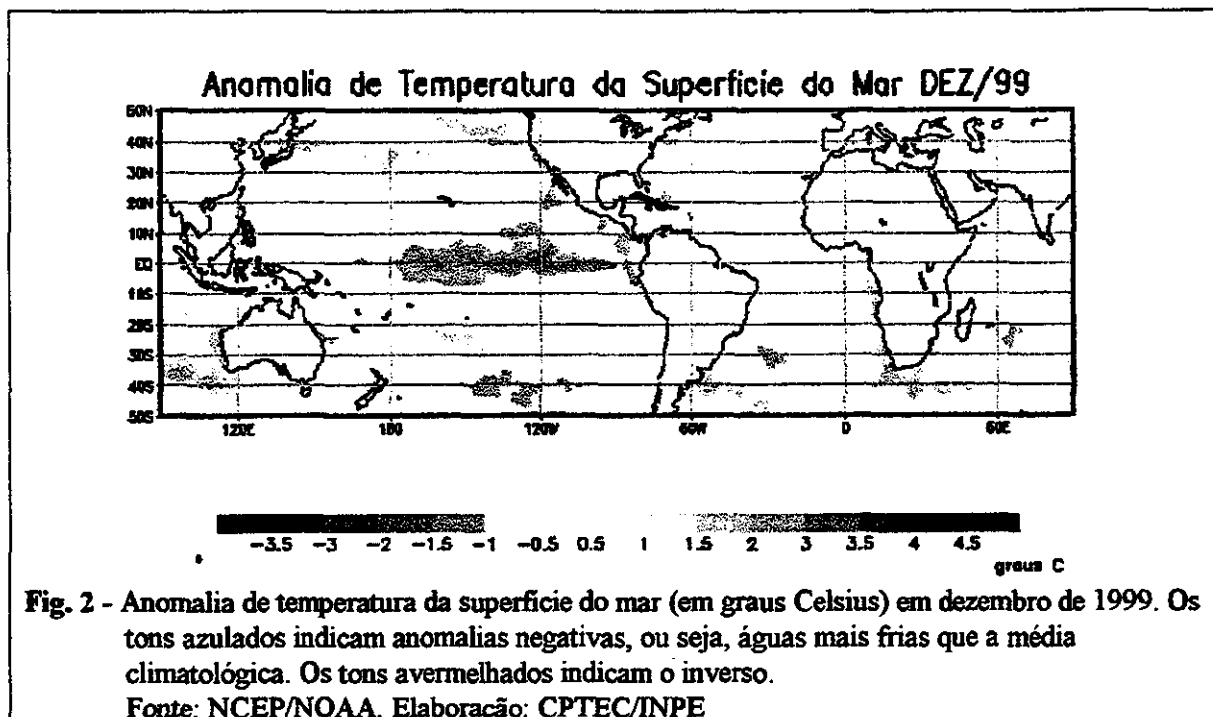
- **Região Centro-Oeste:** Não há evidências de efeitos pronunciados nas chuvas desta Região. Tendência de chuvas acima da média climatológica e temperaturas mais altas no sul do Mato Grosso do Sul.

- **Região Sul:** Precipitações abundantes, principalmente na primavera. Chuvas intensas podem ocorrer de maio a julho, como as que ocorreram no ano de 1983. Aumento da temperatura média. As frentes frias que vêm do sul, podem ficar semi-estacionadas por vários dias sobre a Região, provocando chuvas ao longo de praticamente todo o dia.

Oscilação Sul é uma medida da intensidade dos centros de pressão atmosférica à superfície entre o Pacífico Ocidental e o Pacífico Oriental, mais especificamente entre Darwin (Austrália) e Taiti. O indicador atmosférico que mede a diferença de pressão entre Darwin e Taiti é chamado de Índice de Oscilação Sul (IOS). O IOS apresenta valores negativos em anos de El Niño e positivos em anos de La Niña (vide texto sobre La Niña). El Niño e Oscilação Sul são partes de um mesmo fenômeno de interação entre o Oceano Pacífico Tropical e a atmosfera. Essa interação pode ser chamada de El Niño-Oscilação Sul (ENOS ou ENSO).

### **3. O QUE É LA NIÑA?**

O fenômeno La Niña, ou episódio frio do Oceano Pacífico, é o resfriamento anômalo das águas superficiais no Oceano Pacífico Equatorial Central e Oriental. As águas mais frias estendem-se por uma estreita faixa, com largura de cerca de 10° de latitude ao longo do equador, desde a costa Peruana, até aproximadamente 180° de longitude no Pacífico Central. De modo geral, pode-se dizer que La Niña é o oposto do El Niño, todavia os efeitos não são exatamente os opostos. Assim como o El Niño, La Niña também pode variar em intensidade. Um exemplo dessa variação é o intenso episódio La Niña ocorrido em 1988/89, comparado ao episódio mais fraco de 1995/96. Outros nomes como episódio frio, “El Viejo” ou “anti-El Niño” também foram usados para se referir a este resfriamento, mas o termo La Niña ganhou mais popularidade.



Em geral, o episódio começa a se desenvolver em meados de um ano, atinge sua intensidade máxima no final daquele ano e dissipa-se em meados do ano seguinte, durando de 10 e 15 meses. Assim como o El Niño, também não tem um ciclo bem definido, podendo ocorrer um episódio num intervalo entre 2 e 7 anos.

**TABELA 2 - IDEM TABELA 1 PARA EPISÓDIOS DE LA NIÑA, INÍCIO, FINAL E DURAÇÃO EM MESES. AS CÉLULAS EM DESTAQUE INDICAM EVENTOS ACOPLADOS. MÉTODO DE KEVIN TRENBERTH (TRENBERTH, K. E. - 1997). ATÉ O PRESENTE (12/1999) AINDA PERSISTE O EVENTO DE 1998/1999.**

Início	Fim	Duração
03/1950	02/1951	12
06/1954	03/1956	22
05/1956	11/1956	7
05/1964	01/1965	9
07/1970	01/1972	19
06/1973	06/1974	13
09/1974	04/1976	26
09/1984	06/1985	10
05/1988	06/1989	14
09/1995	03/1996	7
09/1998	-	-

De acordo com as avaliações das características de tempo e clima, de eventos de La Niña ocorridos no passado, observa-se que o La Niña mostra maior variabilidade, enquanto os eventos de El Niño apresentam um padrão mais consistente. Os principais efeitos de episódios do La Niña observados sobre o Brasil são:

- passagens rápidas de frentes frias sobre a Região Sul, com tendência de diminuição da precipitação nos meses de setembro a fevereiro, principalmente no Rio Grande do Sul, além do centro-nordeste da Argentina e Uruguai;
- temperaturas próximas da média climatológica ou ligeiramente abaixo da média sobre a Região Sudeste, durante o inverno;
- chegada das frentes frias até a Região Nordeste, principalmente no litoral da Bahia, Sergipe e Alagoas;
- tendência de chuvas abundantes no norte e leste da Amazônia;
- possibilidade de chuvas acima da média sobre a região semi-árida do Nordeste do Brasil. Essas chuvas só ocorrem, se simultaneamente ao La Niña, as condições atmosféricas e oceânicas sobre o Oceano Atlântico mostrarem-se favoráveis, isto é, com TSM acima da média no Atlântico Tropical Sul e abaixo da média no Atlântico Tropical Norte.

#### **4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Oliveira, Gilvan Sampaio – 2000 – O El Niño e você – livro em publicação.

Páginas na internet do CPTEC/INPE: [www.cptec.inpe.br](http://www.cptec.inpe.br): El Niño e La Niña

Philander, S.G.H., 1990: El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA, 289 pp.

Trenberth, K. E. - 1997 - The definition of El Niño. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 78, nº 12, december 1997: 2771-2777

## **CAPÍTULO 7**

### **MEIO AMBIENTE E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**Eduardo Fábio de Carvalho Loyolla\***  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE**

---

\* e-mail: [loyolla@cptec.inpe.br](mailto:loyolla@cptec.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7 - 7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7 - 13</b>
<b>2. CICLO HIDROLÓGICO.....</b>	<b>7 - 14</b>
2.1 O QUE É O CICLO HIDROLÓGICO.....	7 - 14
2.2 A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA NOS DIAS DE HOJE .....	7 - 16
2.3 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - ATMOSFERA.....	7 - 18
2.4 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - CONTINENTES .....	7 - 22
2.5 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - OCEANOS.....	7 - 25
2.6 COMO A ÁGUA ESTÁ ARMAZENADA NO SOLO.....	7 - 25
2.7 ENCHENTES.....	7 - 27
2.8 FLORESTAS: DESMATAMENTO E PRESERVAÇÃO .....	7 - 28
2.9 ÁGUA SUBTERRÂNEA: EXPLORAÇÃO E POLUIÇÃO.....	7 - 29
<b>3. INTERAÇÃO VEGETAÇÃO-ATMOSFERA .....</b>	<b>7 - 30</b>
3.1 A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ATMOSFERA.....	7 - 30
3.2 A INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA NA VEGETAÇÃO.....	7 - 32
3.2.1 CAMPOS.....	7 - 32
3.2.2 DESERTO.....	7 - 33
3.2.3 TUNDRA .....	7 - 34

3.2.4 FLORESTA TROPICAL .....	7 - 34
3.2.5 FLORESTA TEMPERADA.....	7 - 35
3.2.6 FLORESTA DE CONÍFERAS.....	7 - 35
3.3 A INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA NA VEGETAÇÃO.....	7 - 36
3.4 VEGETAÇÃO BRASILEIRA .....	7 - 38
3.4.1 FLORESTA AMAZÔNICA.....	7 - 39
3.4.2 MATA ATLÂNTICA .....	7 - 41
3.4.3 MATA COSTEIRA .....	7 - 43
3.4.4 CAATINGA .....	7 - 44
3.4.5 CERRADO .....	7 - 46
3.4.6 PANTANAL.....	7 - 48
3.4.7 CAMPO.....	7 - 50
3.4.8 PROBLEMAS ECOLÓGICOS .....	7 - 52
3.4.8.1 FLORESTA AMAZÔNICA.....	7 - 52
3.4.8.2 MATA ATLÂNTICA .....	7 - 54
3.4.8.3 MATA COSTEIRA.....	7 - 55
3.4.8.4 CAATINGA.....	7 - 56
3.4.8.5 CERRADOS .....	7 - 57
3.4.8.6 PANTANAL.....	7 - 58
3.4.8.7 CAMPOS.....	7 - 59



<b>4. CLIMA URBANO .....</b>	<b>7 - 60</b>
4.1 LINHA DO TEMPO .....	7 - 60
4.2 CARACTERÍSTICAS DO CLIMA URBANO .....	7 - 61
4.3 ILHA DE CALOR .....	7 - 62
<b>5. RADIAÇÃO SOLAR.....</b>	<b>7 - 65</b>
5.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR.....	7 - 65
5.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA RADIAÇÃO SOLAR .....	7 - 68
5.3 A IMPORTÂNCIA DA ATMOSFERA .....	7 - 69
<b>6. ELEMENTOS CLIMÁTICOS.....</b>	<b>7 - 71</b>
6.1 TEMPERATURA.....	7 - 71
6.2 PRESSÃO .....	7 - 74
<b>7. PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA .....</b>	<b>7 - 75</b>
7.1 PREVISÃO DE TEMPO .....	7 - 75
7.1.1 A EVOLUÇÃO ATRAVÉS DOS TEMPOS .....	7 - 77
7.2 PREVISÃO DE CLIMA .....	7 - 80
7.3 TIPOS DE NUVENS .....	7 - 81
7.3.1 CUMULUS HUMILIS.....	7 - 81
7.3.2 CUMULUS CONGESTUS.....	7 - 82
7.3.3 CUMULONIMBUS.....	7 - 82
7.3.4 CIRRUS UNCINUS .....	7 - 83

7.3.5 CIRROSTRATUS.....	7 - 84
7.3.6 ALTOSTRATUS.....	7 - 84
7.4 FENÔMENOS METEOROLÓGICOS.....	7 - 85
7.4.1 CHUVA.....	7 - 85
7.4.2 NEVE.....	7 - 86
7.4.3 ORVALHO.....	7 - 86
7.4.4 GEADA.....	7 - 87
7.4.5 NEVOEIRO.....	7 - 87
7.4.6 INVERSÃO TÉRMICA.....	7 - 88
7.4.7 FRENTE FRIA.....	7 - 89
7.4.8 FRENTE QUENTE.....	7 - 89
7.4.9 TEMPESTADE.....	7 - 90
7.4.10 TORNADO.....	7 - 91
7.4.11 FURACÃO / CICLONE TROPICAL.....	7 - 91
7.4.12 RESSACA DO MAR.....	7 - 92
7.4.13 RAIOS / RELÂMPAGO / TROVÃO.....	7 - 93
7.4.14 ARCO ÍRIS.....	7 - 93
7.4.15 MIRAGEM.....	7 - 94
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>7 - 94</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>2.1 – MOVIMENTAÇÃO DA ÁGUA .....</b>	<b>7 - 15</b>
<b>2.2 – ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NA TERRA .....</b>	<b>7 - 15</b>
<b>2.3 – ZONAS DE ALTA E BAIXA PRESSÃO .....</b>	<b>7 - 16</b>
<b>2.4 – ZONAS DE ALTA E BAIXA PRECIPITAÇÃO COM VEGETAÇÃO .....</b>	<b>7 - 16</b>
<b>2.5 – LOCAIS ONDE A ÁGUA É UTILIZADA .....</b>	<b>7 - 17</b>
<b>2.6 – RIO TIETÊ EM SÃO PAULO .....</b>	<b>7 - 18</b>
<b>2.7 – ÁREA DE RISCO DE CONFLITOS PRÓXIMO ÀS COLINAS DE GOLÃ .....</b>	<b>7 - 18</b>
<b>2.8 – QUANTIDADE DE VAPOR NA ATMOSFERA .....</b>	<b>7 - 19</b>
<b>2.9 – FONTE, SUMIDOURO E TRANSPORTE DE VAPOR .....</b>	<b>7 - 19</b>
<b>2.10 – COALESCÊNCIA .....</b>	<b>7 - 20</b>
<b>2.11 – FORMAÇÃO DA NEVE OU GRANIZO .....</b>	<b>7 - 21</b>
<b>2.12 – ISOTERMA .....</b>	<b>7 - 22</b>
<b>2.13 – INTERCEPTAÇÃO E GOTEJAMENTO .....</b>	<b>7 - 22</b>
<b>2.14 – ENXURRADA .....</b>	<b>7 - 23</b>
<b>2.15 – NOMES DADOS AOS CURSOS D'ÁGUA .....</b>	<b>7 - 24</b>
<b>2.16 – GELEIRA E BANQUISA .....</b>	<b>7 - 24</b>
<b>2.17 – ONDA NO MAR .....</b>	<b>7 - 25</b>

<b>2.18 – SOLO, GRÃOS E POROS COM BOLHAS DE AR E ÁGUA</b>	<b>7 - 26</b>
<b>2.19 – DIVISÕES DO SOLO</b>	<b>7 - 27</b>
<b>2.20 – ENCHENTE</b>	<b>7 - 28</b>
<b>2.21 – QUEIMADA</b>	<b>7 - 29</b>
<b>2.22 – ZONAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS</b>	<b>7 - 30</b>
<b>3.1 – ELEMENTOS DA FOTOSSÍNTESE</b>	<b>7 - 31</b>
<b>3.2 – ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR POR DIFERENTES BIOMAS</b>	<b>7 - 31</b>
<b>3.3 – DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DE BIOMAS E PRECIPITAÇÃO</b>	<b>7 - 32</b>
<b>3.4 – CAMPOS</b>	<b>7 - 33</b>
<b>3.5 – DESERTOS</b>	<b>7 - 33</b>
<b>3.6 – TUNDRA</b>	<b>7 - 34</b>
<b>3.7 – FLORESTA TROPICAL</b>	<b>7 - 35</b>
<b>3.8 – FLORESTA TEMPERADA</b>	<b>7 - 35</b>
<b>3.9 – FLORESTA DE CONÍFERAS</b>	<b>7 - 36</b>
<b>3.10 – COMPOSIÇÃO DA PLANTA</b>	<b>7 - 37</b>
<b>3.11 – CONSTITUIÇÃO DA FOLHA</b>	<b>7 - 38</b>
<b>3.12 – ESTÔMATO</b>	<b>7 - 38</b>
<b>3.13 – MAPA DE VEGETAÇÃO NO BRASIL</b>	<b>7 - 39</b>

<b>3.14 – FLORESTA AMAZÔNICA .....</b>	<b>7 - 39</b>
<b>3.15 – MATA ATLÂNTICA .....</b>	<b>7 - 41</b>
<b>3.16 – MATA COSTEIRA .....</b>	<b>7 - 43</b>
<b>3.17 – CAATINGA .....</b>	<b>7 - 45</b>
<b>3.18 – CERRADO .....</b>	<b>7 - 47</b>
<b>3.19 – PANTANAL .....</b>	<b>7 - 49</b>
<b>3.20 – CAMPO .....</b>	<b>7 - 51</b>
<b>4.1 – DATAS IMPORTANTES NO ESTUDO DE CLIMA URBANO .....</b>	<b>7 - 61</b>
<b>4.2 – EFEITO DA URBANIZAÇÃO DESCONTROLADA .....</b>	<b>7 - 62</b>
<b>4.3 – EFEITOS DA ILHA DE CALOR .....</b>	<b>7 - 63</b>
<b>4.4 – CIDADE DE SÃO PAULO .....</b>	<b>7 - 64</b>
<b>5.1 – ECLÍPTICA E INCLINAÇÃO DA TERRA .....</b>	<b>7 - 66</b>
<b>5.2 – MOVIMENTO DE TRANSLAÇÃO E ROTAÇÃO DA TERRA .....</b>	<b>7 - 67</b>
<b>5.3 – POSIÇÃO RELATIVA DO SOL NO CÉU .....</b>	<b>7 - 68</b>
<b>5.4 – RADIAÇÃO INCIDENTE NA TERRA .....</b>	<b>7 - 69</b>
<b>5.5 – RADIAÇÃO RECEBIDA E REFLETIDA NO CONTINENTE .....</b>	<b>7 - 70</b>
<b>5.6 – CO<sup>2</sup> ABSORVENDO E REFLETINDO RADIAÇÃO .....</b>	<b>7 - 71</b>
<b>6.1 – TERMÔMETROS – EVOLUÇÃO .....</b>	<b>7 - 72</b>

<b>6.2 – VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NO BRASIL E EM CURITIBA</b>	<b>7 - 73</b>
<b>6.3 – BARÔMETROS – EVOLUÇÃO</b>	<b>7 - 74</b>
<b>6.4 – CENTROS DE ALTA E BAIXA PRESSÃO</b>	<b>7 - 75</b>
<b>7.1 – EXEMPLO DE FORMAÇÃO DE VENTOS</b>	<b>7 - 77</b>
<b>7.2 – RESULTADO ILUSTRATIVO DE MODELO</b>	<b>7 - 80</b>
<b>7.3 – CUMULUS HUMILIS</b>	<b>7 - 81</b>
<b>7.4 – CUMULUS CONGESTUS</b>	<b>7 - 82</b>
<b>7.5 – CUMULONIMBUS</b>	<b>7 - 83</b>
<b>7.6 – CIRRUS UNCINUS</b>	<b>7 - 83</b>
<b>7.7 – CIRRISTRATUS</b>	<b>7 - 84</b>
<b>7.8 – ALTOSTRATUS</b>	<b>7 - 85</b>
<b>7.9 – CHUVA</b>	<b>7 - 86</b>
<b>7.10 – NEVE</b>	<b>7 - 86</b>
<b>7.11 – ORVALHO</b>	<b>7 - 87</b>
<b>7.12 – GEADA</b>	<b>7 - 87</b>
<b>7.13 – NEVOEIRO</b>	<b>7 - 88</b>
<b>7.14 – INVERSÃO TÉRMICA</b>	<b>7 - 88</b>
<b>7.15 – FRENTE FRIA</b>	<b>7 - 89</b>
<b>7.16 – FRENTE QUENTE</b>	<b>7 - 90</b>

<b>7.17 – TEMPESTADE .....</b>	<b>7 - 90</b>
<b>7.18 – TORNADO .....</b>	<b>7 - 91</b>
<b>7.19 - FURACÃO / CICLONE TROPICAL .....</b>	<b>7 - 92</b>
<b>7.20 – RESSACA DO MAR .....</b>	<b>7 - 92</b>
<b>7.21 – RAI0 / RELÂMPAGO / TROVÃO .....</b>	<b>7 - 93</b>
<b>7.22 – ARCO ÍRIS .....</b>	<b>7 - 93</b>
<b>7.23 – MIRAGEM .....</b>	<b>7 - 94</b>

•

## 1. INTRODUÇÃO

“O INPE-CPTEC criou um projeto para utilização da Internet e recursos de Multimídia para se constituir material didático adicional no estudo do Meio Ambiente, envolvendo conhecimentos de Geografia, Física e Química. Visa tal projeto motivar alunos ao desenvolvimento de pesquisa e a busca de conhecimentos.

Este recurso didático, não apenas serve para aprimorar o conhecimento científico na área ambiental, como também para desenvolver uma conscientização da necessidade de se preservar o meio ambiente.

Numa primeira fase, foi gerado um CD com seis aulas sobre elementos atmosféricos e suas inter-relações. Os temas desse primeiro CD abordam: Ciclo Hidrológico, Interação Vegetação-Atmosfera, Radiação Solar, Elementos Climáticos, Clima Urbano e Previsão de Tempo e Clima. As figuras apresentadas neste capítulo foram extraídas desse primeiro CD.

Para que a assimilação, por parte dos alunos de nível médio, fosse a maior possível, foram utilizados recursos audio-visuais da mais alta tecnologia tais como: vídeo, animação em 3D, locução de fácil entendimento, experiências práticas e testes.

Dentro desse projeto, foi desenvolvido um fórum de debates, via Internet, para que, tanto alunos quanto professores possam discutir, levantar possíveis questões e sanar eventuais dúvidas. É interesse do INPE-CPTEC monitorar esse fórum para que os assuntos não sejam desviados e para que os próximos lançamentos sejam aperfeiçoados.

Esse projeto contou com o apoio financeiro do INPE, FAPESP, FUNCATE e FUNDAÇÃO VITAE. Outras instituições e empresas colaboraram fornecendo imagens e vídeos (NASA, Fundação Jean Manzon, Image Bank, NHK), e no desenvolvimento do CD-ROM (Mamute Mídia e Dino Vicente Música).

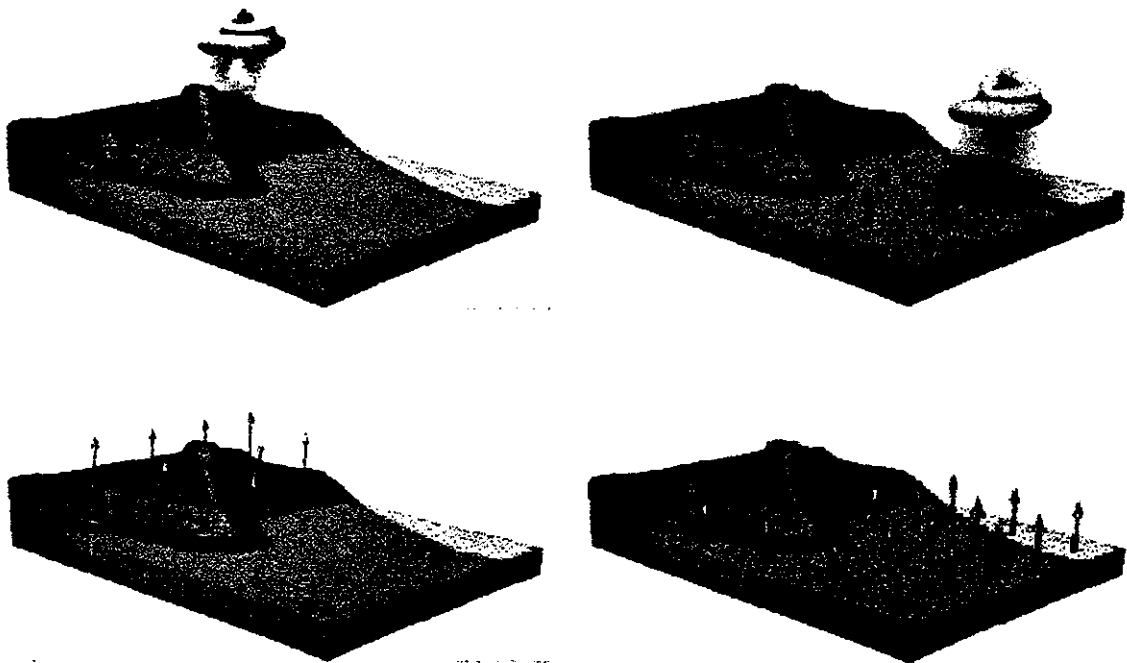


## 2. CICLO HIDROLÓGICO

### 2.1 O QUE É O CICLO HIDROLÓGICO

O movimento da água entre os continentes, oceanos e a atmosfera é chamado de ciclo hidrológico.

Na atmosfera, o vapor da água em forma de nuvens pode ser transformado em chuva, neve ou granizo, dependendo das condições do clima. Essa transformação provoca o que se chama de precipitação. A precipitação ocorre sobre a superfície do planeta, tanto nos continentes como nos oceanos. Nos continentes, uma parte das precipitações é devolvida para a atmosfera, graças à evaporação, outra parte acaba desaguando nos oceanos depois de percorrer os caminhos recortados pelos rios. Os oceanos portanto recebem água de duas fontes: das precipitações e do desaguamento dos rios, e perdem pela evaporação. Na atmosfera, o excesso de vapor sobre os oceanos é transportada para os continentes, em sentido inverso ao desaguamento.



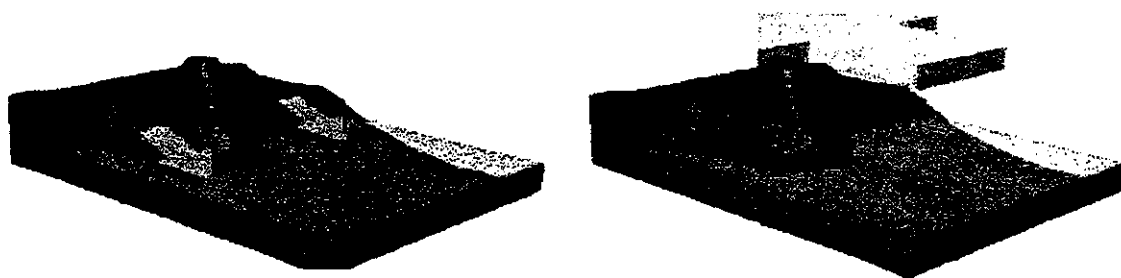


Fig. 2.1 - Movimentação da água.

Os oceanos evaporam mais água que recebem pela precipitação, mas a água do mar não pode ser utilizada para consumo ou irrigação por ser salgada.

**Armazenamento de água na Terra**



Fig. 2.2 – Armazenamento de água na Terra.:

A precipitação é alta na zona equatorial, especialmente sobre as florestas tropicais e no Oceano Pacífico. Nas regiões sob a influência das altas subtropicais, a precipitação é baixa; já na zona temperada, existem regiões de precipitação relativamente alta, onde predominam os sistemas frontais. Na zona polar, as precipitações são baixas.



Fig. 2.3 – Zonas de alta e baixa pressão.

A evaporação é alta nos oceanos que estão sob a influência das altas subtropicais. Nos oceanos equatoriais, onde a precipitação é abundante, a evaporação é menos intensa. Nos continentes, a evaporação máxima ocorre na zona equatorial. Lembramos que, na "contabilidade global", chove mais nos continentes que nos oceanos, e os oceanos evaporam mais que os continentes.

Nos continentes, os locais onde a precipitação é abundante possuem florestas e onde há escassez de precipitação, estão os desertos. Explorar a relação entre as características climáticas, tais como precipitação, temperatura e altitude, com os tipos de vegetação, faz parte da Biogeografia.



Fig. 2.4 – Zonas de alta e baixa precipitação com vegetação.

## 2.2 A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA NOS DIAS DE HOJE

Setenta por cento do corpo humano é composto de água, o que a torna vital para nossa sobrevivência. Especialistas afirmam que é muito mais difícil suportar a sede que a

fome. Além de sua importância em nosso organismo, a água é fundamental em processos produtivos da agricultura e da indústria.

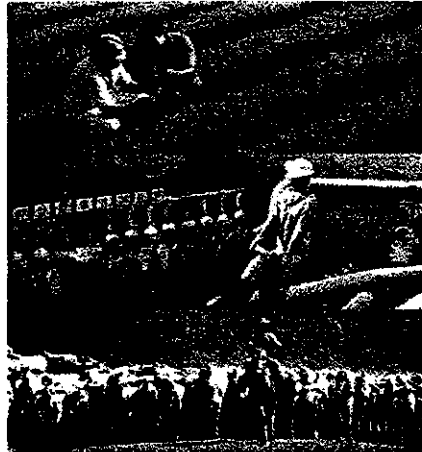


Fig. 2.5 – Locais onde a água é utilizada.

Por que eu devo me preocupar, afinal, não basta abrir a torneira para ter água? Normalmente, não temos consciência da importância da água. Somente nos períodos de estiagem, quando falta água nas nossas casas, lembramos, um tanto "nervosos", que dependemos da água para as mais variadas atividades domésticas. E, com paciência, temos que esperar. Dificilmente alguém se pergunta quanto consome de água por mês; a maior parte das pessoas somente paga a conta no banco. Essa inconsciência pode ser explicada pelo fato de vivermos em regiões onde a oferta de água é bastante satisfatória. Os moradores do Sertão, no Nordeste Brasileiro, provavelmente atribuem um valor bem diferente à água.

Em todo o mundo, com exceção da Europa, a principal utilização da água está na agricultura. Ela é usada na irrigação de cultura e criação de animais. Em algumas áreas da Ásia, o consumo de água na atividade agropecuária chega a ser dez vezes maior que na produção industrial.

Durante muito tempo, pensou-se que a água, ao circular na natureza, seria capaz de eliminar todos os seus poluentes e seria um bem infinito, assim os esgotos industriais e domésticos eram despejados, sem tratamento, nos rios. Mas, atualmente, a água é concebida pelos especialistas como um recurso renovável, porém finito, já que a

poluição e o uso dos recursos hídricos têm aumentado tanto, que não permitem a reposição na velocidade necessária ao consumo.

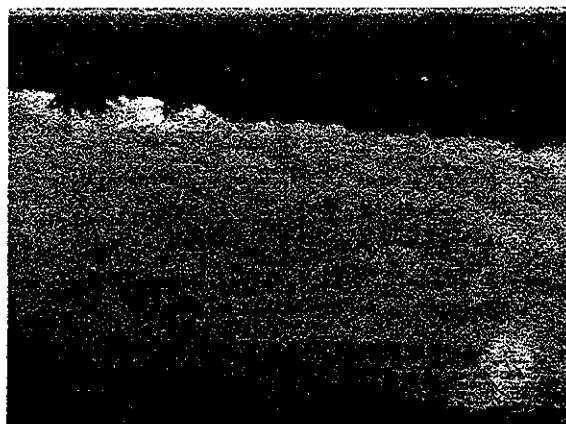


Fig. 2.6 – Rio Tietê em São Paulo

Alguns analistas advertem para a possibilidade de conflitos armados pela disputa de água, mas, na verdade, esses conflitos já ocorrem. Não foi por acaso que Israel ocupou e reluta em devolver as Colinas de Golã, lá estão os mananciais que abastecem uma porção importante do território daquele país.

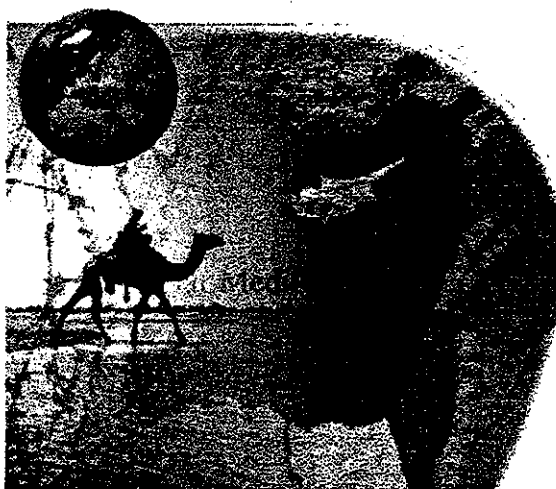


Fig. 2.7 – Área de risco de conflitos próximo às Colinas de Golã

### 2.3 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - ATMOSFERA

Através da evaporação e transpiração, o vapor d'água fica disponível na superfície. Então, uma parte do vapor "sobe", indo para níveis mais altos da atmosfera. A maior

parte do vapor fica concentrada nos primeiros 2 km da troposfera. Somente uma pequena parte vai para níveis ainda mais altos. A partir de 5 km de altura, praticamente não encontramos vapor.

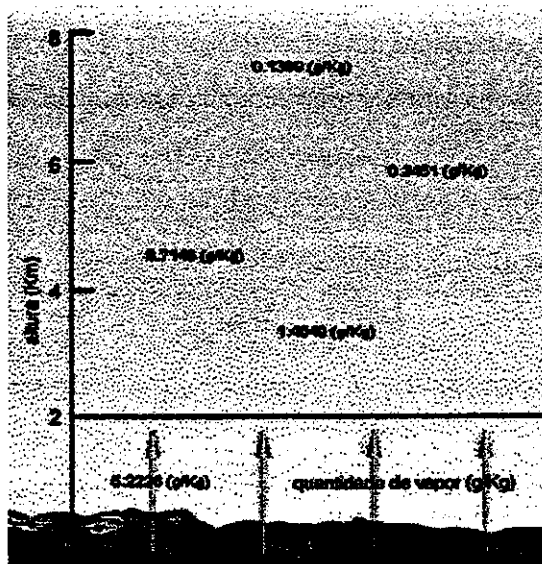


Fig. 2.8 – Quantidade de vapor na atmosfera.

Nos continentes, a precipitação é maior que a evaporação. Portanto, os continentes são os sumidouros de vapor da atmosfera. Os oceanos evaporam mais água que recebem pela precipitação. Portanto os oceanos são a fonte de vapor para a atmosfera.



Fig. 2.9 – Fonte, sumidouro e transporte de vapor.

As fontes de vapor são as regiões que "exportam" vapor; os sumidouros, que "importam". Podemos notar que:

- a) as principais fontes de vapor estão localizados nos oceanos subtropicais;

- b) os sumidouros de vapor estão na zona equatorial e em regiões da zona temperada;
- c) o transporte de vapor ocorre das fontes para os sumidouros.

Quando certa quantidade de vapor é submetida a baixas temperaturas ela passa para a forma líquida, assim é que nascem as nuvens. As gotículas de água formam-se quando o vapor condensa sobre a superfície de partículas muito pequenas, chamadas de núcleos de condensação. Após um certo tempo as gotículas tornam-se grandes. Temos uma gotícula de nuvem.

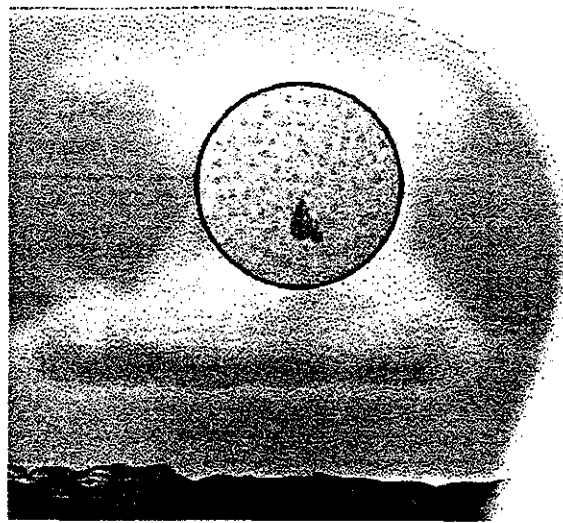


Fig. 2.10 - Coalescência.

As gotículas maiores, tendo maior velocidade de queda em relação às outras, colidem com as menores que estão em seu caminho. Em linguagem informal, as gotículas maiores "atropelam" as menores, ocorrendo o que se pode chamar de coalescência. As gotículas de nuvem, através do processo de colisão e coalescência, crescem até atingir o tamanho de gotas. Ao deixar a base da nuvem, essas gotas são chamadas de gotas de chuva e iniciam sua queda em direção à superfície.

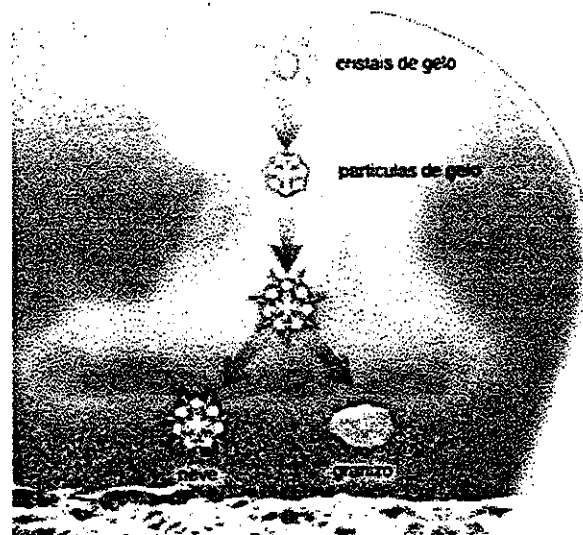


Fig. 2.11 – Formação da neve ou granizo.

Os cristais de gelo formam-se, quando o vapor sublima diretamente na superfície de partículas muito pequenas, chamadas de núcleos de gelo. Os cristais de gelo crescem, inicialmente, por deposição do vapor à sua superfície, formando as partículas de gelo.

As partículas de gelo podem colidir com as gotículas super-resfriadas, crescendo e formando granizo de diferentes tamanhos desde 1 mm até 10 cm, ou podem crescer colidindo e se agregando umas às outras, formando os flocos de neve.

Quando o granizo e os flocos de neve se tornam suficientemente grandes, eles saem da base da nuvem e iniciam sua queda rumo à superfície. Durante a queda, ocorre a fusão da neve e do granizo. Quando a fusão não consegue derreter toda neve e todo gelo, ocorre a precipitação sólida de neve ou granizo. Caso contrário, a neve e o granizo se transformam em gotas de chuva.

A isoterma de 0° C é uma linha na atmosfera definida pela temperatura de 0° C. Abaixo dela a temperatura aumenta e acima a temperatura diminui.





Fig. 2.12 – Isoterma.

As nuvens quentes são aquelas encontradas abaixo da isoterma de 0° C. Nelas, encontramos vapor e gotículas de água. Já as nuvens frias são aquelas encontradas acima da isoterma de 0° C. Nas nuvens frias mistas, encontramos vapor de água super-resfriadas e cristais de gelo. Nas nuvens frias congeladas, encontramos somente vapor e cristais de gelo.

#### 2.4 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - CONTINENTES

Depois que as gotas de chuva saem da base da nuvem elas iniciam sua queda em direção à superfície, no trajeto, e seu diâmetro vai diminuindo em virtude da evaporação.



Fig. 2.13 – Interceptação e gotejamento.

Caindo sobre uma superfície coberta com vegetação, parte da chuva fica retida nas folhas. Esse fenômeno é chamado de interceptação. Quando as folhas não são mais capazes de armazenar água, continuando a chuva, ocorre o gotejamento.

Quando a água - proveniente das gotas de chuva ou do gotejamento - chega ao solo, ocorrem dois processos: a infiltração onde a água "entra" no solo e o escoamento superficial onde a água "corre" pela superfície do solo, fenômeno mais conhecido popularmente como "enxurrada".

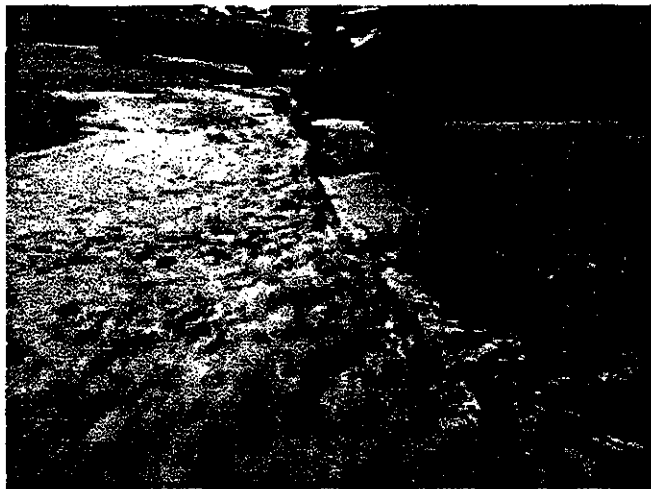


Fig. 2.14 - Enxurrada.

E depois da chuva, o que acontece? Para onde vai toda a água? Nas folhas, a água interceptada evapora, voltando à atmosfera na forma de vapor. No solo uma parte da água evapora e outra parte é absorvida pelas raízes das plantas.

O rio recebe água pelo escoamento superficial e pelo escoamento de base, e perde pela evaporação. Para entender o desaguamento vejamos como um rio nasce. Na nascente, o escoamento de base gera um pequeno filete de água, à medida que a quantidade de água aumenta o curso d'água recebe diversos nomes: regato, riacho, ribeirão e rio. Finalmente, na foz, o rio deságua no mar.

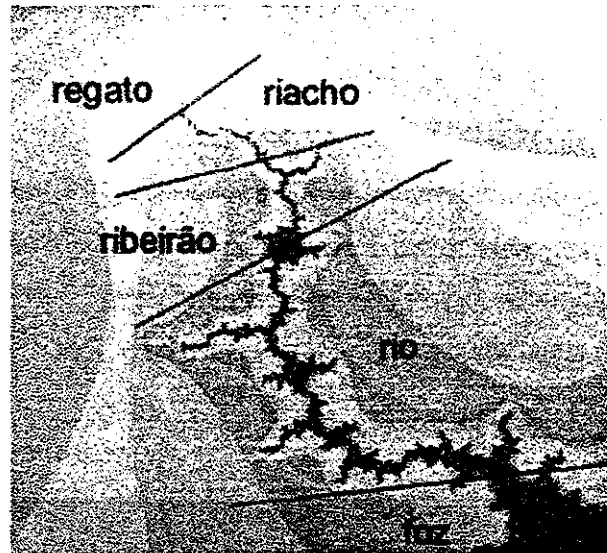


Fig. 2.15 – Nomes dados aos cursos d'água.

Nas regiões continentais da zona polar, a superfície é coberta por uma espessa camada de gelo, conhecida como geleira. Sobre a geleira, cai precipitação na forma de neve. A neve acumulada se movimenta para os locais mais baixos, ou seja, para o oceano, como um “rio de gelo”.

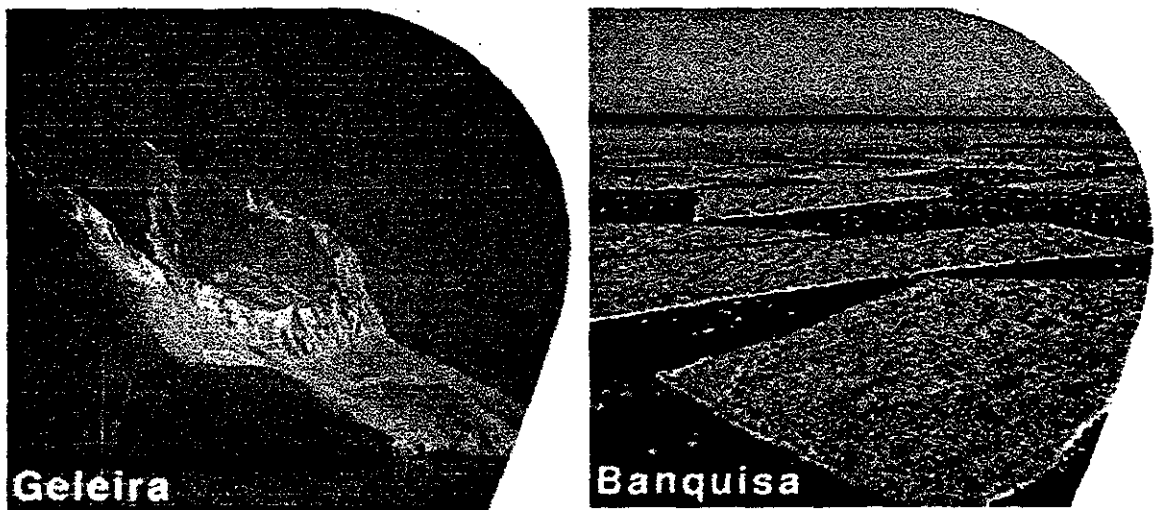


Fig. 2.16 – Geleira e banquisa.

Na Antártica os rios de gelo vão parar nas banquisas. As banquisas são placas de gelo formadas sobre os oceanos, devido ao congelamento da água do mar. Nelas, ocorrem dois processos: o congelamento da água do mar e o derretimento de gelo, o que faz as

banquisas aumentarem ou diminuïrem a sua extensãõ. Também ocorrem os desprendimentos das bordas das banquisas, formando os icebergs.

## 2.5 ACOMPANHANDO O MOVIMENTO DA ÁGUA - OCEANOS

Os oceanos ganham água através do desaguamento dos rios, das chuvas e do derretimento das banquisas e dos icebergs. Já a perda de água dos oceanos acontece por evaporação e pelo congelamento da água do mar nas banquisas.

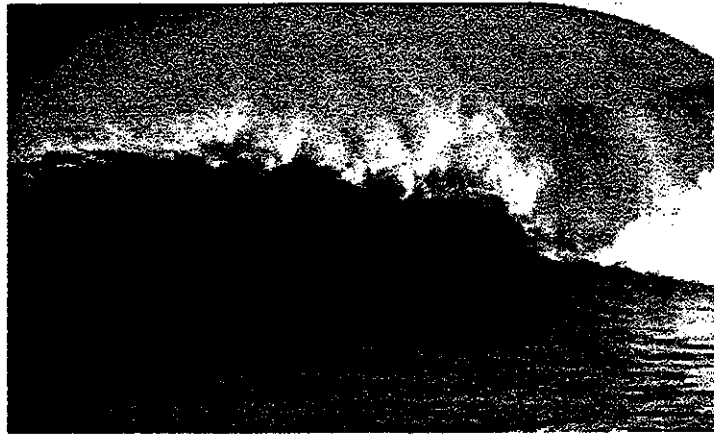


Fig. 2. 17 – Onda no mar.

## 2.6 COMO A ÁGUA ESTÁ ARMAZENADA NO SOLO

Primeiramente por solo, entendemos a camada abaixo da superfície e acima das rochas. Agora, para entender como a água está armazenada, vamos considerar o solo como uma coleção de partículas de diferentes tamanhos, os grãos. A água fica armazenada nos espaços vazios entre os grãos. Esses espaços vazios são chamados de poros, onde se encontram bolhas de ar e água.

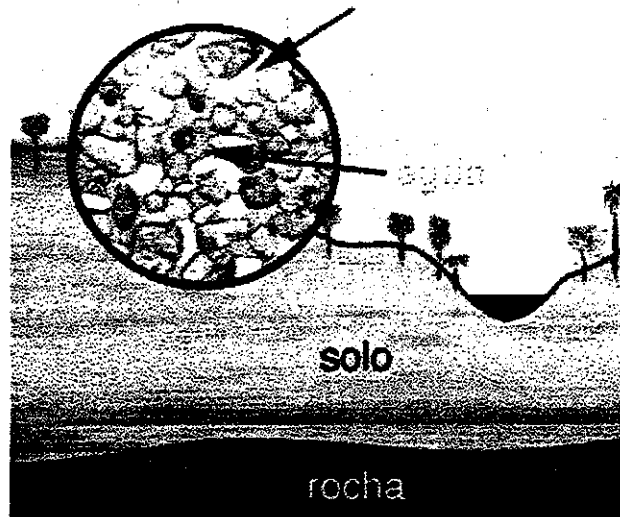


Fig. 2.18 – Solo, grãos e poros com bolhas de ar e água.

A zona de aeração é aquela que fica logo abaixo da superfície, já a zona saturada é onde se encontra o lençol freático, os aquitardes são camadas de rochas quase impermeáveis que separam as zonas saturadas e o aquífero confinado é outro tipo de zona saturada.

Se abirmos um poço logo cuja profundidade alcance o lençol freático, a água só, poderá ser aproveitada com o uso de bombas. Lá como vimos, os poros estão preenchidos de bolhas de água e ar. Nos aquíferos confinados, a água está sob pressão. Ou seja, se abirmos um poço o nível d'água fica acima do nível d'água do lençol freático. Eventualmente, a água jorra do poço; nesse caso, o poço é chamado de artesianos.

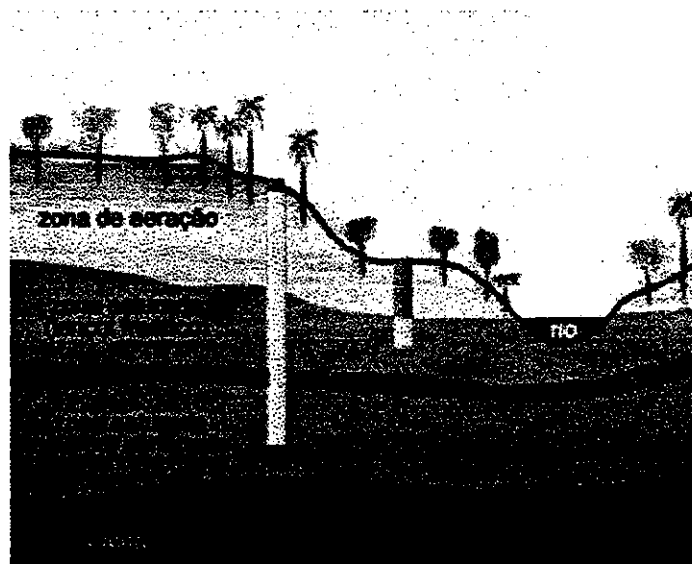


Fig. 2.19 – Divisões do solo.

A água da zona de aeração é absorvida pela vegetação, através das raízes. Quando o solo fica muito seco, ou seja, a quantidade de água nos poros diminui bastante, as raízes não são capazes de retirar a água do solo, podendo morrer por falta de água. Por outro lado, se o solo estiver muito úmido, ou seja, os poros preenchidos com uma quantidade muito baixa de ar, as plantas podem também morrer por falta de oxigênio. Ou seja, é necessário que haja um equilíbrio entre a quantidade de água e de ar, nos poros do solo, para as plantas viverem de forma adequada.

## 2.7 ENCHENTES

Nas grandes cidades existe uma constante pressão para a expansão urbana. A expansão urbana implica na substituição da vegetação nativa por casas, edifícios, indústrias e ruas. A superfície do solo é coberta com materiais impermeáveis, tais como o asfalto e o concreto. Neste ponto, pode-se fazer a pergunta: qual é a consequência da expansão urbana no ciclo hidrológico?

Vamos supor que, devido à expansão urbana, a região foi transformada em um grande conjunto residencial. Ou seja, a vegetação foi substituída por casas e ruas. Isso deixa a região “impermeável” à água. Portanto, durante uma chuva, como a infiltração é muito

pequena, praticamente toda a água escoará rapidamente pela superfície, chegando ao rio e aumentando bastante o seu nível. Esse aumento excessivo pode levar a uma enchente. Se não houvesse a expansão urbana, parte da água infiltraria, o que faria uma menor quantidade escoar pela superfície; portanto, o aumento do nível do rio seria bem menor. Logo, a expansão urbana pode aumentar a frequência de enchentes.

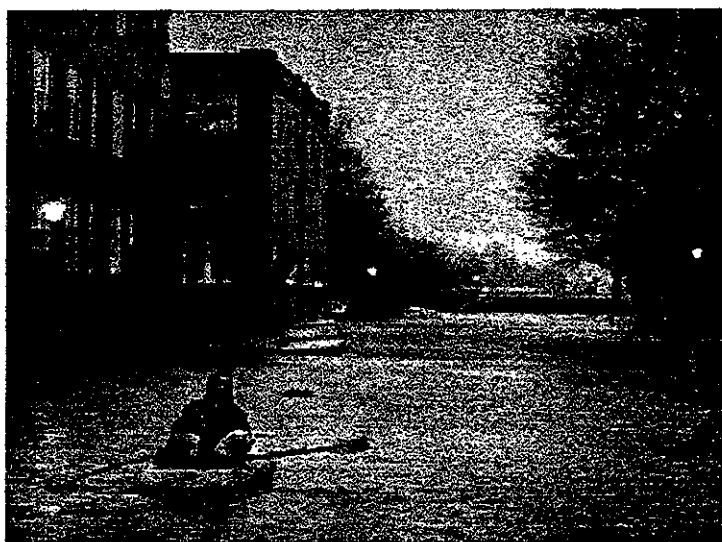


Fig. 2.20 - Enchente.

## 2.8 FLORESTAS: DESMATAMENTO E PRESERVAÇÃO

Nas últimas décadas, a destruição de florestas tropicais tem levado a números alarmantes. Estimativas indicam que a América Latina perdeu mais de 37% da floresta nativa, a África, mais de 50%. Na Amazônia, sabe-se que mais de 10% da floresta nativa já foram destruídos. O desmatamento pode modificar o ciclo hidrológico, tanto na superfície quanto na atmosfera.

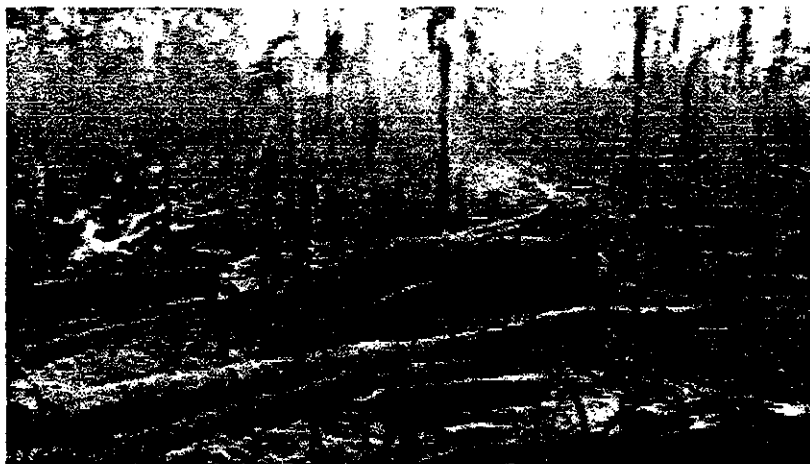


Fig. 2.21 - Queimada.:

Quando florestas tropicais são substituídas por pastagens, ocorre a compactação da camada do solo mais próximo à superfície. O rebanho, ao caminhar sobre o pasto, deixa a superfície do solo mais “dura”, menos permeável à água. Isso diminui a infiltração e aumenta o escoamento superficial, o que favorece a ocorrência de enchentes durante chuvas intensas.

Será que as mudanças no ciclo hidrológico se restringem somente à área desmatada? Admitindo um cenário hipotético de completo desmatamento da Amazônia, alguns estudos recentes sugerem que as mudanças ocorreriam não somente na Amazônia, mas também em toda América do Sul e na África Equatorial. No entanto, esse tipo de prognóstico é ainda muito incerto, apesar dos grandes avanços científicos e computacionais realizados. Para uma compreensão real dos efeitos do desmatamento de florestas tropicais exige um estudo integrado e multidisciplinar.

## 2.9 ÁGUA SUBTERRÂNEA: EXPLORAÇÃO E POLUIÇÃO

A água subterrânea é explorada através da abertura de poços. A água subterrânea é, no Brasil, assim como no mundo inteiro, uma fonte imprescindível de abastecimento de água. Mesmo em locais onde existe grande oferta de água nos rios, como nas regiões Sul e Sudeste do país, a importância da água subterrânea emerge em períodos de estiagem, quando a água dos rios não consegue suprir a demanda.



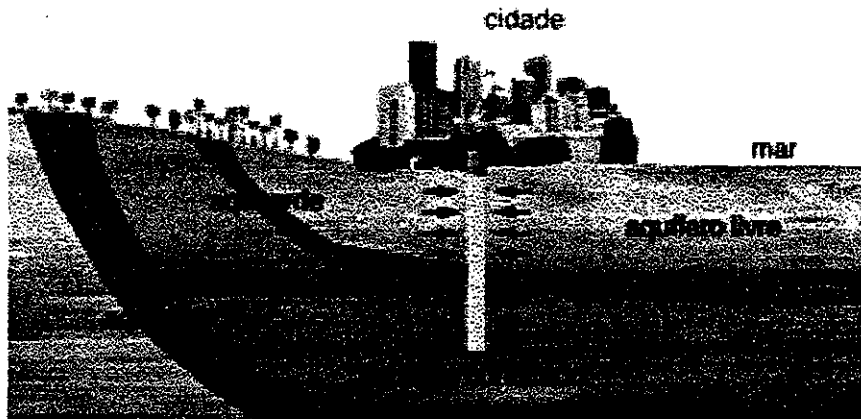


Fig. 2.22 – Zonas de recarga dos aquíferos.

A fonte de recarga natural para a maioria dos aquíferos é a precipitação. A precipitação que recarrega o aquífero infiltra-se em regiões denominadas áreas de recarga. Nos últimos anos, a identificação e a proteção das áreas de recarga têm recebido muita atenção, devido ao intenso interesse em prevenir os aquíferos da poluição da água subterrânea.

### 3. INTERAÇÃO VEGETAÇÃO-ATMOSFERA

#### 3.1 A INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ATMOSFERA

A radiação solar que incide sobre a superfície terrestre deixa uma quantidade de energia disponível. Essa energia aquece o ar e é utilizado pelas plantas. As plantas utilizam uma pequena parte de energia para a fotossíntese, e o restante para a transpiração. Desde cedo aprendemos que as plantas fazem fotossíntese. Mas você lembra o que isso significa? Na fotossíntese, a planta absorve  $\text{CO}_2$  (gás carbônico) e fornece  $\text{O}_2$  (oxigênio). Ou seja, a fotossíntese é o contrário da respiração.

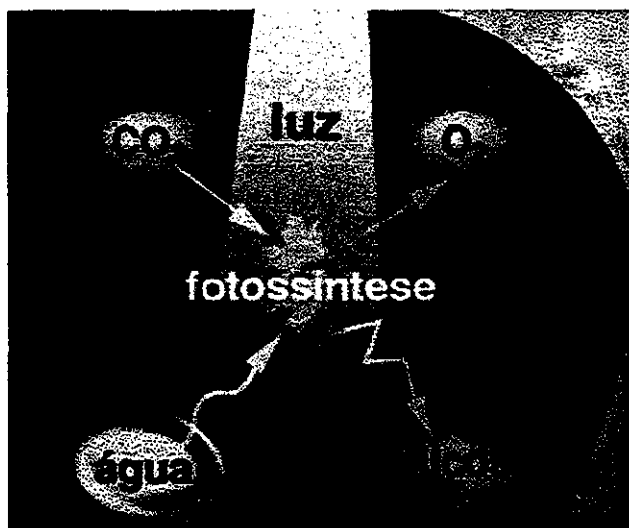


Fig. 3.1 – Elementos da fotossíntese.

Além disso, na fotossíntese, a planta constrói glicose, que é a matéria-prima do amido e da celulose. Durante o dia, paralelamente à fotossíntese, ocorre a **transpiração** das plantas. Na transpiração, as plantas cedem vapor d'água para o ar; portanto, a transpiração deixa o ar mais úmido. O vapor pode ser transportado para cima, formar nuvens e, eventualmente, retornar à superfície na forma de chuva. Ou seja, o vapor d'água oriundo da transpiração é uma importante componente do ciclo hidrológico.



Fig. 3.2 – Absorção de energia solar por diferentes biomomas.

A atmosfera deixa uma quantidade de energia disponível para a superfície. As plantas “roubam” uma parte dessa energia para transpirar. Se não existisse a vegetação, toda a energia seria utilizada para o aquecimento do ar. A superfície ficaria mais quente e mais seca. Se compararmos duas regiões - uma desértica e outra densamente vegetada - sujeitas à mesma radiação solar, ou seja, localizadas na mesma latitude, veremos que, durante o dia, a região desértica é mais quente e seca que a vegetada. A transpiração influencia a superfície, deixando-a menos quente e mais úmida.

### 3.2 A INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA NA VEGETAÇÃO

Parece intuitivo associar vegetação a clima. Por exemplo, florestas tropicais – por exemplo, a floresta Amazônica – ocorrem em regiões onde as chuvas são abundantes e a temperatura é alta. Já onde as chuvas são muito escassas, independentemente da temperatura, ocorrem os desertos.

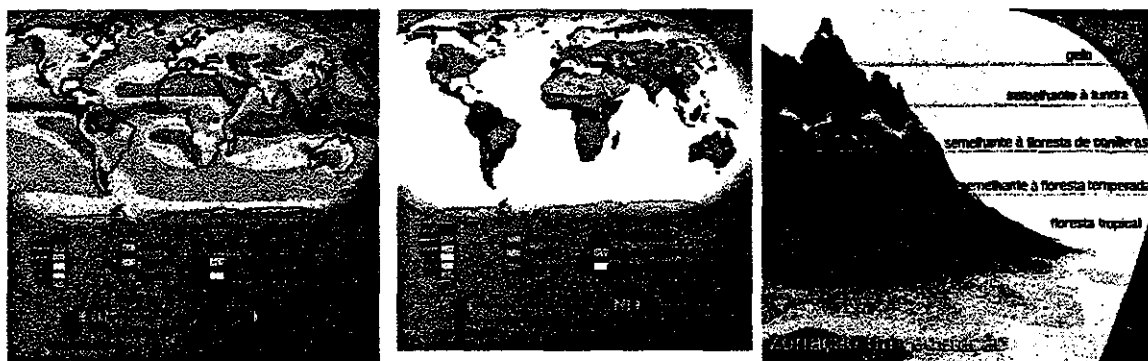


Fig. 3.3 – Distribuição global de biomas e precipitação.

A medida que subimos uma montanha ou saímos do Equador em direção aos pólos a temperatura e a precipitação diminuem. Portanto, encontramos biomas diferentes à medida que subimos a montanha. Isto é a zonação da vegetação.

#### 3.2.1 CAMPOS

A vegetação é constituída principalmente de plantas herbáceas, havendo poucos arbustos. As chuvas são menos abundantes que as das florestas mas mais abundantes

que as dos desertos. Estão sujeitos a períodos de estiagem prolongados; portanto, o estresse hídrico dificulta a transpiração das plantas, deixando o ar mais seco.

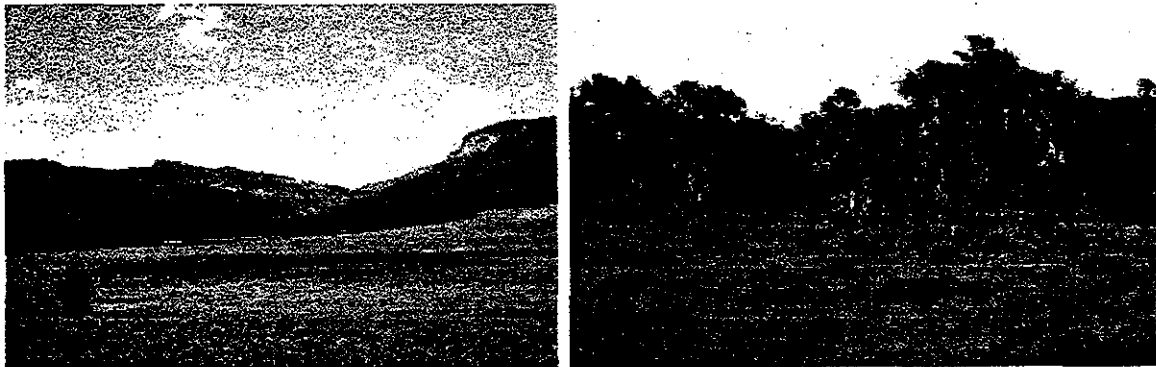


Fig. 3.4 - Campos.

### 3.2.2 DESERTO

Caracterizam-se por chuvas muito escassas. As plantas são esparsas, com muito espaço entre elas. Há adaptações especiais nos vegetais que vivem nos desertos. Muitos vegetais são suculentos, como os cactos que armazenam água. Nessas plantas, é o caule verde que faz fotossíntese, enquanto as folhas são transformadas em espinhos, o que reduz a área transpirante.

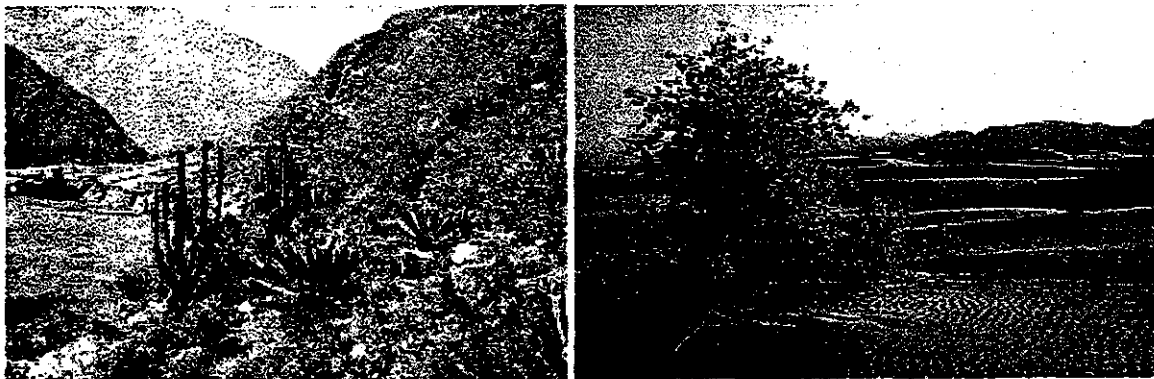


Fig. 3.5 - Desertos.

### 3.2.3 TUNDRA

São características do hemisfério norte, ocorrendo em altas latitudes (acima de  $60^\circ$ ). As temperaturas são muito baixas (abaixo de  $-5^\circ\text{C}$ ). A precipitação é pequena (ao redor de 25 cm anuais) e, normalmente, em forma de neve. A vegetação se desenvolve apenas durante 2 a 3 meses por ano, pois os solos permanecem congelados a maior parte do tempo. As plantas que conseguem sobreviver são de pequeno porte: sobretudo gramíneas, alguns poucos arbustos, grandes camadas de líquens e musgos sobre as rochas.

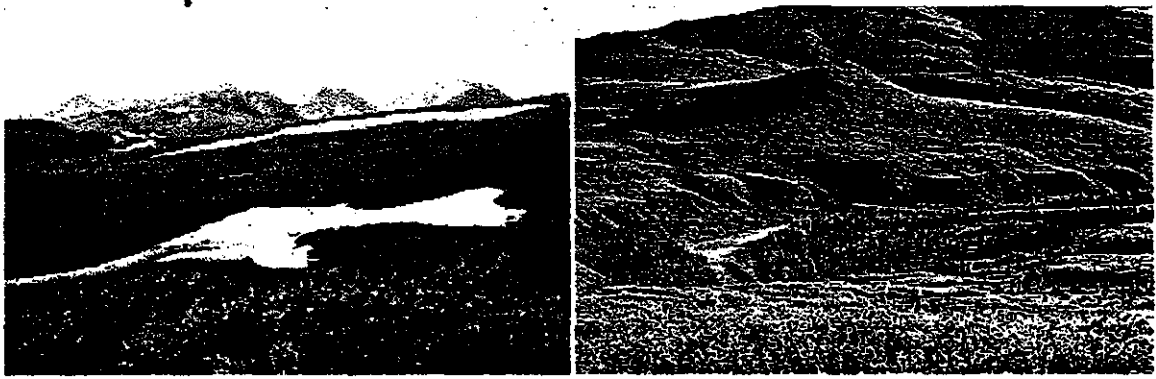


Fig. 3.6 - Tundra.

### 3.2.4 FLORESTA TROPICAL

Trata-se de uma floresta densa, composta por muitas espécies, e “sempre verde”, isto é, suas folhas não caem. As florestas tropicais ocorrem em regiões da faixa equatorial sujeitas a chuvas abundantes e altas temperaturas. Na vertical, podemos dividir a floresta em camadas, pois existe uma nítida estratificação. As camadas são também chamadas de estratos. Na camada superior (entre 30 e 40 m acima do solo), fica a copa das árvores mais altas. Abaixo dela, encontra-se uma camada contendo a copa das árvores menores (entre 5 e 30 m). Essa camada pode ser subdividida em duas ou mais subcamadas. Finalmente, encontramos a camada de arbustos (cerca de 5 m de altura). Próximo à superfície do solo, há pouca vegetação, devido à escassa quantidade de luz que consegue atravessar a densa folhagem e chegar ao solo.

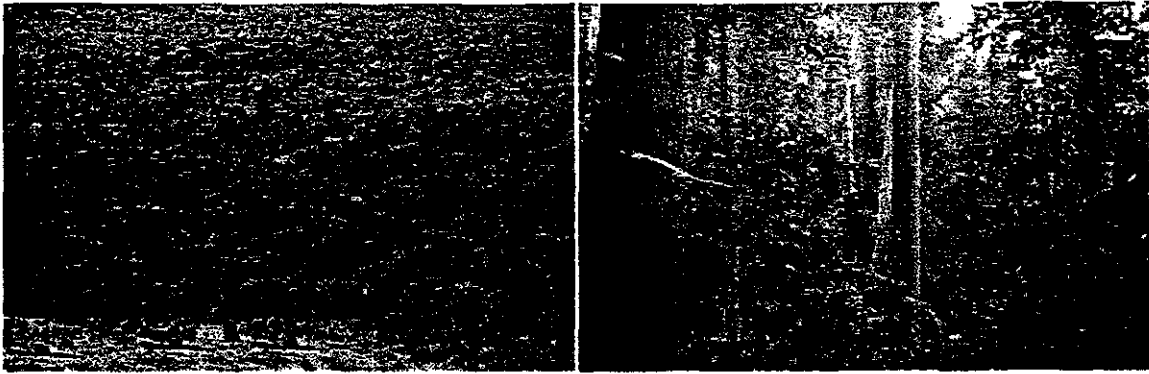


Fig. 3.7 – Floresta Tropical.

### 3.2.5 FLORESTA TEMPERADA

Trata-se de florestas típicas do hemisfério norte, ocorrendo em latitudes médias (30 a 60°). Ao contrário das florestas tropicais, que são “sempre verdes”, as árvores da floresta temperada perdem as suas folhas no outono. São ditas, por isso, caducifólias. As chuvas são menos abundantes que as da faixa equatorial, mas continuam relativamente altas. As temperaturas são amenas. Nessas florestas são encontrados, comumente, faias, nogueiras e carvalhos. A diversidade das espécies é grande, mas menor que a da floresta tropical.

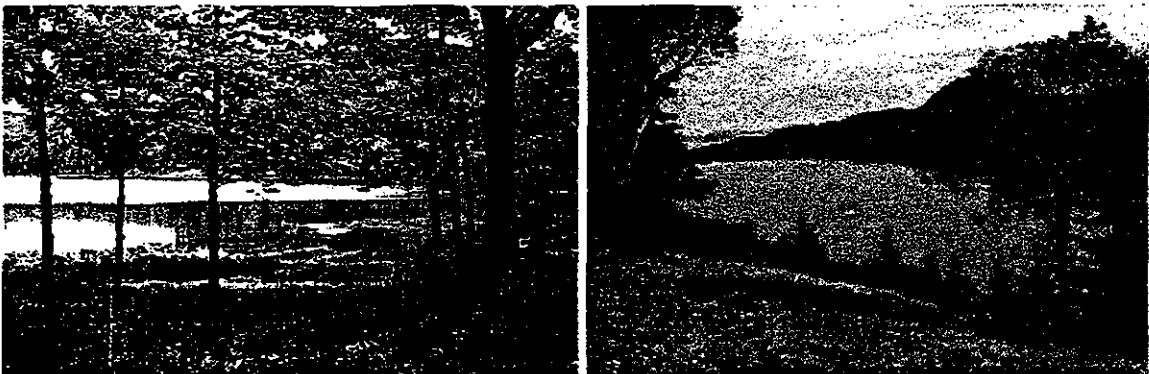


Fig. 3.8 – Floresta Temperada.

### 3.2.6 FLORESTA DE CONÍFERAS

Também chamada de taiga (nome russo para designar a floresta de coníferas da Sibéria), trata-se de florestas de pinheiros. Ocorrem entre as latitudes médias e as altas. As

temperaturas são baixas e as chuvas, menos abundantes que as da floresta temperada. As florestas são “sempre verdes” e possuem adaptações para a vida em ambiente de inverno longo e com a presença de neve. As folhas das árvores têm a forma de agulhas, o que é uma adaptação para reduzir a transpiração. Existe pouca vegetação rasteira, pois pouca luz chega ao solo. As florestas de coníferas possuem pouca variedade de espécies.



Fig. 3.9 – Floresta de Coníferas.

### 3.3 A INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA NA VEGETAÇÃO

O corpo de uma planta terrestre típica é composto de três partes familiares e fundamentais. Essas partes também chamadas de órgãos vegetativos são: raiz, caule e folha. A raiz das plantas é responsável pela retirada de água e nutrientes do solo. Quando adubamos o solo, estamos repondo os nutrientes que as plantas necessitam para o seu desenvolvimento. A água e nutrientes absorvidos compõem a seiva bruta. Essa seiva bruta é transportada, da raiz para as folhas pelo xilema (conjunto de vasos encontrados no caule da planta).

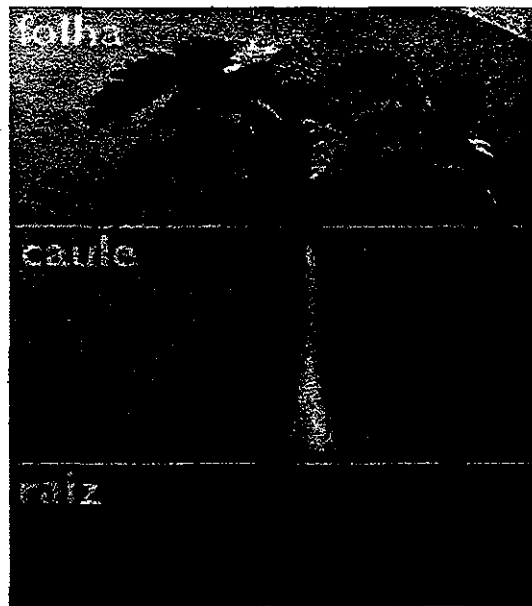


Fig. 3.10 – Composição da planta.

Nas folhas, ocorre a fotossíntese, que é um processo de produção de glicose e oxigênio. A glicose produzida compõe a seiva elaborada conhecida como alimento da planta. A seiva elaborada é transportada, das folhas para a raiz, por um conjunto de vasos chamados de floema. Durante a descida, o floema fornece alimento aos demais órgãos, principalmente aos que não realizam fotossíntese, como as raízes.

Note que a respiração ocorre em todos os órgãos da planta. A respiração é um processo que consome glicose e oxigênio, e produção de gás carbônico, água e energia. Essa energia é utilizada pela planta para realizar as suas funções vitais.

Uma folha de forma simplificada é constituída de epiderme, estômatos, parênquima e nervuras. As paredes da epiderme da folha não perdem água, mas essa parede possui buracos, chamados de estômatos. É através dos estômatos que a folha realiza as trocas de gasosas.



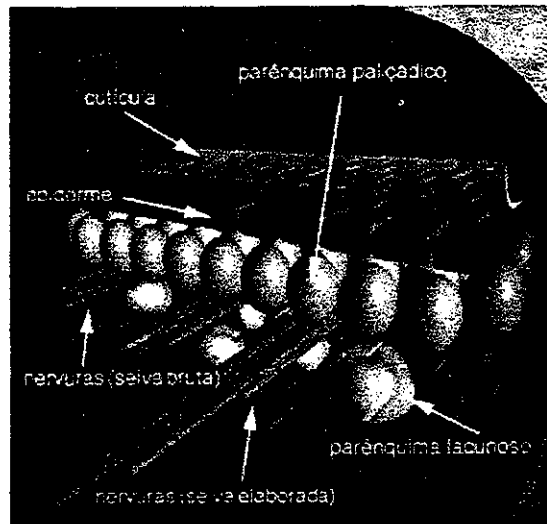


Fig. 3.11 – Constituição da folha.

O estômato é formado por duas células em forma de rim, denominadas células-guarda, com uma abertura entre elas, chamada de ostíolo. As células-guarda controlam a abertura estomática: quando as células-guarda estão inchadas devido à absorção de água, o ostíolo fica aberto; quando estão murchas, o ostíolo se fecha.



Fig. 3.12 - Estômato.

### 3.4 VEGETAÇÃO BRASILEIRA

Estima-se que 10% das espécies vegetais do planeta vivam nas paisagens brasileiras, mas essa vegetação vêm sendo consumidas por desmatamento, queimadas e poluição.



Fig. 3.13 – Mapa de vegetação no Brasil.:

#### 3.4.1 FLORESTA AMAZÔNICA

A Floresta Amazônica é uma típica floresta tropical, com grande diversidade de espécies vegetais e animais. Ela é um gigante tropical que ocupa 5,5 milhões de km<sup>2</sup> dos quais 60% estão em território brasileiro; o restante se reparte entre as duas Guianas, Suriname, Venezuela, Colômbia, Equador, Peru e Bolívia.

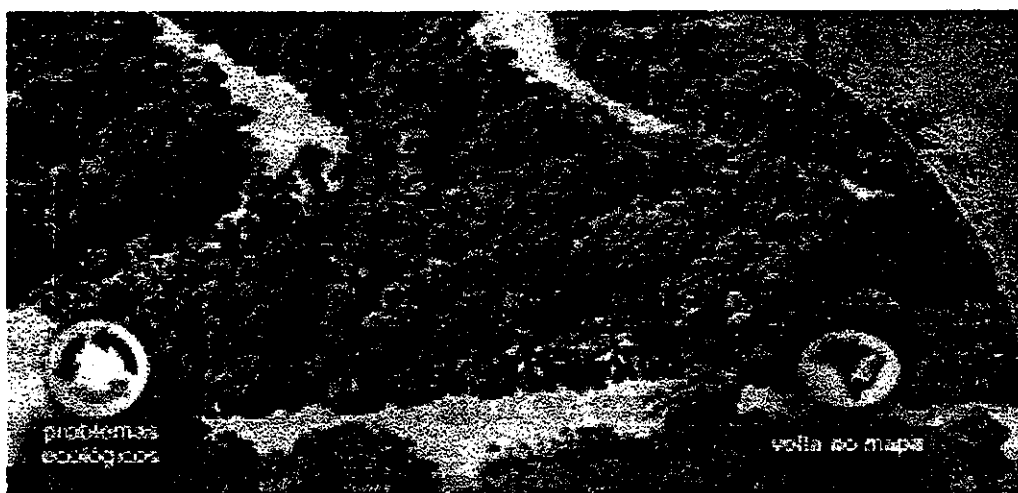


Fig. 3.14 – Floresta Amazônica.

Em geral, a vegetação amazônica é higrófila, ou seja, adaptada à vida em condições de excesso de água. As adaptações que tais plantas apresentam são: ramos e folhas com os ápices voltados para baixo, folhas em goteira e ceras que revestem a superfície foliar. Todas essas características permitem que o excesso de água goteje para baixo com facilidade, evitando assim a obstrução dos estômatos.

Na Floresta Amazônica vivem e se reproduzem mais de um terço das espécies existentes no planeta. Além de 2.500 espécies de árvores (um terço da madeira tropical do mundo), a Amazônia também abriga água, muita água. O Rio Amazonas - a maior bacia hidrográfica do mundo, que cobre uma extensão aproximada de 6 milhões de km<sup>2</sup> - corta a região para desaguar no Oceano Atlântico, lançando no mar, a cada segundo, cerca de 175 milhões de litros de água. Esse número corresponde a 20% da vazão conjunta de todos os rios da terra. E são nessas águas que se encontra o maior peixe de água doce do mundo: o pirarucu, que atinge até 2,5 m.

Todos os números que envolvem indicadores desse bioma são enormes. Uma boa idéia da exuberância da floresta está na fauna local. Das 100 mil espécies de plantas que ocorrem em toda a América Latina, 30 mil estão na Amazônia. A diversidade em espécies vegetais se repete na fauna da região. Os insetos, por exemplo, estão presentes em todos os estratos da floresta. Os animais rastejadores, os anfíbios e aqueles com capacidade para subir em locais íngremes, como o esquilo, exploram os níveis baixos e médios. Os locais mais altos são explorados por beija-flores, araras, papagaios e periquitos à procura de frutas, brotos e castanhas. Os tucanos, voadores de curta distância, exploram as árvores altas. O nível intermediário é habitado por jacus, gaviões, corujas e centenas de pequenas aves. No extrato terrestre estão os jabutis, cutias, pacas, antas *etc.* Os mamíferos aproveitam a produtividade sazonal dos alimentos, como os frutos caídos das árvores. Esses animais, por sua vez, servem de alimentos para grandes felinos e cobras de grande porte.

A maior parte dos solos da Floresta Amazônica é pobre em nutrientes. Pode parecer contraditório que uma floresta tão rica possa sobreviver sobre um solo pobre. Isso se

explica pelo fato de ocorrer um ciclo fechado de nutrientes. Quase todos os minerais estão acumulados no vegetal. Quando os órgãos da planta morrem, são decompostos, e os nutrientes são reabsorvidos pelas raízes. Portanto, a floresta vive do seu próprio material orgânico. Se a água das chuvas caísse diretamente sobre o solo, tenderia a lavá-lo, retirando os sais minerais. Na floresta, porém, a queda das gotas é amortecida pela densa folhagem, o que reduz a perda de nutrientes. Portanto, o desmatamento, que reduz a folhagem da floresta, pode levar ao empobrecimento da terra. Isso mostra uma das fragilidades do ecossistema.

Atualmente, sabe-se que a Floresta Amazônica é um ecossistema frágil. A menor imprudência pode causar danos irreversíveis ao seu delicado equilíbrio ecológico.

### 3.4.2 MATA ATLÂNTICA

A Mata Atlântica é uma das florestas tropicais mais ameaçadas do mundo. Hoje, está reduzida a apenas 7% de sua área original. Mais de 70% da população brasileira vivem na região da Mata Atlântica.



Fig. 3.15 – Mata Atlântica.

A Mata Atlântica também é uma floresta tropical típica, e muitas das características da Floresta Amazônica são válidas para ela. A diferença mais marcante é a topografia, que, no caso da Mata Atlântica, é mais íngreme e variável.

Na época do descobrimento do Brasil, a Mata Atlântica tinha uma área equivalente a um terço da Amazônia. Cobria 1 milhão de km<sup>2</sup>, ou 12% do território nacional, estendendo-se do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul. Apesar da devastação sofrida, a riqueza das espécies animais e vegetais que ainda se abrigam na Mata Atlântica é espantosa. Em alguns trechos remanescentes de floresta os níveis de biodiversidade são considerados os maiores do planeta. Em contraste com essa exuberância, as estatísticas indicam que mais de 70% da população brasileira vive na região da Mata Atlântica.

Além de abrigar a maioria das cidades e regiões metropolitanas do país, a área original da floresta sedia também os grandes pólos industriais, petroleiros e portuários do Brasil, respondendo por nada menos de 80% do PIB (Produto Interno Bruto) nacional.

A Mata Atlântica abrange as bacias dos rios Paraná, Uruguai, Paraíba do Sul, Doce, Jequitinhonha e São Francisco. Espécies imponentes de árvores são encontradas na região, como o jequitibá-rosa, de 40 m de altura e 4 m de diâmetro. Também destacam-se nesse cenário várias outras espécies: o pinheiro-do-paraná, o cedro, as figueiras, os ipês, a braúna e o pau-brasil, entre muitas outras.

A região onde ocorre uma grande população do pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) é chamada de Matas de Araucárias. Nessa região, existem estações bastante delimitadas: verões razoavelmente quentes e invernos bastante frios. As precipitações são regulares. A copas das árvores não forma uma camada contínua, como ocorre na Floresta Amazônica. Por serem mais abertas, são menos úmidas que as florestas tropicais. Os pinheiros podem ter troncos com 1 m de diâmetro e atingem 25 a 30 m de altura. Só se vêem ramificações no topo da árvore, o que lhe dá um aspecto de guarda-sol. Os ramos mais baixos, que ficam na sombra, são eliminados, pois a

araucária é uma planta de sol (heliófila). Na Mata das Araucárias também aparece o mate, usado para infusões.

### 3.4.3 MATA COSTEIRA

O Brasil possui uma linha contínua de costa Atlântica de 8.000 km de extensão, uma das maiores do mundo. Ao longo dessa faixa litorânea é possível identificar uma grande diversidade de paisagens como dunas, ilhas, recifes, costões rochosos, baías, estuários, brejos e falésias.



Fig. 3.16 – Mata Costeira.

Ao longo da costa brasileira, as praias, restingas, lagunas e manguezais apresentam diferentes espécies animais e vegetais. Isso se deve, basicamente, às diferenças climáticas e geológicas. Grande parte da zona costeira, entretanto, está ameaçada pela superpopulação e por atividades agrícolas e industriais. É aí, seguindo essa imensa faixa litorânea, que vive mais da metade da população brasileira.

O litoral amazônico, que vai da foz do Rio Oiapoque ao Rio Parnaíba, é lamacento e tem, em alguns trechos, mais de 100 km de largura. Apresenta grande extensão de manguezais, assim como matas de várzeas de marés. Jacarés, guarás e muitas espécies de aves e crustáceos são alguns dos animais que vivem nesse trecho da costa.

O litoral nordestino começa na foz do Rio Parnaíba e vai até o Recôncavo Baiano. É marcado por recifes calcáreos e arenitos, além de dunas que, quando perdem a cobertura vegetal que as fixa, movem-se com a ação do vento. Há ainda nessa área manguezais, restingas e matas. Nas águas do litoral nordestino vivem o peixe-boi marinho e tartarugas (ambos ameaçados de extinção).

O litoral sudeste segue do Recôncavo Baiano até São Paulo. É a área mais densamente povoada e industrializada do país. Suas áreas características são as falésias, recifes, arenitos e praias de areias monazíticas (mineral de cor marrom escura). É dominado pela Serra do Mar e tem a costa muito recortada com várias baías e pequenas enseadas. O ecossistema mais importante dessa área são as matas de restingas. Essa parte do litoral é habitada pela preguiça-de-coleira e pelo mico-sauá (espécies ameaçadas de extinção).

O litoral sul começa no Paraná e termina no Arroio Chuí, no Rio Grande do Sul. Cheio de banhados e manguezais, o ecossistema da região é riquíssimo em aves, mas há também outras espécies: ratão-do-banhado, lontras (também ameaçados de extinção), capivaras *etc.*

#### 3.4.4 CAATINGA

A Caatinga distribui-se pelos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia, sul-leste do Piauí e norte de Minas Gerais.



Fig. 3.17 - Caatinga.

A palavra Caatinga vem do tupi, e significa “mata branca”. A vegetação se caracteriza por ter folhas apenas nos 3 ou 4 meses da estação das chuvas. O resto do tempo as plantas ficam sem as folhas (vegetação caducifolia), e seu aspecto é claro, o que explica o nome “mata branca”. As temperaturas são elevadas e é baixa a umidade relativa do ar. As precipitações são relativamente baixas, podendo ocorrer de maneira bastante irregular. A estação da seca é superior a sete meses por ano. Os rios normalmente secam no verão, exceto o São Francisco, que é perene.

Os cerca de 20 milhões de brasileiros que vivem nos 800 mil km<sup>2</sup> de Caatinga nem sempre podem contar com as chuvas de verão. Quando não chove, o homem do sertão e sua família sofrem muito. Precisam caminhar quilômetros em busca da água dos açudes. A irregularidade climática é um dos fatores que mais interferem na vida do sertanejo. Mesmo quando chove, o solo raso e pedregoso não consegue armazenar a água que cai e a temperatura elevada (médias entre 25oC e 29oC) provoca intensa evaporação. Por isso, somente em algumas áreas próximas às serras, onde a abundância de chuvas é maior, a agricultura torna-se possível.

Na longa estiagem, os sertões são, muitas vezes, semi-desertos nublados mas sem chuva. O vento seco e quente não refresca, incomoda. As plantas da Caatinga apresentam várias adaptações que permitem a sobrevivência na estação seca. As folhas são muitas vezes reduzidas, como nas cactáceas, nas quais se transformam em espinhos.



O mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos é bem rápido. A queda das folhas na estação seca representa também um modo de reduzir a área exposta à transpiração. Algumas plantas possuem ter raízes praticamente na superfície do solo para absorver o máximo da chuva. As espécies mais comuns da região são, entre outras, a amburana, aroeira, umbu, baraúna, maniçoba, macambira, mandacaru e o juazeiro.

A Caatinga é coberta por solos relativamente férteis. Embora não tenha potencial madeireiro, exceto pela extração secular de lenha, a região é rica em recursos genéticos dada a sua alta biodiversidade. Por outro lado, o aspecto agressivo da vegetação contrasta com o colorido diversificado das flores emergentes no período das chuvas.

A Caatinga apresenta três estratos: arbóreos (8 a 12 metros), arbustivo (2 a 5 metros) e o herbáceo (abaixo de 2 metros). Contraditoriamente, a flora dos sertões, constituída por espécies com longa história de adaptação ao calor e à secura, é incapaz de reestruturar-se naturalmente se máquinas forem usadas para alterar o solo. A degradação é, portanto, irreversível na Caatinga.

#### 3.4.5 CERRADO

Os viajantes que desbravaram o interior do Brasil há décadas atravessaram extensas áreas cobertas por um tapete de gramíneas com arbustos e pequenas árvores retorcidas, era o Cerrado.



Fig. 3.18 - Cerrado.

A primeira impressão que se tem do cerrado é de uma vegetação seca, marcada por queimadas. Mas, de perto, ele apresentava toda a sua beleza de flores exóticas e plantas medicinais desconhecidas da medicina tradicional como arnica, catuaba, jurubeba, sucupira e angico. Soma-se a isso uma grande variedade de animais. O equilíbrio desse sistema, cuja biodiversidade pode ser comparada à Amazônica, é de fundamental importância para a estabilidade dos demais ecossistemas brasileiros.

O Cerrado é a segunda maior formação vegetal brasileira, superado apenas pela floresta Amazônica. São 2 milhões de km<sup>2</sup> espalhados por 10 Estados. O Cerrado é um campo tropical na qual a vegetação herbácea coexiste com mais de 420 espécies de árvores e arbustos esparsos. A estação seca é bem pronunciada, podendo durar de 5 a 7 meses. Os rios não secam, porém a sua vazão diminui.

A vegetação do Cerrado tem aspectos que costumam ser interpretados como adaptações a ambientes secos (xeromorfismo). Assim, árvores e arbustos têm galhos tortuosos, folhas endurecidas, casca grossa; as superfícies das folhas são muitas vezes brilhantes, outras vezes recobertas por pêlos. Outras plantas, contraditoriamente, têm características de lugares úmidos: folhas largas, produção de flores e brotos em plena estação seca.

A água não é o fator limitante do Cerrado. Descobriu-se que o solo, mesmo na estação seca, contém uma quantidade apreciável de água, a partir dos 2 metros de profundidade.

As raízes de muitas espécies aprofundam-se muito, o que permite a abertura dos estômatos durante o dia todo.

Portanto, atualmente, acredita-se que as plantas do Cerrado apresentam um falso xeromorfismo (o que é chamado de pseudoxeromorfismo). O aspecto da vegetação não é devido à falta d'água, mas sim devido à escassez de nutrientes do solo. Essa deficiência dificulta muito a produção de proteínas nas plantas, e o excesso de carboidratos se acumula em estruturas que dão às plantas o aspecto xeromórfico: súber espesso, cutículas grossas e excessivo esclerênquima (tecido de sustentação com células de paredes reforçadas). Diz-se, então, que a vegetação apresenta um escleromorfismo oligotrófico ou, em outras palavras, “um aspecto muito duro devido à falta de nutrição”.

O Cerrado tem a seu favor o fato de ser cortado por três das maiores bacias hidrográficas da América do Sul (Tocantins, São Francisco e Prata), favorecendo a manutenção de uma biodiversidade surpreendente. Estima-se que a flora da região possua 10 mil espécies de plantas diferentes (muitas delas usadas na produção de cortiça, fibras, óleos, artesanato, além do uso medicinal e alimentício). Isso sem contar as 400 espécies de aves, 67 gêneros de mamíferos e 30 tipos de morcegos catalogados na área. O número de insetos é surpreendente: apenas na área do Distrito Federal, há 90 espécies de cupins, 1.000 espécies de borboletas e 500 tipos diferentes de abelhas e vespas.

#### 3.4.6 PANTANAL

O Pantanal é um dos mais valiosos patrimônios naturais do Brasil. Maior área úmida continental do planeta – com 140 mil km<sup>2</sup> em território brasileiro – destaca-se pela riqueza da fauna, onde dividem espaço 650 espécies de aves, 80 de mamíferos, 260 de peixes e 50 de répteis.



Fig. 3.19 - Pantanal.

As chuvas fortes são comuns no Pantanal. Os terrenos, quase sempre planos, são alagados periodicamente por inúmeros córregos e vazantes entremeados de lagoas e leques aluviais. Ou seja, muita água. Na época das cheias estes corpos comunicam-se e mesclam-se com as águas do Rio Paraguai, renovando e fertilizando a região. Contudo, assim como nos demais ecossistemas brasileiros onde a ocupação predatória vem provocando destruição, a interferência no Pantanal também é sentida. Embora boa parte da região continue inexplorada, muitas ameaças surgem em decorrência do interesse econômico que existe sobre essa área. A situação começou a se agravar nos últimos 20 anos, sobretudo pela introdução de pastagens artificiais e a exploração das áreas de mata.

O equilíbrio desse ecossistema depende, basicamente, do fluxo de entrada e saída de enchentes que, por sua vez, está diretamente ligado à pluviosidade regional. De forma geral, as chuvas ocorrem com maior frequência nas cabeceiras dos rios que desaguam na planície. Com o início do trimestre chuvoso nas regiões altas (a partir de novembro), sobe o nível de água do Rio Paraguai provocando, assim, as enchentes. O mesmo ocorre paralelamente com os afluentes do Paraguai que atravessam o território brasileiro cortando uma extensão de 700 km. As águas vão se espalhando e cobrindo, continuamente, vastas extensões em busca de uma saída natural, que só é encontrada centenas de quilômetros adiante no encontro do Rio com o Oceano Atlântico, fora do território brasileiro. As cheias chegam a cobrir até 2/3 da área pantaneira. A partir de

maio, então, inicia-se a “vazante” e as águas começam a baixar lentamente. Quando o terreno volta a secar permanece, sobre a superfície, uma fina camada de lama húmifera (mistura de areia, restos de animais e vegetais, sementes e húmus) propiciando grande fertilidade ao solo.

A natureza faz repetir, anualmente, o espetáculo das cheias proporcionando ao Pantanal a renovação da fauna e flora local . Esse enorme volume de água, que praticamente cobre a região pantaneira, forma um verdadeiro mar de água doce onde milhares de peixes proliferam. Peixes pequenos servem de alimento a espécies maiores ou a aves e animais.

Quando o período da vazante começa, uma grande quantidade de peixes fica retida em lagoas ou baías, não conseguindo retornar aos rios. Durante meses, aves e animais carnívoros (jacarés, ariranhas etc) têm, portanto, um farto banquete à sua disposição. As águas continuam baixando mais e mais e nas lagoas, agora bem rasas, peixes como o dourado, pacu e traíra podem ser apanhados com as mãos pelos homens. Aves grandes e pequenas são vistas planando sobre as águas, formando um espetáculo de grande beleza.

#### 3.4.7 CAMPO

Os campos também fazem parte da paisagem brasileira. Esse tipo de vegetação é encontrada em dois lugares distintos: os campos de terra firme são característicos do norte da Amazônia, Roraima, Pará e ilhas do Bananal e de Marajó, enquanto os campos limpos são típicos da região sul.

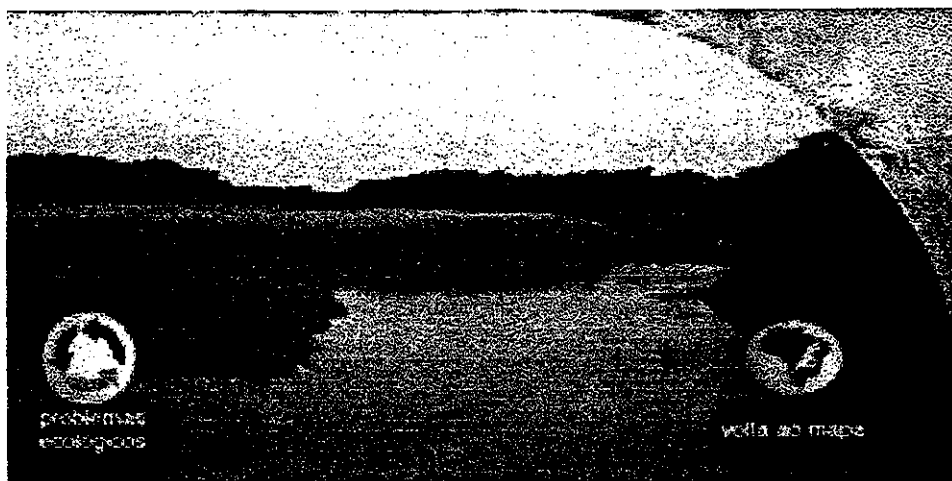


Fig. 3.20 - Campo:

De um modo geral, o campo limpo é destituído de árvores, bastante uniforme e com arbustos espalhados e dispersos. Já nos campos de terra firme as árvores, baixas e espaçadas, se integram totalmente à paisagem. Em ambos os casos o solo é revestido de gramíneas, subarbustos e ervas.

Entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, os campos formados por gramíneas e leguminosas nativas se estendem como um tapete verde por mais de 200.000 km<sup>2</sup>, tornando-se mais densas e ricas nas encostas. Nessa região, com muita mata entremeadada, as chuvas distribuem-se regularmente pelo ano todo e as baixas temperaturas reduzem os níveis de evaporação. Tais condições climáticas acabam favorecendo ao crescimento de árvores. Bem diferentes, entretanto, são os campos que dominam áreas do Norte do país.

O domínio das florestas e dos campos meridionais se estende desde o Rio Grande do Sul até parte dos estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo. O clima é ameno e o solo naturalmente fértil. A junção destes dois fatores favoreceram à colonização acelerada no último século, principalmente por imigrantes europeus e japoneses que alcançaram elevados índices de produtividade na região.

Os campos do Sul ocorrem no chamado “Pampa”, uma região plana de vegetação aberta e de pequeno porte que se estende do Rio Grande do Sul para além das fronteiras com a Argentina e o Uruguai, no interior do estado. Esse tipo de vegetação ocorre em área contínua no Sul e também como manchas dispersas encravadas na floresta Atlântica do Rio Grande do Norte até o Paraná. São áreas planas, revestidas de gramíneas e outras plantas encontradas de forma escassa, como tufos de capim que atingem até um metro de altura.

Descendo ao litoral do Rio Grande do Sul, a paisagem é marcada pelos banhados, isto é, ecossistemas alagados com densa vegetação de juncos, gravatás e aguapés que criam um habitat ideal para uma grande variedade de animais como garças, marrecos, veados, onças-pintadas, lontras e capivaras. O banhado do Taim é o mais importante devido à riqueza do solo. Tentativas extravagantes de drená-lo para uso agrícola foram definitivamente abandonadas a partir de 1979 quando a área transformou-se em estação ecológica. Mesmo assim, a ação de caçadores e o bombeamento das águas pelos fazendeiros das redondezas continuam a ameaçar o local.

Mas enquanto sobra água no Sul, os campos do Norte do Brasil se caracterizam por áreas secas e de florestas dominadas pelas palmeiras. Tais florestas se situam entre a Amazônia e a Caatinga e se formam a partir do desmatamento da vegetação nativa. Livre da competição de outras plantas, as palmeiras de babaçu e carnaúba, o buriti e a oiticica se desenvolvem rapidamente. Algumas chegando a atingir até 15 metros de altura. Existem também áreas de campos “naturais”, com vegetação de porte mais raquítico, que ocorrem como manchas no norte da floresta Amazônica.

### 3.4.8 PROBLEMAS ECOLÓGICOS

#### 3.4.8.1 FLORESTA AMAZÔNICA

Aclamado como o país de maior diversidade biológica do mundo, o Brasil tem sua riqueza natural constantemente ameaçada. Um exemplo dessa situação é o

desmatamento anual da Amazônia, que cresceu 34% de 1992 a 1994. Na região, a atividade agrícola de forma não-sustentável continua e a extração madeireira tende a aumentar na medida em que os estoques da Ásia se esgotam. Relatório elaborado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos, ligada à Presidência da República, indica que 80% da produção madeireira da Amazônia provêm da exploração ilegal. Existem 22 madeireiras estrangeiras conhecidas em operação na região e há pouca fiscalização sobre sua produção e área de exploração. Esses dados refletem o descontrole da região por parte das autoridades. O pior é que o desperdício da madeira gira entre 60% e 70%. Um outro agravante é o fato de o Governo desenvolver megaprojetos de infra-estrutura para a Amazônia que causam degradação ambiental sem trazer benefícios para os habitantes da região.

Embora o Brasil tenha uma das mais modernas legislações ambientais do mundo, ela não tem sido suficiente para bloquear a devastação da floresta. Os problemas mais graves são a insuficiência de pessoal dedicado à fiscalização, as dificuldades em monitorar extensas áreas de difícil acesso, a fraca administração das áreas protegidas e a falta de envolvimento das populações locais. Solucionar essa situação depende da forma pela qual os fatores político, econômico, social e ambiental serão articulados.

Mais de 12% da área original da Floresta Amazônica já foram destruídos devido a políticas governamentais inadequadas, modelos inapropriados de ocupação do solo e à pressão econômica, que levou à ocupação desorganizada e ao uso não-sustentável dos recursos naturais. Muitos imigrantes foram estimulados a se instalar na região, levando com eles métodos agrícolas impróprios para a Amazônia.

A ocupação da região amazônica começou a se intensificar na década de 40 quando o Governo passou a estimular, através de incentivos fiscais, a implantação de projetos agropecuários na área. As queimadas e o desmatamento tornaram-se constantes. Até o final de 1990 mais de 415 mil km<sup>2</sup> tinham sido desmatados. O total da área queimada foi 2,5 vezes maior. Em algumas localidades, como Porto Velho (RO), os aeroportos



chegaram a ser fechados algumas vezes por causa da fumaça das queimadas. Outra forma de destruição tem sido os alagamentos para a implantação de usinas hidrelétricas.

É o caso da Usina de Balbina ao norte de Manaus. A baixíssima relação entre a área alagada e a potência elétrica instalada tornou-se um exemplo de inviabilidade econômica e ecológica em todo o mundo. A atividade mineradora também trouxe graves conseqüências ambientais, como a erosão do solo e a contaminação dos rios com mercúrio.

Uma das medidas tomadas pelo Governo para proteção da floresta foi a moratória de dois anos, a partir de 1996, para concessão de novas autorizações para a exploração de mogno e virola. Como o desmatamento de florestas tropicais representa uma ameaça constante à integridade de centenas de culturas indígenas, tais medidas são de significativa importância. No caso da virola, projetos que priorizem sua conservação ou manejo adequado são fundamentais. A espécie, que chegou a ocupar o segundo lugar em valor na pauta de exportações de madeiras brasileiras, praticamente não é mais explorada comercialmente devido ao esgotamento das florestas nativas do gênero.

#### 3.4.8.2 MATA ATLÂNTICA

Paralelamente à riqueza vegetal, a fauna é o que mais impressiona na região. A maior parte das espécies de animais brasileiros ameaçados de extinção são originários da Mata Atlântica, como os micos-leões, a lontra, a onça-pintada, o tatu-canastra e a arara-azul-pequena. Fora dessa lista, também vivem na área gambás, tamanduás, preguiças, antas, veados, cotias, quatis etc.

Durante 500 anos a Mata Atlântica propiciou lucro fácil ao homem. Madeiras, orquídeas, corantes, papagaios, ouro, produtos agrícolas e muito mais serviram ao enriquecimento de muita gente, além das próprias queimadas que deram lugar a uma agricultura imprudente e insustentável. Por muitos anos, nenhuma restrição foi imposta

à essa fome por dinheiro. A Mata Atlântica é o ecossistema brasileiro que mais sofreu os impactos ambientais dos ciclos econômicos da história do país.

Primeiro, ainda no século XVI, houve a extração predatória do pau-brasil, utilizado para tintura e construção. A segunda grande investida foi o ciclo da cana-de-açúcar. Constatada a fertilidade do solo, extensos trechos de Mata Atlântica foram derrubados para dar lugar aos canaviais. No século XVIII, foram as jazidas de ouro que atraíram para o interior um grande número de portugueses. A imigração levou a novos desmatamentos, que se estenderam até os limites com o Cerrado, para a implantação de agricultura e pecuária. No século seguinte, foi a vez do café, provocando a marcha ao sul do Brasil e, então, chegou a vez da extração da madeira. No Espírito Santo, as matas passaram a ser derrubadas para o fornecimento de matéria-prima para a indústria de papel e celulose. Em São Paulo, a implantação do Pólo Petroquímico de Cubatão tornou-se conhecida internacionalmente como exemplo de poluição urbana.

Esse processo desorientado de desenvolvimento ameaça inúmeras espécies, algumas quase extintas como o mico-leão-dourado, a onça pintada e a jaguatirica.

#### 3.4.8.3 MATA COSTEIRA

Há muito ainda para se conhecer sobre a dinâmica ecológica do litoral brasileiro. Complexos sistemas costeiros distribuem-se ao longo do litoral, fornecendo áreas para a criação, crescimento e reprodução de inúmeras espécies de flora e fauna. Somente na costa do Rio Grande do Sul - conhecida como um centro de aves migratórias - foram registradas, aproximadamente, 570 espécies.

Muitos desses pássaros utilizam a costa brasileira para alimentação, abrigo ou como rota migratória entre a América do Norte e as partes mais ao sul do Continente. A faixa litorânea brasileira também tem sido considerada essencial para a conservação de espécies ameaçadas em escala global, como as tartarugas marinhas, as baleias e o peixe-boi-marinho. É importante ressaltar que a destruição dos ecossistemas litorâneos é uma

ameaça para o próprio homem, uma vez que põe em risco a produção pesqueira - uma rica fonte de alimento.

A integridade ecológica da costa brasileira é pressionada pelo crescimento dos grandes centros urbanos, pela especulação imobiliária sem planejamento, pela poluição e pelo enorme fluxo de turistas. A ocupação predatória vem ocasionando a devastação das vegetações nativas, o que leva, entre outras coisas, à movimentação de dunas e até ao desabamento de morros.

O aterro dos manguezais, por exemplo, coloca em perigo espécies animais e vegetais, além de destruir um importante “filtro” das impurezas lançadas na água. As raízes parcialmente submersas das árvores do mangue espalham-se sob a água para reter sedimentos e evitar que eles escoem para o mar. Alguns mangues estão estrategicamente situados entre a terra e o mar, formando um estuário para a reprodução de peixes. Já a expulsão das populações caiçaras (pescador ou o caipira do litoral) está acabando com uma das culturas mais tradicionais e ricas do Brasil. Outra ação danosa é o lançamento de esgoto no mar, sem qualquer tratamento. Operações de terminais marítimos têm provocado o derramamento de petróleo, entre outros problemas graves.

#### 3.4.8.4 CAATINGA

O homem complicou ainda mais a dura vida no sertão. Fazendas de criação de gado começaram a ocupar o cenário na época do Brasil colônia. Os primeiros a chegar pouco entendiam a fragilidade da Caatinga, cuja aparência árida denuncia uma falsa solidez. Para combater a seca foram construídos açudes para abastecer de água os homens, seus animais e suas lavouras. Desde o Império, quando essas obras tiveram início, o governo prossegue com o trabalho.

Os grandes açudes atraíram fazendas de criação de gado. Em regiões como o vale do São Francisco, a irrigação foi incentivada sem o uso de técnica apropriada e o resultado tem sido desastroso. A salinização do solo é, hoje, uma realidade. Especialmente na

região, onde os solos são rasos e a evaporação da água ocorre rapidamente devido ao calor. A agricultura nessas áreas tornou-se impraticável.

Outro problema é a contaminação das águas por agrotóxicos. Depois de aplicado nas lavouras, o agrotóxico escorre das folhas para o solo, levado pela irrigação, e daí para as represas, matando os peixes. Nos últimos 15 anos, 40 mil km<sup>2</sup> de Caatinga se transformaram em deserto devido a interferência do homem sobre o meio ambiente da região. As siderúrgicas e olarias também são responsáveis por este processo, devido ao corte da vegetação nativa para produção de lenha e carvão vegetal.

O sertão nordestino é uma das regiões semi-áridas mais povoadas do mundo. A diferença entre a Caatinga e áreas com as mesmas características em outros países é que as populações se concentram onde existe água, promovendo um controle rigoroso da natalidade. No Brasil, entretanto, o homem está presente em toda a parte, tentando garantir a sua sobrevivência na luta contra o clima.

#### 3.4.8.5 CERRADOS

Depois da Mata Atlântica, o Cerrado é o ecossistema brasileiro que mais alterações sofreu com a ocupação humana. Um dos impactos ambientais mais graves na região foram causados pelos garimpos, que contaminaram os rios com mercúrio e provocaram o assoreamento dos cursos de água. A erosão causada pela atividade mineradora tem sido tão intensa que, em alguns casos, chegou até mesmo a impossibilitar a própria extração do ouro rio abaixo. Nos últimos anos, contudo, a expansão da agricultura e da pecuária representa o maior fator de risco para o Cerrado. A partir de 1950 tratores começaram a ocupar sem restrições os habitats dos animais.

O uso de técnicas de aproveitamento intensivo dos solos tem provocado, desde então, o esgotamento de seus recursos. A utilização indiscriminada de agrotóxicos e fertilizantes tem contaminado também os solos e as águas. A expansão agropecuária foi o fator fundamental para a ocupação do Cerrado em grande escala.

O problema do Cerrado não se resume apenas ao reduzido número de áreas de conservação, à caça ilegal ou ao comércio ilícito de peles, que já seriam questões suficientes para preocupação. O problema maior tem raízes nas políticas agrícola e de mineração impróprias e no crescimento da população. Historicamente, a expansão agropastoril e o extrativismo mineral no Cerrado têm se caracterizado por um modelo predatório.

A ocupação da região é desejável, mas desde que aconteça racionalmente. Até o momento, o desenvolvimento da agricultura tem trazido graves consequências para a natureza. Um dos mais sérios problemas decorre do uso de técnicas falhas que deixam o solo desprotegido durante épocas de chuvas torrenciais. Paralelamente, cresce o aparecimento de novas pragas e doenças nas monoculturas estabelecidas. A fauna encontrada na região também recebe pouca atenção no que concerne à sua conservação e proteção. O resultado é que o Cerrado está acabando: metade da sua área já foi desmatada e se esse ritmo continuar até o ano 2000, o desmatamento vai chegar a 70%. Esta situação está causando a fragmentação de áreas e comprometendo seriamente os processos que mantêm a sua biodiversidade.

#### 3.4.8.6 PANTANAL

O Pantanal tem passado por transformações lentas mas significativas nas últimas décadas. O avanço das populações e o crescimento das cidades são uma ameaça constante. A ocupação desordenada das regiões mais altas, onde nasce a maioria dos rios, é o risco mais grave. A agricultura indiscriminada está provocando a erosão do solo, além de contaminá-lo com o uso excessivo de agrotóxicos. O resultado da destruição do solo é o assoreamento dos rios (bloqueio por terra), fenômeno que tem mudado a vida no Pantanal. Regiões que antes ficavam alagadas nas cheias e completamente secas quando as chuvas paravam, agora ficam permanentemente sob as águas. Também impactaram o Pantanal nos últimos anos o garimpo, a construção de hidrelétricas, o turismo desorganizado e a caça, empreendida principalmente por ex-

peões que, sem trabalho, passaram a integrar verdadeiras quadrilhas de caçadores de couro.

Porém, foi de 1989 para cá que o risco de um desequilíbrio total do ecossistema pantaneiro ficou mais próximo de se tornar uma triste realidade. A razão dessa ameaça é o megaprojeto de construção de uma hidrovía de mais de 3.400 km nos rios Paraguai (o principal curso de água do Pantanal) e Paraná - ligando Cáceres no Mato Grosso a Nova Palmira no Uruguai. A idéia é alterar, com a construção de diques e trabalhos de dragagem, o percurso do Rio Paraguai, facilitando o movimento de grandes barcos e, conseqüentemente, o escoamento da produção de soja brasileira até o país vizinho. O problema é que isso afetará também todo o escoamento de águas da bacia. O resultado desse projeto pode ser a destruição do refúgio onde vivem hoje milhares de espécies de animais e plantas.

¶

#### 3.4.8.7 CAMPOS

Devido à riqueza do solo, as áreas cultivadas do Sul se expandiram rapidamente sem um sistema adequado de preparo, resultando em erosão e outros problemas que se agravam progressivamente. Os campos são amplamente utilizados para a produção de arroz, milho, trigo e soja, às vezes em associação com a criação de gado. A desatenção com o solo, entretanto, leva à desertificação, registrada em diferentes áreas do Rio Grande do Sul.

Para expandir a área plantada, colonos alemães e italianos iniciaram, na primeira metade do século, a exploração indiscriminada de madeira. Árvores gigantescas e centenárias foram derrubadas e queimadas para dar lugar ao cultivo de milho, trigo e videira, principalmente. A Mata das Araucárias ou pinheiros-do-paraná, de porte alto e copa em forma de guarda-sol, estendia-se do sul de Minas Gerais e São Paulo até o Rio Grande do Sul, formando cerca de 100.000 km<sup>2</sup> de matas de pinhais. Na sua sombra cresciam espécies como a imbuia, o cedro, a canela, entre outras.

Hoje mais da metade desse bioma foi destruído, assim como diversas espécies de roedores que se alimentavam do pinhão, aves e insetos. O que resta está confinado a áreas de conservação do estado. Por mais de 100 anos a mata dos pinhais alimentou a indústria madeireira do sul. O pinho, madeira bastante popular na região, foi muito usado na construção de casas e móveis.

A criação de gado e ovelhas também faz parte da cultura local. Porém, repetindo o mesmo erro dos agricultores, o pastoreiro está provocando a degradação do solo. Na época de estiagem, quando as pastagens secam, o mesmo número de animais continua a disputar áreas menores. Com o pasto quase desnudo, cresce a pressão sobre o solo que se abre em veios. Quando as chuvas recomeçam, as águas correm por essas depressões dando início ao processo de erosão. O fogo utilizado para eliminar restos de pastagem secas, torna o solo ainda mais frágil.

#### **4. CLIMA URBANO**

##### **4.1 LINHA DO TEMPO**

Após a 2ª Guerra Mundial, ocorreu um crescimento das áreas metropolitanas e o aumento da industrialização. A partir daí, intensificaram-se os estudos sobre clima urbano, tornando evidente a contaminação da atmosfera das cidades.

Em 1937, foi publicada a primeira obra com o título de "O Clima da Cidade". Após os pioneiros estudos realizados em Londres, várias pesquisas foram empreendidas, principalmente em climas temperados.

Em 1927, em Viena, foram obtidos dados que serviram de base para a confecção de um mapa urbano de temperaturas.

Em 1818, o químico Howard, em seu livro sobre clima em Londres, descreve a contaminação do ar e a ocorrência de temperaturas mais elevadas na cidade do que nos arredores.

Em 1787, já se falava do odor da cidade de Munique e sobre as condições de poluição do ar.

Os primeiros estudos sobre clima urbano foram realizados em Londres. Em 1661, constatou-se que a poluição produzida pela queima de carvão provocava alterações na temperatura da cidade. Após a Revolução Industrial foram constatadas modificações do clima, devido à urbanização e à concentração de poluentes

A percepção das diferenças térmicas entre cidade e área rural já vem desde a época dos romanos.

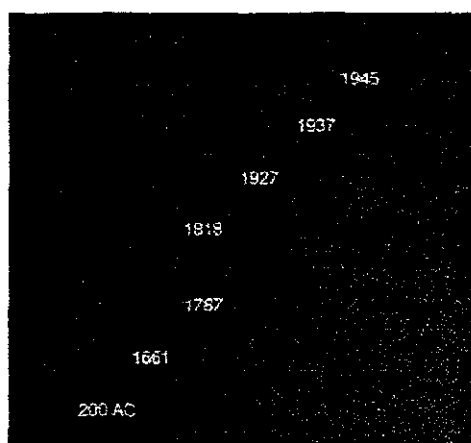


Fig. 4.1 – Datas importantes no estudo de Clima Urbano.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DO CLIMA URBANO

A cidade é um grande modificador do clima. A camada de ar mais próxima ao solo é mais aquecida nas cidades do que nas áreas rurais. A atividade humana, o grande número de veículos, indústrias, prédios, o asfalto das ruas e a diminuição das áreas



verdes criam mudanças muito profundas na atmosfera local, modificando também a temperatura e as chuvas da região.



Fig. 4.2 – Efeito da urbanização descontrolada.

A cidade tem formas complexas como prédios e ruas, que alteram tanto a quantidade de calor absorvido pela região como a direção e a velocidade dos ventos.

O aumento do calor na cidade modifica a circulação dos ventos, a umidade e até as chuvas. Materiais impermeáveis como asfalto e concreto fazem a água da chuva evaporar do solo rapidamente, reduzindo o resfriamento. As partículas lançadas na atmosfera pelos carros e indústrias propiciam o aumento da quantidade de nuvens e conseqüentemente de chuvas.

As cidades apresentam um alto índice de impermeabilização do solo, ou seja, a água das chuvas não penetra no solo devido ao asfalto e ao concreto das ruas.

### 4.3 ILHA DE CALOR

A substituição dos materiais naturais pelos urbanos provoca mudanças nas características da atmosfera local. Por isso podemos observar o aumento de temperatura nos grandes centros, fenômeno chamado de ilha de calor. Ilha de calor é uma anomalia térmica, onde o ar da cidade se torna mais quente que o das regiões vizinhas. Os efeitos

da ilha de calor são um bom exemplo das modificações causadas pelo homem na atmosfera. Podemos observar que a ilha de calor costuma atingir maiores temperaturas está limpo e claro e o vento calmo.

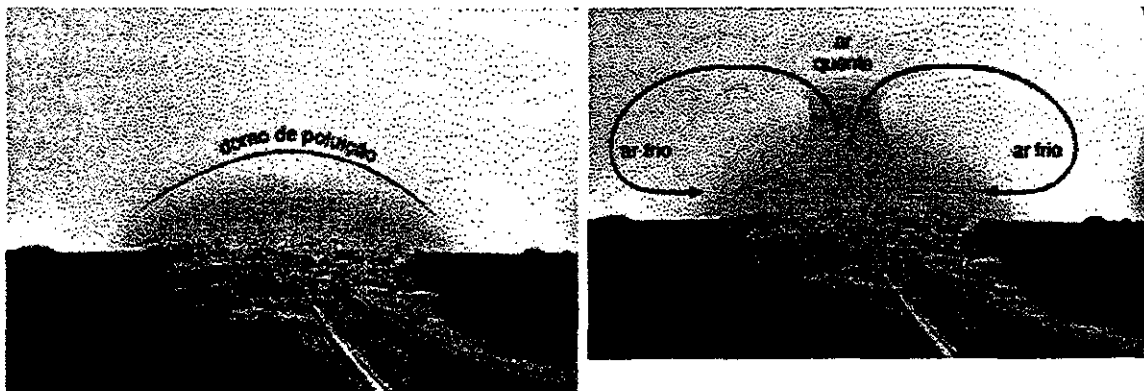


Fig. 4.3 – Efeitos da Ilha de Calor.:

Existem várias causas para a formação de ilha de calor nas cidades:

- Efeito, que é o aquecimento da camada de ar mais próxima ao solo, devido à grande quantidade de poluentes na atmosfera, principalmente o bióxido de carbono;
- A utilização de condicionadores de ar e refrigeradores, e a fumaça dos automóveis e das indústrias provocam aumento do calor na área urbana;
- A grande concentração de edifícios, que impede a chegada de energia solar na Superfície;
- Em função das propriedades térmicas dos materiais urbanos, o calor é rapidamente absorvido durante o dia, mas, facilmente liberado durante a noite, gerando uma grande amplitude térmica;
- A retirada da vegetação e a diminuição de superfícies líquidas diminuem a evapotranspiração e aumentam o calor.

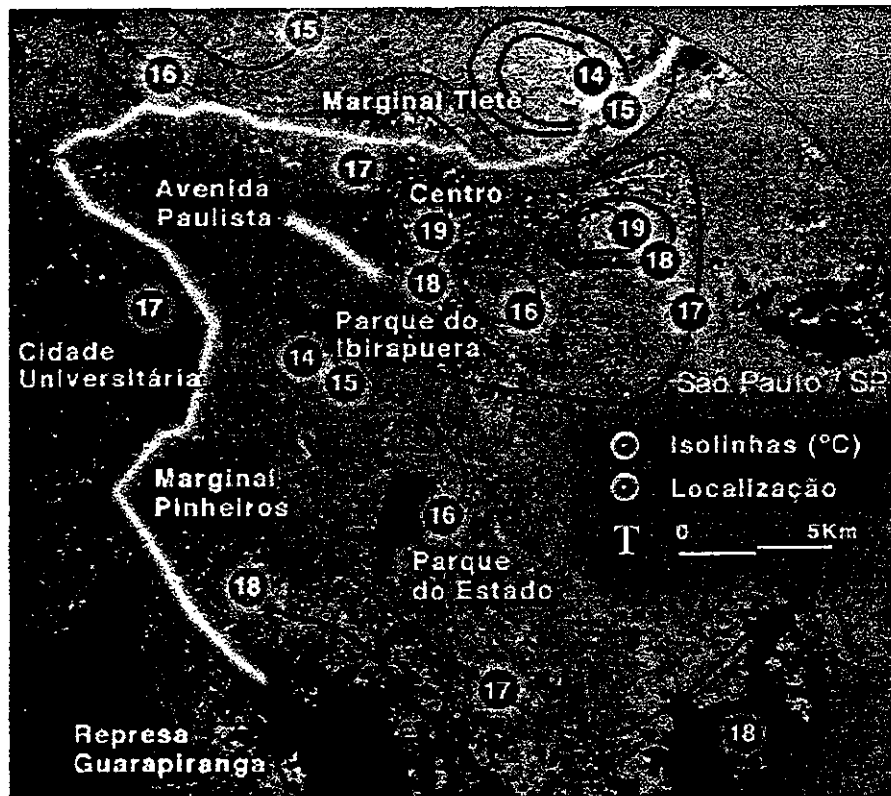


Fig. 4.4 – Cidade de São Paulo.

A intensidade da ilha de calor está relacionada com o tamanho da cidade e sua população. Ou seja, cidades mais populosas sofrem maiores efeitos da ilha de calor. Porém considerar apenas a população não é suficiente para explicar esse fenômeno físico. geometria das ruas e dos prédios nas áreas urbanas centrais influenciam na máxima intensidade da ilha, em relação às áreas livres vegetadas.

Seria desejável que arquitetos e planejadores urbanos utilizassem, em seus projetos, os resultados das pesquisas dos meteorologistas e climatologistas. Os estudos sobre clima urbano podem auxiliar na elaboração das leis de parcelamento, uso e ocupação do *solo* e no código de obras das cidades. Dessa forma, os problemas gerados pela formação da ilha de calor poderiam ser amenizados. É importante a conscientização social, para a implantação de áreas verdes e a realização de campanhas para a ampliação e o monitoramento da vegetação urbana.

São Paulo em situação de estabilidade atmosférica, com ausência de ventos, e inversão térmica freqüentes no inverno, o fenômeno chamado ilha de calor aparece na sua plenitude, podendo ocorrer variação térmica horizontal de até 10°C, entre o centro da cidade e sua periferia.

Em lugares com grande intensidade de vegetação, como é o caso do parque do Ibirapuera, a temperatura é menor que nos bairros com elevado índice de área construída e intensa verticalização.

Este fenômeno, ilha de calor, está associado também aos maiores índices de poluição da atmosfera. Esta anomalia térmica associada à alta intensidade de poluição possibilita a ocorrência de doenças respiratórias a população mais idosa pode sofrer riscos fatais, principalmente nos que possuem problemas cardíacos.

No verão a variação térmica horizontal são menores, entretanto o aquecimento basal do ar interfere na condensação possibilitando uma intensidade maior de precipitação e, com a impermeabilização do solo, pode ocorrer enchentes prejudicando a vida dos cidadãos.

## **5. RADIAÇÃO SOLAR**

### **5.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR**

O nosso universo é composto de bilhões de galáxias. Uma das quais é a Via Láctea. A Via Láctea é composta de poeira e aproximadamente 400 bilhões de sois ou de estrelas. Hoje em dia sabe-se que em torno do nosso Sol giram 9 planetas. Nós humanos somos uma das cinquenta bilhões de espécies que cresceram e evoluíram num pequeno planeta; o terceiro á partir do Sol, local onde nascemos vivemos e provavelmente vamos morrer. O planeta terra.

Na sua jornada pelo espaços a Terra realiza vários movimentos, mas os principais são os movimentos de rotação e de translação. A rotação é o movimento que a Terra faz em

torno de seu eixo e que dura, aproximadamente, 24 horas ou seja um dia. O movimento de translação é o que a Terra realiza em torno do Sol, e leva em aproximadamente 365 dias ou seja um ano para completar uma volta. O traçado do caminho que a Terra percorre em torno do Sol é uma elipse. Este traçado recebe o nome de eclíptica.

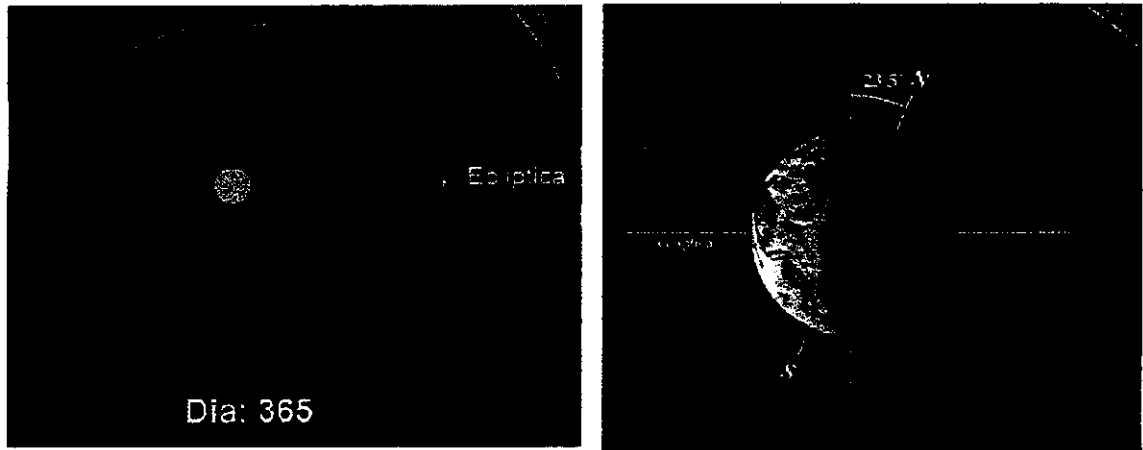


Fig. 5.1 – Eclíptica e inclinação da Terra.

O eixo de inclinação da Terra é de 23 graus e meio em relação à eclíptica. Essa inclinação faz com que cada hemisfério receba quantidades de energia diferentes, dependendo da posição em que a Terra se encontra. É o movimento de translação da Terra, associado a essa inclinação, que determina as estações do ano: primavera, verão, outono e inverno.



Fig. 5.2 – Movimento de translação e rotação da Terra.

Quando a Terra passa pelos eixos do maior raio da elipse, duas latitudes no planeta recebem energia máxima. Isto ocorre, em dezembro, na latitude de  $23^\circ$  ao sul do equador, conhecida como Trópico de Capricórnio e, em junho na latitude de  $23^\circ$  ao norte do equador, conhecida como Trópico de Câncer. Quando o Sol se encontra no Trópico de Capricórnio dizemos que é o solstício de verão no hemisfério Sul e de inverno no hemisfério norte. Quando o sol se encontra no Trópico de Câncer é inverno no hemisfério sul e verão no hemisfério norte.

Durante março e setembro a Terra se encontra em posições igualmente distantes do sol. Nesta Época, a quantidade de energia que incide sobre o planeta é a mesma em todas as latitudes. Esta situação é conhecida como equinócios. Em março ocorre o equinócio de outono no hemisfério sul e o equinócio de primavera no hemisfério norte. Quando os equinócios ocorrem diz-se que o sol está aparentemente atravessando a latitude do equador. Em setembro no hemisfério sul ocorre o equinócio de primavera e no hemisfério norte o de outono.

## 5.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA RADIAÇÃO SOLAR

O recebimento de energia em qualquer localidade do planeta, depende da posição do sol no céu, independentemente de sua latitude e é esta posição que define a altura do sol em relação aos observadores na superfície da Terra.

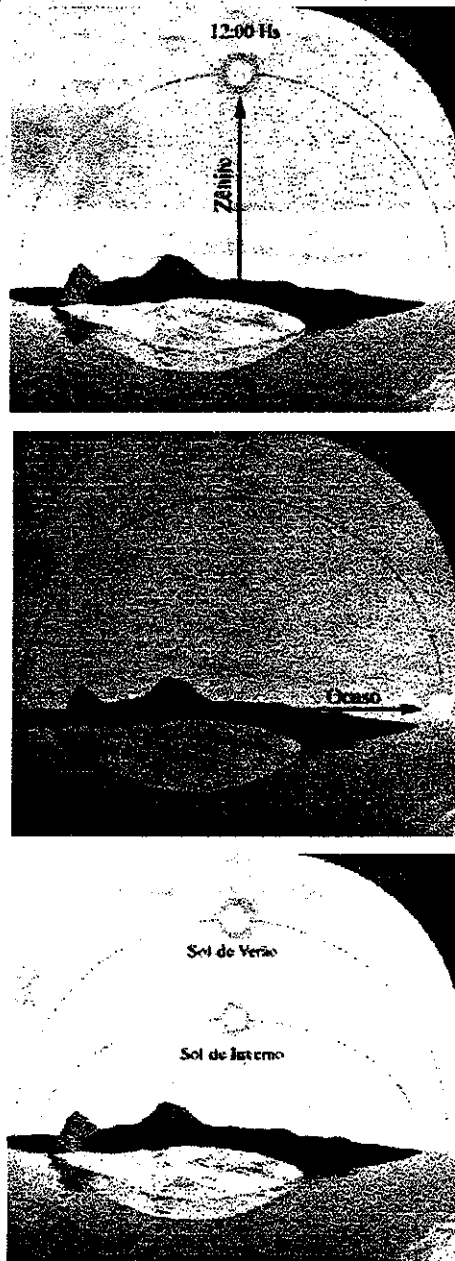


Fig. 5.3 – Posição relativa do Sol no céu.

A altura do sol é máxima quando ela está no centro do céu por volta do meio dia. Esta posição é conhecida como zênite. Quando o sol está no zênite a energia que atinge a superfície é máxima. À altura do sol é mínima quando ele se põe no horizonte, o ocaso. Quando sol esta no ocaso a energia que atinge a superfície é mínima.

O movimento aparente do sol e a latitude também definem a duração do dia. Os dias são longos no verão e curtos no inverno. Assim, quanto maior o dia, maior é a quantidade de insolação recebida pela superfície e quanto menor o dia menor a quantidade de insolação recebida pela superfície. Pôr isso, o hemisfério de verão recebe mais energia solar que o de inverno. Na ilustração abaixo o hemisfério sul está no verão e podemos notar que a quantidade de energia recebida é muito maior que a do hemisfério norte.

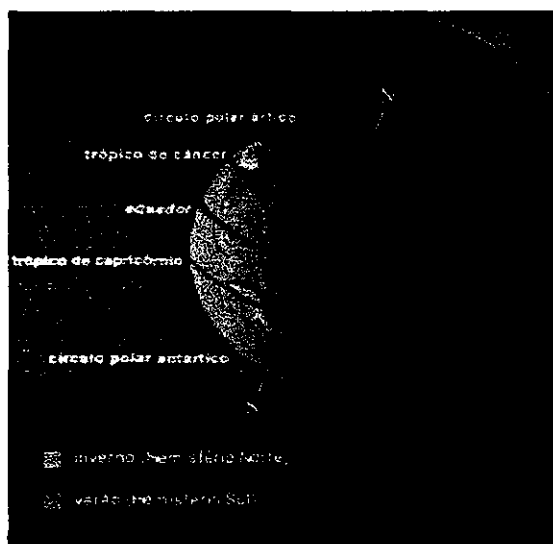
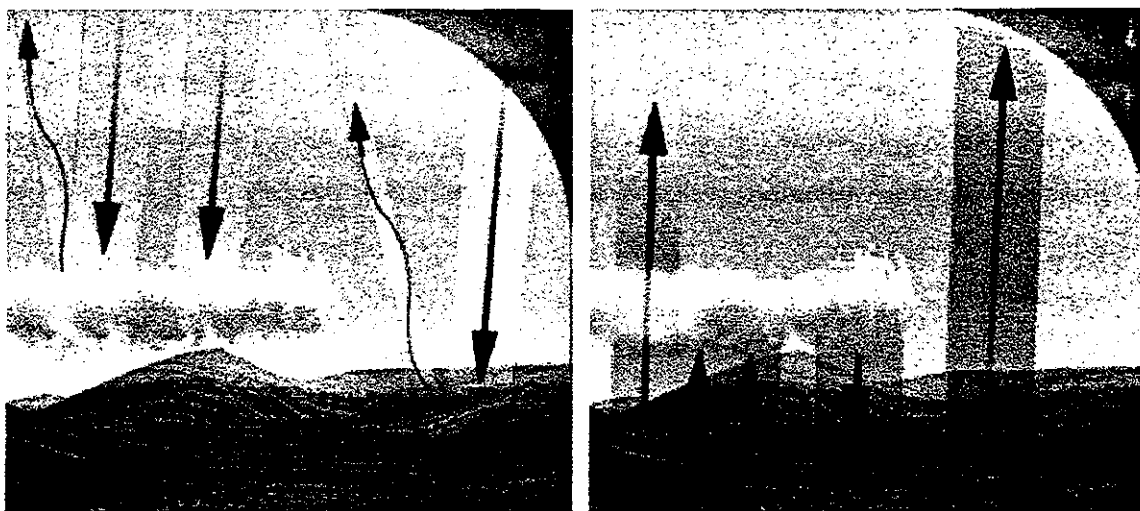


Fig. 5.4 – Radiação incidente na Terra.

### 5.3 A IMPORTÂNCIA DA ATMOSFERA

Nem toda energia que chega ao topo da atmosfera atinge a superfície. Na verdade 31% é refletida para o espaço sem ser aproveitada. As nuvens contribuem refletindo 23% da energia incidente. Essa energia refletida representa o albedo planetário. O restante da energia incidente é absorvida pela atmosfera em sua maior parte pela superfície da terra.





• Fig. 5.5 – Radiação recebida e refletida no continente.

Da mesma forma que refletem grande quantidade de energia vinda do sol, as nuvens absorvem enormes porções da energia refletida pela superfície. Por isso as nuvens são muito importantes, pois funcionam como barreira para a insolação emitida pela terra impedindo que o planeta esfrie demasiadamente. Ou seja as nuvens funcionam como controladoras da temperatura da superfície do planeta e qualquer processo que altere a quantidade média das nuvens afetará a nossa vida.

Outro elemento importante é o gás carbônico que juntamente com as nuvens controla a temperatura da terra. Ele absorve a energia emitida pela superfície e juntamente com o vapor d'água é um dos principais constituintes do chamado efeito estufa, fenômeno natural sem o qual a vida do planeta não existiria como conhecemos.

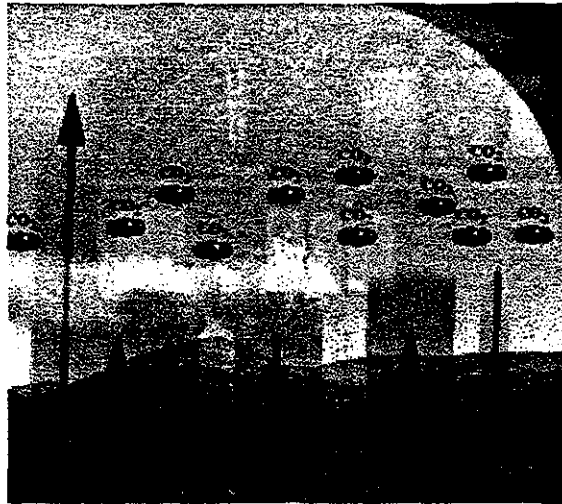


Fig. 5.6 – CO<sup>2</sup> absorvendo e refletindo radiação.

## 6. ELEMENTOS CLIMÁTICOS

### 6.1 TEMPERATURA

A temperatura do ar indica o quanto ele está sendo aquecido ou resfriado pela energia solar e pela superfície. São esses processos radiativos e químicos que ocorrem na atmosfera que determinam a variação climática. A temperatura do ar, próxima à superfície, é medida através de instrumentos chamados Termômetros. Os termômetros podem ser elétricos, de mercúrio ou de álcool. Um observador, geralmente um meteorologista, faz a medição da temperatura do ar, através do termômetro ou do termógrafo, no local onde se encontram os aparelhos. Este local é conhecido como abrigo meteorológico.

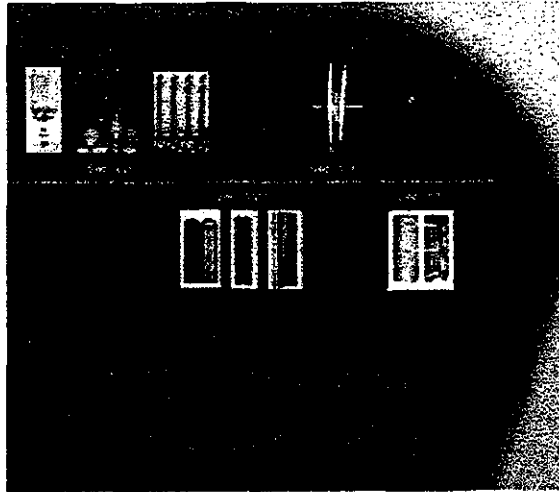


Fig. 6.1 – Termômetros - evolução.:

No Brasil, a temperatura é medida em graus Celsius. Nesta escala, a temperatura de ebulição da água é definida com o valor  $100^{\circ}\text{C}$  e o ponto de congelamento corresponde ao valor de  $0^{\circ}\text{C}$ . Existem também outras escalas bastante utilizadas como a escala Fahrenheit nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, e a escala Kelvin em trabalhos científicos.

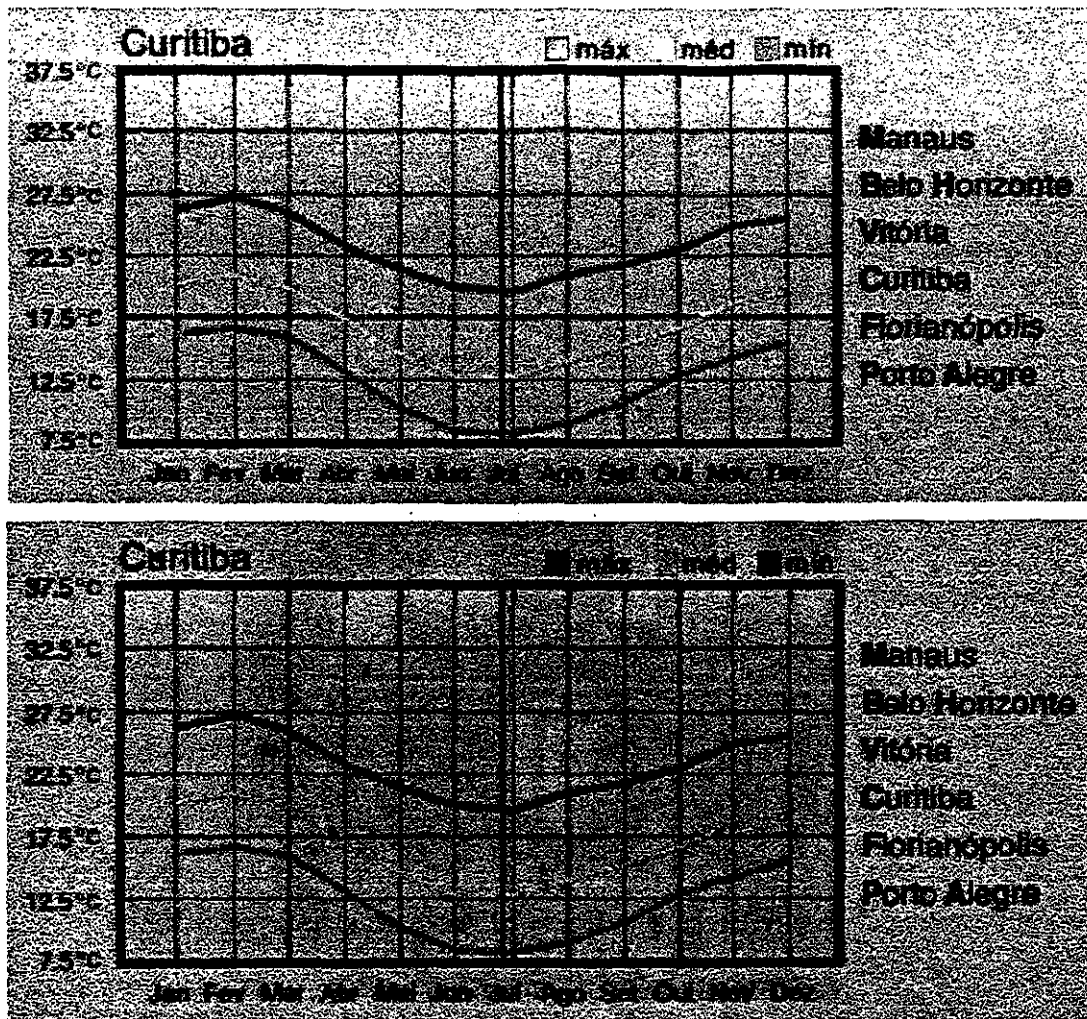


Fig. 6.2 – Variações de temperatura no Brasil e em Curitiba.

Temperatura máxima é a maior temperatura diária. Essa medição é feita através de um termômetro de máxima. Temperatura mínima registra a menor temperatura diária, utilizando um termômetro de mínima. Temperatura média é derivada da maior e da menor temperatura do dia. A média mensal é calculada a partir das médias diárias e a anual é calculada a partir das médias mensais. Essas temperaturas médias mensais e anuais são utilizadas nos estudos de climatologia.

## 6.2 PRESSÃO

O peso que a atmosfera exerce sobre a superfície terrestre é conhecido como pressão atmosférica. Ao nível do mar, em condições ideais, esta pressão é de 1013 milibares, o equivalente ao peso de uma coluna de mercúrio de 76cm de altura.

Os instrumentos utilizados para medir a pressão são o barômetro ou o barógrafo. A diferença é que o barógrafo registra a pressão continuamente.

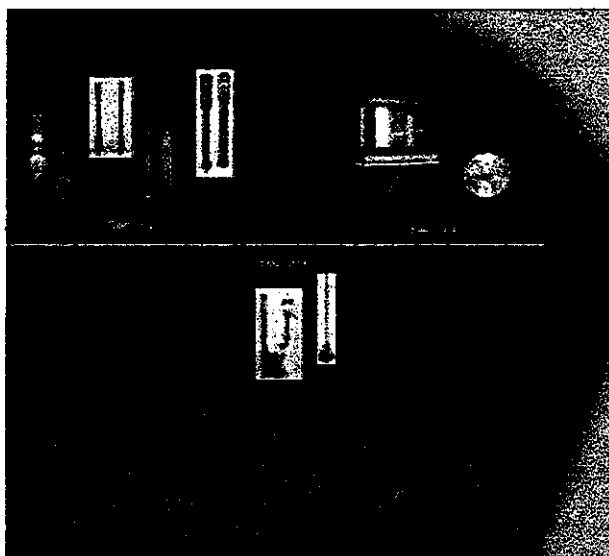


Fig. 6.3 – Barômetros - evolução.

Quando uma coluna de ar é aquecida, ela fica leve e o ar sobe, exercendo menor pressão sobre a superfície. Isso forma um núcleo com baixos valores de pressão. Esse núcleo é conhecido como Centro de Baixa Pressão ou Ciclone. Quando uma coluna de ar é resfriada, ela fica pesada e o ar desce, formando um núcleo de altos valores de pressão. Esse núcleo é conhecido como Centro de Alta Pressão ou Anticiclone. A Terra não é aquecida uniformemente, centros de baixa e alta pressão são observados em todo o planeta.

Na região equatorial, predominam os centros de baixa pressão. Já, nas latitudes altas, formam-se centros de alta pressão, chamados Anticiclones Polares. Centros de alta pressão também são encontrados nas regiões tropicais e subtropicais, principalmente

sobre os oceanos. Esses Anticiclones Subtropicais são semiestacionários. Nas latitudes médias, ao longo dos Círculos Circumpolares, predominam os núcleos de baixa pressão.

A posição dos centros de pressão se alteram durante o ano, com a variação térmica no globo. E as áreas continentais, com sua grande amplitude térmica, também alteram a intensidade e o posicionamento dos centros de pressão.

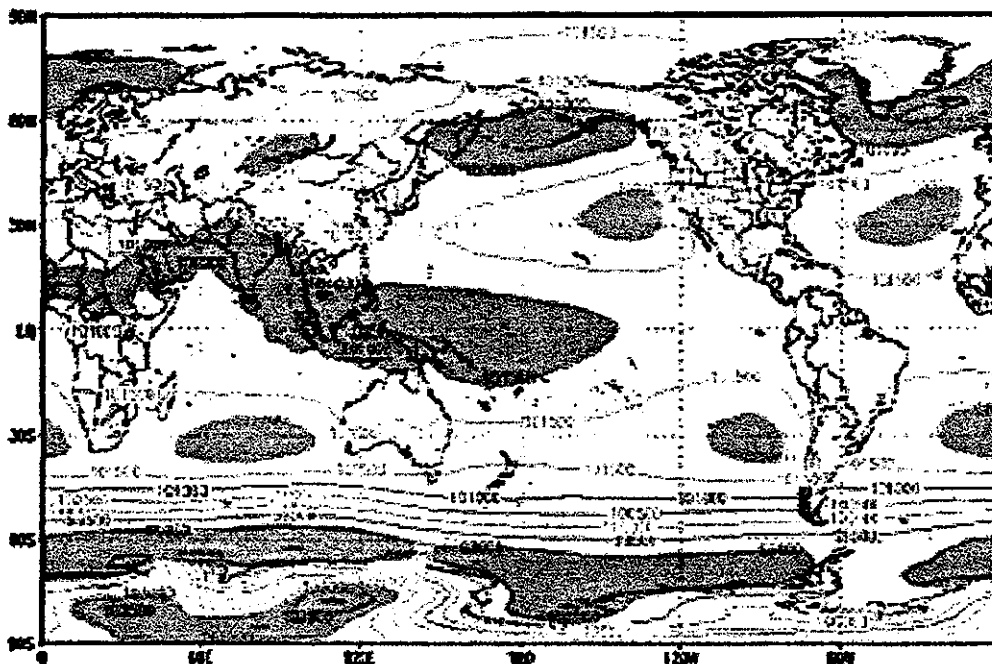


Fig. 6.4 – Centros de alta e baixa pressão.

## 7. PREVISÃO DE TEMPO E CLIMA

### 7.1 PREVISÃO DE TEMPO

Como podemos saber o que vai acontecer com o tempo? Antes de prever o que vai acontecer, é necessário conhecer e entender o comportamento do tempo e suas causas.

O tempo pode ser considerado como o assunto mais frequentemente discutido no dia a dia. Influencia nosso modo de vida e até o modo como nos sentimos. Ao longo dos séculos, observadores do céu e dos ventos tais como navegadores pastores e

agricultores, acumularam certos conhecimentos práticos que tornaram possível a previsão de algumas mudanças iminentes do tempo.

Como se formam as nuvens? As nuvens parecem surgir do nada, mas, na verdade, o ar contém vapor d'água, resultado da evaporação, e minúsculas partículas como poeira, fumaça e sal, suficientemente leves para permanecerem suspensas no ar. A condensação e a sublimação do vapor d'água ocorrem em torno dessas minúsculas partículas, que são chamadas de núcleos de condensação. Se não fosse por essas impurezas, seria necessária uma umidade muito grande para formar as nuvens. A quantidade de vapor d'água no ar varia com a temperatura, quanto mais quente, maior a quantidade de vapor, sem que comece a ocorrer condensação. A temperatura a partir da qual o vapor d'água começa a condensar é chamada de ponto de orvalho. Quando o ar atinge a máxima quantidade de vapor d'água que é capaz de conter, dizemos que atingiu o ponto de saturação ou que está saturado. Quando ocorre elevação de ar úmido, o resfriamento pode levar o ar à saturação. Após a saturação, qualquer resfriamento adicional produzirá a condensação ou a sublimação do vapor d'água, formando gotículas de água e cristais de gelo. Se a temperatura é suficientemente baixa, ocorre a sublimação, ou seja, o vapor d'água passa diretamente a cristais de gelo. Essas gotículas de água e cristais de gelo são freqüentemente muito pequenas e permanecem em suspensão formando as nuvens.

A precipitação ocorre quando algumas gotículas ou cristais de gelo da nuvem crescem até um tamanho suficientemente grande para cair sob a ação da gravidade. Este crescimento pode acontecer de várias formas. Um processo que ocorre usualmente é a coalescência, ou seja, a união de gotículas que colidem, devido à turbulência no interior da nuvem. A gotícula resultante sofre menor resistência do ar e cai mais rapidamente, colidindo com gotículas menores em seu caminho, incorporando-as e continuando a crescer. Essa gotícula passa a se chamar gota de chuva quando deixa a base da nuvem.

O que provoca o vento? O vento é o resultado da movimentação do ar, que ocorre devido às diferenças de pressão atmosférica. Em locais com pressão mais baixa, as moléculas do ar estão mais afastadas, enquanto que, em regiões de pressão mais alta,

elas estão mais próximas. A atmosfera está sempre tentando estabelecer o equilíbrio entre as áreas de maior e menor concentração de moléculas, por isso o ar move-se das altas para as baixas pressões. Esse movimento é o que percebemos como vento.

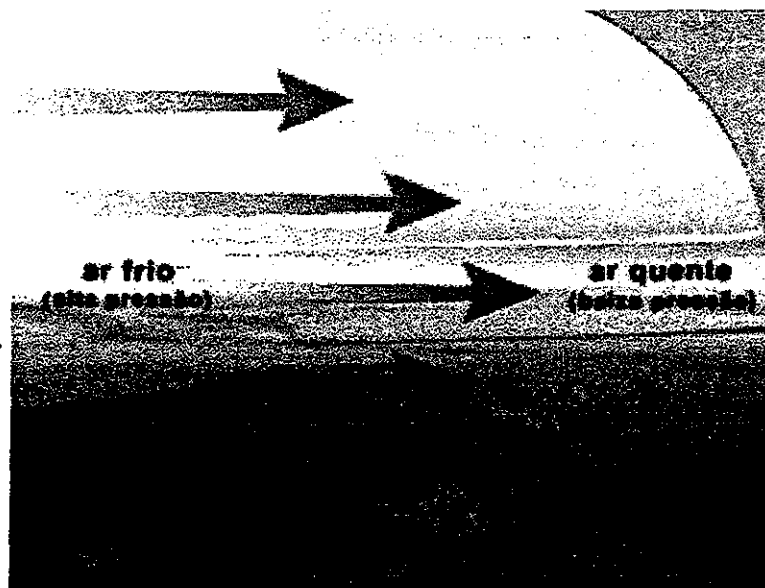


Fig. 7.1 – Exemplo de formação de ventos.

### 7.1.1 A EVOLUÇÃO ATRAVÉS DOS TEMPOS

Até o início do século XIX, o modo de encarar o tempo era uma curiosa mistura de senso comum e superstição, e incluía milhares de regras, ditados esquisitos e provérbios. O senso comum era baseado nas conexões evidentes entre ventos, nuvens e o tempo. Eram escolhidas rimas para colocar essas observações na forma de ditados e provérbios. Muitos desses ditados foram originados com os pregos e incrementados com exageros através da Idade Média. Durante as grandes navegações, no final do século XV, os marinheiros ampliaram bastante esse senso comum para dar conta dos diferentes sistemas de vento e dos padrões de tempo que encontraram ao redor do mundo.

Através dos séculos, marinheiros, agricultores e outros tentaram fazer previsões baseadas no conhecimento e crenças de sua época e nas suas observações pessoais. No entanto essas previsões eram freqüentemente mal sucedidas. Como não havia



comunicações adequadas, os observadores não sabiam o que estava acontecendo além do horizonte e normalmente eram surpreendidos por tempestades que chegavam sem muito aviso. Isso mudou com a invenção do telégrafo e o nascimento da previsão sinóptica no século XIX. A previsão sinótica consiste na rápida obtenção e análise de observações do tempo feitas no mesmo horário na maior quantidade de localidades possível. Em 1849, foi estabelecida uma rede meteorológica ligada por telégrafo nos Estados Unidos. Os dados eram coletados por voluntários e era preparado um mapa sinóptico, diariamente, com os dados coletados no mesmo horário em todas as localidades observadas. Em 1857, uma rede meteorológica criada na França recebia dados de toda a Europa. Em 1861, na Grã-Bretanha, Robert FitzRoy criou um serviço de aviso de tempestades para a Marinha. Inicialmente, foi um grande sucesso e FitzRoy passou a disponibilizar suas previsões nos jornais. Mas, à medida que ocorriam os inevitáveis erros decorrentes do método utilizado e da falta de precisão das observações, críticas sarcásticas e severas do público e dos cientistas tornavam-se constantes. Tomado por grande depressão, FitzRoy cometeu suicídio em 1865. Essas tais críticas sarcásticas foram uma praga para os provisosores que se seguiram.

Apesar das críticas, a previsão sinóptica foi ganhando cada vez mais força, a partir de 1860, com a formação de organizações meteorológicas nacionais em vários países. As duas grandes guerras mundiais forçaram os governantes a despender grandes esforços para monitorar e prever o tempo, pois as suas variações podiam ter grande influência no desenrolar das batalhas. O progresso da Meteorologia foi muito favorecido pela tecnologia desenvolvida durante a guerra. São resultado desse desenvolvimento tecnológico as radiosondas, balões carregando instrumentos meteorológicos e transmitindo, via rádio, os dados das camadas de ar acima do solo, e os radares, utilizados na guerra para rastrear aeronaves inimigas e a chuva. Após a Segunda Grande Guerra, surgiram também os primeiros satélites artificiais. Com o uso de satélites, foi possível visualizar as nuvens e as tempestades a partir do espaço. Os meteorologistas ficaram extasiados.

Atualmente, a Meteorologia é uma ciência muito entrosada com a Física e com a Matemática. Uma enorme evolução da previsão de tempo ocorreu com o surgimento da previsão numérica, baseada em modelos que representam o movimento e os processos físicos da atmosfera. Através de equações com os valores do estado inicial da atmosfera, pode-se obter projeções para o futuro. Para resolver essas equações, são utilizados supercomputadores que estão longe do que conhecemos para uso doméstico.

A idéia da previsão através de processos numéricos de resolução de equações que representem o comportamento da atmosfera foi publicada pela primeira vez por Lewis Richardson, um matemático britânico, em 1922. Richardson levou muitos meses para fazer os cálculos necessários para produzir uma previsão para 24 horas no futuro. Mas as mudanças de pressão previstas por ele foram entre 10 e 100 vezes maiores do que as que realmente ocorreram, e já haviam ocorrido há muito tempo quando ele terminou a previsão! O trabalho de Richardson, além de pioneiro, revelou os obstáculos que precisavam ser superados: um enorme número de cálculos tinham que ser feitos rapidamente, os dados que representavam o estado inicial da atmosfera eram inadequados, os modelos eram representações muito rudimentares da atmosfera, e os problemas com as técnicas matemáticas podiam resultar em pequenos erros que iam crescendo durante os cálculos. Quanto ao problema com a velocidade dos cálculos, Richardson estimou que para terminar as previsões antes dos fenômenos acontecerem seriam necessários 64.000 matemáticos equipados com calculadoras. Os computadores eletrônicos trouxeram a solução para o problema dos cálculos. Em 1950, foi feita, nos Estados Unidos, a primeira previsão numérica de tempo relativamente bem sucedida. O computador utilizado era gigantesco e ocupava toda uma sala. A partir de 1955, as previsões por computadores passaram a ser executadas regularmente nos Estados Unidos. Inicialmente, eram no máximo um pouco melhores que as tradicionais, mas foram melhorando rapidamente graças ao aparecimento de computadores cada vez mais rápidos, que permitiam o uso de modelos mais complexos, representando cada vez melhor a atmosfera. Paralelamente a essa evolução, houve a melhoria no conhecimento do estado inicial com o aumento progressivo na quantidade e qualidade dos dados iniciais

principalmente a partir do surgimento da Organização Meteorológica Mundial (*WMO*, *World Meteorological Organization*) em 1963.

Os computadores para previsão de tempo, além de serem "pesas pesados" em termos de velocidade de cálculos, precisam ter grande capacidade de memória. Esses supercomputadores realizam mais de um bilhão de contas por segundo!

## 7.2 PREVISÃO DE CLIMA

Previsão climática é uma estimativa do comportamento médio da atmosfera com um mês ou alguns meses de antecedência. Atualmente, para se fazer esse tipo de previsão, os Meteorologistas utilizem dois métodos, o estatístico e o dinâmico. O Método Estatístico, com equações matemáticas e conceitos de estatística, utiliza um programa de computador chamado modelo estatístico, que, através de uma correlação entre duas ou mais variáveis, estima o prognóstico de uma delas. Já o Método Dinâmico, com equações matemáticas e conceitos físicos, utiliza um programa chamado modelo dinâmico. Esse modelo, através de equações físicas, simula os movimentos atmosféricos para prever os acontecimentos futuros.



Fig. 7.2 – Resultado ilustrativo de modelo.

Desde 1995 o CPTEC/INPE é o único Centro Meteorológico na América Latina que operacionalmente produz previsões numéricas de tempo e clima para o Brasil e para o globo. Essas previsões são de grande importância para a tomada de decisões do governo federal em relação à agricultura e ao auxílio às populações que sofrem, por exemplo, com a seca no Nordeste. O CPTEC vem experimentando a previsão de longo prazo, de um a três meses, empregando o seu modelo dinâmico, com resultados promissores.

Além de obter as previsões de tempo e clima, o CPTEC recebe e processa dados climatológicos do Brasil e do mundo para monitorar a situação climática.

### 7.3 TIPOS DE NUVENS

#### 7.3.1 CUMULUS HUMILIS

Cumulus é uma nuvem típica de verão. Quando o sol aquece a superfície, bolhas de ar morno sobem do solo, como balões de ar quente invisíveis. A um quilômetro ou mais acima da superfície, o vapor das bolhas se condensa em gotículas de água, formando pequenas nuvens que parecem flocos de algodão. Nuvens de Cumulus pequenas, com até 100 metros de extensão, indicam bom tempo durante o resto do dia. As nuvens de Cumulus se dissolvem à noite, quando cessa o aquecimento pelo sol.

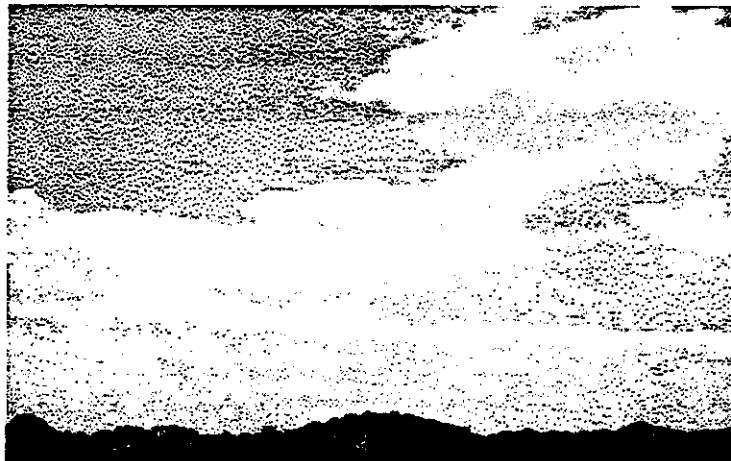


Fig. 7.3 – Cumulus humilis.

### 7.3.2 CUMULUS CONGESTUS

Em uma atmosfera fria e úmida, as nuvens de cúmulos podem crescer e chegar a mais de 100 metros de extensão. O crescimento das nuvens continua desde que elas estejam mais quentes que o ar ao seu redor. As nuvens adquirem gradualmente a forma de uma couve-flor e alcançam posições mais e mais altas no céu. Se as nuvens adquirirem esse aspecto antes de meio dia, pode-se esperar pancadas de chuva à tarde.

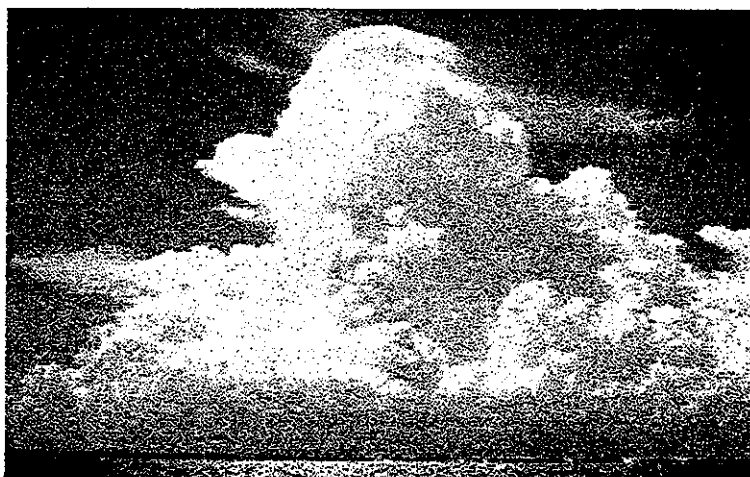


Fig. 7.4 – Cumulus congestus.

### 7.3.3 CUMULONIMBUS

Nas nuvens cumulus que crescem em forma de torre muito alta, as gotículas de água do topo estão entre 7 e 10 Km acima do nível do mar e congelam, formando pequenos cristais. O topo da nuvem ganha um aspecto fibroso em forma de bigorna. A parte inferior da imensa nuvem possui uma aparência escura e ameaçadora. Se a nuvem cumulonimbus se aproxima, pode-se esperar chuva forte ou chuva de granizo, tempestade e rajadas de vento.



Fig. 7.5 - Cumulonimbus.

#### 7.3.4 CIRRUS UNCINUS

Nuvens fibrosas finas e brancas, que se acumulam ao acaso num céu claro, podem não parecer ameaçadoras. Mas, se as fibras são curvadas no fim e mais densas no horizonte, é melhor ficar abrigado! O contínuo acúmulo desse tipo de nuvens no céu indica a aproximação de uma baixa pressão e precipitação. É provável que a precipitação comece dentro de 24 horas. As nuvens cirrus são pequenos cristais de gelo que normalmente aparecem a uma altitude entre 7 e 10 km.

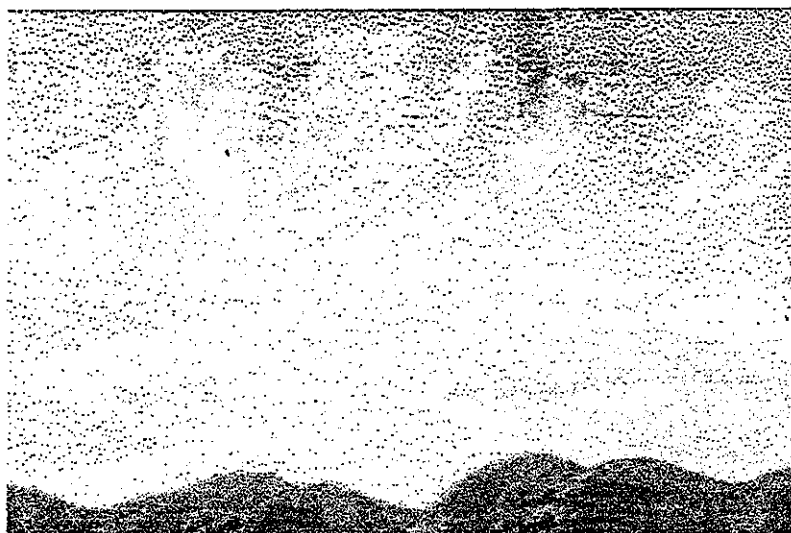


Fig. 7.6 – Cirrus uncinus.

### 7.3.5 CIRROSTRATUS

Quando as nuvens cirrus são seguidas por um véu fino e branco de nuvens que cobrem a maioria do céu gradualmente, é um sinal adicional de que uma baixa pressão e uma área de precipitação estão se aproximando. Quando o sol está envolto por uma cirrostratus, a luz será retratada nos pequenos cristais de gelo da nuvem, formando um círculo de luz ao redor do sol, chamado halo. Assim o halo pode ser um sinal de precipitação iminente, provavelmente dentro das próximas 12 horas.

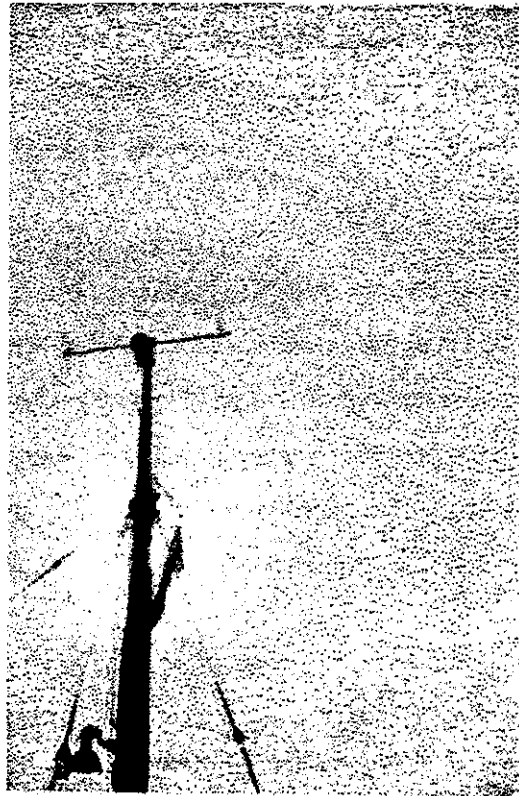


Fig. 7.7 - Cirrostratus.

### 7.3.6 ALTOSTRATUS

Quando uma área de precipitação associada a um centro de baixa pressão se aproxima, as nuvens altostratus seguem as nuvens cirrostratus. A altura da camada de altostratus é de 3 a 7 km, menor que a altura de cirrostratus. As altostratus são compostas de gotículas de água. O sol aparece através das nuvens e, em seguida, desaparece

totalmente à medida que elas crescem e se tornam densas e acinzentadas. Nesse caso a precipitação deverá ocorrer dentro de duas horas.



Fig. 7.8 - Altostratus.

## 7.4 FENÔMENOS METEOROLÓGICOS

### 7.4.1 CHUVA

Chuva são gotas de água que descem das nuvens para a superfície. A quantidade de chuva é medida em milímetros, um mm equivale a um litro de água sobre uma superfície de 1 m<sup>2</sup>. A taxa de chuva ou taxa pluviométrica é medida em mm/h.





Fig. 7.9 - Chuva.

#### 7.4.2 NEVE

A neve é formada por flocos de gelo fino que descem das nuvens frias para a superfície. A quantidade de neve também é medida em milímetros, como a água.



Fig. 7.10 - Neve

#### 7.4.3 ORVALHO

O orvalho é uma fina camada de gotículas d'água condensada no solo ou na superfície vegetal.

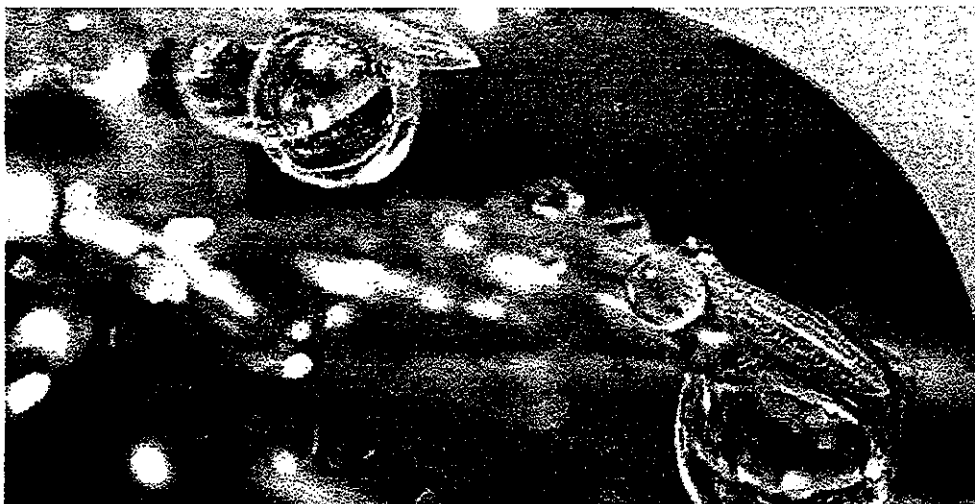


Fig. 7.11 - Orvalho.

#### 7.4.4 GEADA

Geada é uma camada, geralmente fina, de cristais de gelo formada no solo ou na superfície vegetal. Este fenômeno pode causar sérios danos a agricultura.



Fig. 7.12 - Geada.

#### 7.4.5 NEVOEIRO

Nevoeiro é uma camada de gotículas de água suspensas no ar junto à superfície, normalmente com altura entre 20 e 30 metros, podendo atingir até 500 metros. As gotículas de água diminuem a visibilidade, prejudicando os transportes aéreos, terrestres e marítimos. Sua ocorrência é freqüente na madrugada e primeiras horas da manhã.



Fig. 7.13 - Nevoeiro.

#### 7.4.6 INVERSÃO TÉRMICA

A Inversão térmica é a formação de uma camada atmosférica com temperatura menor na sua base que no topo invertendo a variação natural da temperatura em função da altura. Esse fenômeno oferece condições de estabilidade, e o ar não consegue se misturar na vertical. A concentração de gases e partículas emitidas pela atividade humana ficam retidas nas baixas camadas da atmosfera, causando altos níveis de poluição.



Fig. 7.14 – Inversão térmica.

#### 7.4.7 FRENTE FRIA

Frente Fria é uma região de transição entre massas de ar frio e quente, em geral na superfície. Possui até 300 km de largura, uma altura de cerca de 6 km e pode se estender por milhares de quilômetros. O deslocamento dessa frente é na direção do ar frio para o ar quente. E sua borda frontal apresenta tempestades.



Fig. 7.15 – Frente Fria.

#### 7.4.8 FRENTE QUENTE

Frente quente é uma região de transição entre massas de ar frio e quente, em geral na superfície. Possui até 300 km de largura, uma altura de cerca de 6 km e pode se estender por milhares de quilômetros. O deslocamento da frente é na direção do ar quente para o ar frio. A borda frontal da frente quente apresenta chuvas de intensidade moderada.



Fig. 7.16 – Frente quente.

#### 7.4.9 TEMPESTADE

As tempestades são ventos fortes associados ao desenvolvimento de nuvens com grande extensão vertical, normalmente com a sua base a 1 km e o seu topo podendo atingir 15 km acima da superfície. Os movimentos descendentes dentro da nuvem produzem, ao atingir a superfície, fortes fluxos de ventos em várias direções. Durante as tempestades ocorrem chuvas intensas, granizo e descargas elétricas, raios e relâmpagos. A duração da fase ativa da tempestade é de menos de duas horas.



Fig. 7.17 - Tempestade.

#### 7.4.10 TORNADO

Tomados são ventos giratórios muito fortes, acima de 120 m/s, que se desenvolvem em forma de funil, com aproximadamente 50 metros de diâmetro. O movimento dos tornados é de difícil previsão. O fenômeno possui grande capacidade de destruição, podendo torcer até estruturas metálicas, postes, antenas de grandes dimensões e arremessá-las a longas distâncias.



Fig. 7.18 - Tornado.

#### 7.4.11 FURACÃO / CICLONE TROPICAL

Os furacões e os ciclones tropicais são ventos giratórios fortes, com velocidade acima de 60 nós, em torno de uma região central de baixa pressão com dimensões de aproximadamente 200 km de diâmetro. O mesmo fenômeno é conhecido como Furacão, Ciclone Tropical ou Tufão, dependendo da região de ocorrência. O fenômeno possui grande capacidade de destruição, podendo demolir moradias de estrutura fraca ou arrancar telhados, bem como causar inundações e desabamentos de encostas, devido às chuvas intensas que ocorrem durante esse fenômeno.

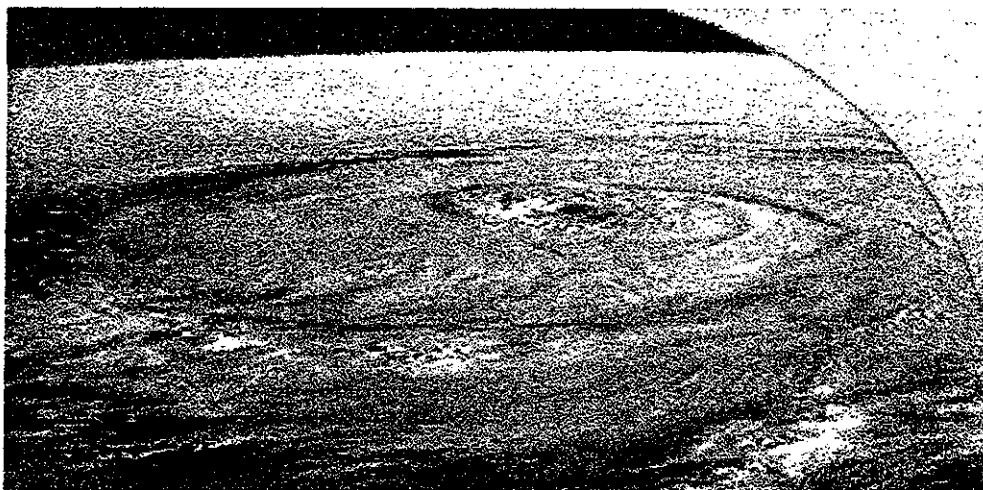


Fig. 7.19 - Furacão / Ciclone Tropical.

#### 7.4.12 RESSACA DO MAR

A ressaca do mar é um fenômeno formado por fortes ondas, geradas pela presença de ciclone tropical ou extra tropical. Os efeitos dessas ondas podem atingir as regiões litorâneas do continente, com invasão de águas marítimas por ondas de aproximadamente 5 a 10 metros de altura.

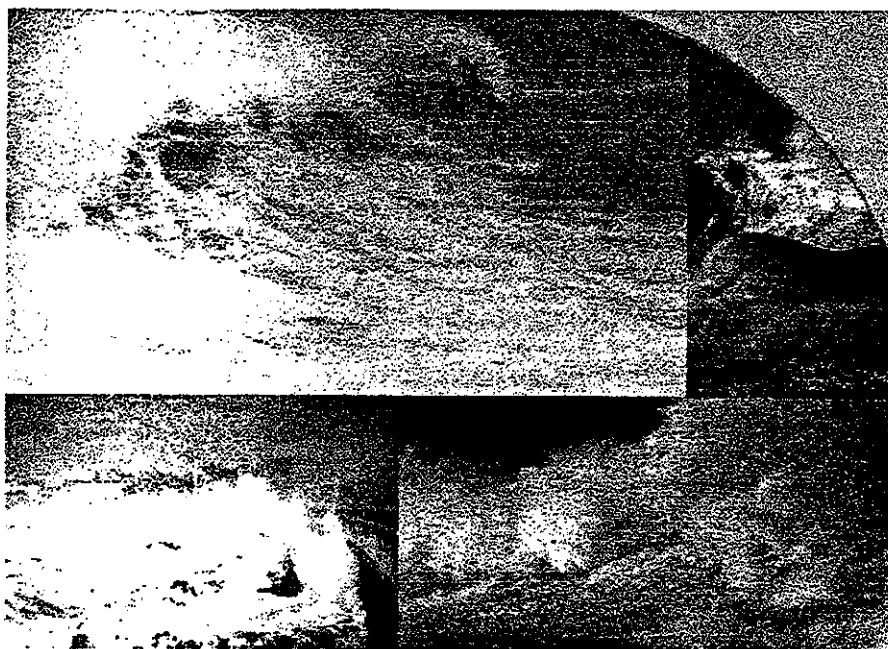


Fig. 7.20 – Ressaca do Mar.

#### 7.4.13 RAIIO / RELÂMPAGO / TROVÃO

Raio é uma descarga elétrica entre partes de uma mesma nuvem ou entre uma nuvem e a superfície, gerando o relâmpago, que é uma grande claridade momentânea, acompanhada de um estrondo sonoro, o trovão. Este tipo de fenômeno normalmente acompanha as tempestades, tornados e ciclones.



Fig. 7.21 – Raio / relâmpago / trovão.

#### 7.4.14 ARCO ÍRIS

O arco-íris é um fenômeno óptico na forma de um arco, com faixas nas cores do espectro da luz. Ele aparece quando existem gotas de água no ar, sejam suspensas ou em forma de chuva, e a presença do sol em lados opostos do observador.



Fig. 7.22 – Arco Íris.



#### 7.4.15 MIRAGEM

As miragens são criadas por uma grande variação de temperatura na camada de ar junto à superfície. A superfície age como um espelho, causando a reflexão da luz. Esse fenômeno ocorre em locais onde a superfície está muito quente, com temperatura superior a 50°C.



Fig. 7.23 - Miragem.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Abreu, Magda Luzimar de: Radiação solar. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.

Abreu, Magda Luzimar de: Elementos climáticos. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.

Coutinho, Mariane Mendes: Previsão de tempo. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e

- ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.
- Lombardo, Magda Adelaide: Clima urbano. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.
- Oliveira, Gilvan Sampaio de: Previsão de clima. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.
- Oyama, Marcos Daisuke: Ciclo hidrológico. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.
- Oyama, Marcos Daisuke: Interação vegetação-atmosfera. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro Previsão de Tempo e Clima. (INPE.CPTEC) Meio ambiente e ciências atmosféricas : A utilização de multimídia e da rede internet no ensino médio. [CD-ROM] Cachoeira Paulista : 1999.

# **CAPÍTULO 8**

## **CAMADA DE OZÔNIO**

**Plínio Carlos Alvalá\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e-mail: [plinio@dge.inpe.br](mailto:plinio@dge.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8-5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8-7</b>
<b>2. A CAMADA NATURAL DE OZÔNIO .....</b>	<b>8-8</b>
<b>3. DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO .....</b>	<b>8-13</b>
<b>4. CAMADA DE OZÔNIO E A RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA .....</b>	<b>8-18</b>
<b>5. SUMÁRIO .....</b>	<b>8-20</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>8-21</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>1 – NOMENCLATURA DAS CAMADAS ATMOSFÉRICAS .....</b>	<b>8-7</b>
<b>2 – PERFIL TÍPICO DA CAMADA DE OZÔNIO .....</b>	<b>8-10</b>
<b>3 – COLUNA TOTAL DE OZÔNIO GLOBAL .....</b>	<b>8-12</b>
<b>4 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DO CFC-11 NA TROPOSFERA .....</b>	<b>8-14</b>
<b>5 – DISTRIBUIÇÃO DA COLUNA TOTAL DE OZÔNIO OBTIDA PELO SATÉLITE EP/TOMS, PARA A ANTÁRTICA, DIA 10 DE MARÇO DE 1998 .....</b>	<b>8-15</b>
<b>6 – DISTRIBUIÇÃO DA COLUNA TOTAL DE OZÔNIO OBTIDA PELO SATÉLITE EP/TOMS, PARA A ANTÁRTICA, DIA 10 DE OUTUBRO DE 1998 .....</b>	<b>8-16</b>
<b>7 – MÉDIAS MENSAIS DA COLUNA TOTAL DE OZÔNIO NOS PERÍODOS 1980-1997 E 1990-1997 MEDIDOS EM CACHOEIRA PAULISTA, SP .....</b>	<b>8-17</b>
<b>8 – FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR PARA VÁRIAS ALTURAS EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA E O ESPECTRO DE AÇÃO PARA DANO AO DNA .....</b>	<b>8-19</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é uma mistura de gases, composta em sua maior parte pelo gases nitrogênio (78%) e oxigênio (21%). Esta proporção não se alterou nos últimos milhões de anos. Componentes com concentração muito baixa, tais como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e outros gases minoritários formam apenas 1% restante da atmosfera. Embora seja um gás minoritário, as moléculas de ozônio têm uma participação crucial na vida do planeta. Elas absorvem a radiação ultravioleta solar – UV( $\lambda < 320 \text{ nm}$ ), protegendo os seres vivos desta radiação danosa. O ozônio também é responsável em grande parte pelo estrutura térmica da estratosfera (12-50 km), onde a temperatura aumenta com a altura. A Figura 1 apresenta a divisão da atmosfera em camadas em função da variação da temperatura.

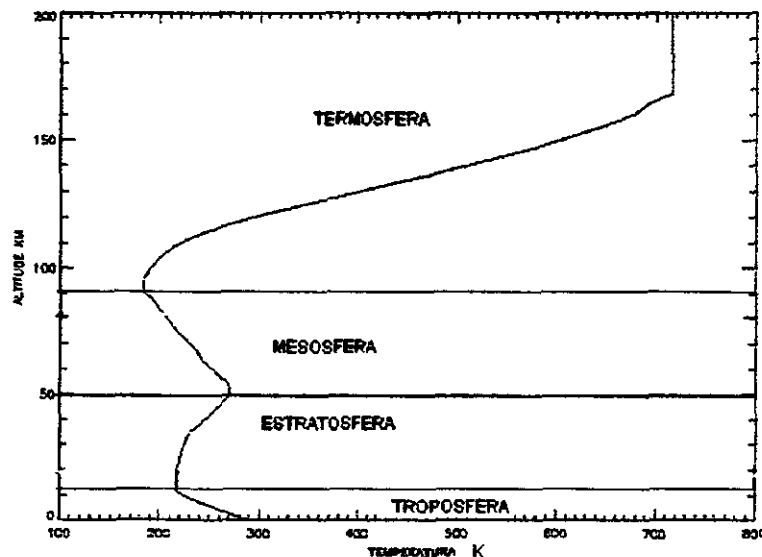


Fig. 1 - Nomenclatura das camadas atmosféricas em função da temperatura com a altura.

Fonte: Morris et al. (2000, p. )

O ozônio é um gás muito reativo, reagindo com muitas substâncias químicas. A interação mais imediata ocorre na troposfera, a região mais baixa da atmosfera, que se estende da superfície até 12-16 km de altura, diretamente sujeita a ação antropogênica.

Durante os últimos 20 anos os registros comprovam o aumento da concentração de várias substâncias consideradas poluentes.

A presença de oxigênio na atmosfera terrestre está intimamente associada ao aparecimento de plantas simples (algumas espécies de algas) nos oceanos. Elas apareceram a cerca de 2,5 bilhões de anos e permitiram que o  $\text{CO}_2$  fosse removido da atmosfera e trocado pelo oxigênio ( $\text{O}_2$ ). Estas plantas foram capazes de usar diretamente a luz solar como fonte de energia no processo de fotossíntese. A liberação de oxigênio neste processo alterou drasticamente a atmosfera, saindo de um estado redutor, sem oxigênio livre, para o um estado em que, como ainda é hoje, existe oxigênio livre. Estima-se que a cerca de 400 milhões de anos o conteúdo atmosférico de oxigênio e ozônio estavam muito próximos do conteúdo atual. Foi somente com esta injeção de oxigênio e a formação da camada de ozônio, que a vida animal e vegetal pode desenvolver-se na superfície terrestre, porque antes, a grande incidência de radiação ultravioleta só permitia o desenvolvimento celular nas profundezas dos oceanos (Kirchhoff, 1995).

Desde o início da década de 70, o gás ozônio passou do interesse de um pequeno grupo de cientistas para atingir uma importância global. Este salto ocorreu devido a que alguns destes cientistas determinaram que a concentração normal de ozônio estava sendo alterada. Extensivas medidas de campo, estudos de laboratórios e investigações teóricas estabeleceram uma ligação entre alguns compostos químicos produzidos pelo homem e a perda de ozônio na atmosfera.

## **2. A CAMADA NATURAL DE OZÔNIO**

A molécula de ozônio ( $\text{O}_3$ ) é uma forma do elemento oxigênio (O), a qual tem três átomos de oxigênio, em vez de dois átomos da molécula normal ( $\text{O}_2$ ). A uma altura suficientemente elevada na estratosfera, os raios ultravioleta solar ( $\nu \approx 242 \text{ nm}$ ) são suficientemente intensos para dissociar (isto é, romper) a molécula de oxigênio produzindo dois átomos de oxigênio atômico (O), de acordo com a reação:



onde  $hv$  corresponde a energia da luz ultravioleta necessária para que a dissociação ocorra. A produção do ozônio é realizada na etapa seguinte, através da associação de um átomo de O com uma molécula de  $\text{O}_2$ , na presença de um terceiro corpo M:



onde M pode ser  $\text{N}_2$  ou  $\text{O}_2$ , necessários para o balanço de energia na reação. O ozônio criado pode ser dissociado pela radiação UV com comprimento de onda menor que 320 nm:



Com uma concentração de M suficiente, o oxigênio atômico produzido pela reação (3) reage rapidamente com a molécula de oxigênio (2), formando novamente o ozônio. As reações (2) e (3) formam um ciclo onde não há perdas dos componentes, tendo como resultado a absorção da radiação solar, de modo que este ciclo é muito eficiente em remover a radiação UV do espectro solar. No entanto, um modelo de perfil de ozônio baseado somente na química dos oxigenados apresenta discrepância quando comparado com os dados observacionais. Estas discrepâncias são atribuídas a dois fatores chaves. Primeiro, a química do ozônio envolve outras espécies químicas além dos oxigenados. Ciclos catalíticos envolvendo radicais livres de hidrogênio, nitrogênio e cloro interferem grandemente na concentração da família dos oxigênio ímpares ( $\text{O}_x \equiv \text{O} + \text{O}_3$ ), tornando a concentração do ozônio dependente de uma grande cadeia de reações químicas. O segundo fator é a dinâmica atmosférica. Abaixo de 30 km, onde a coluna de ozônio



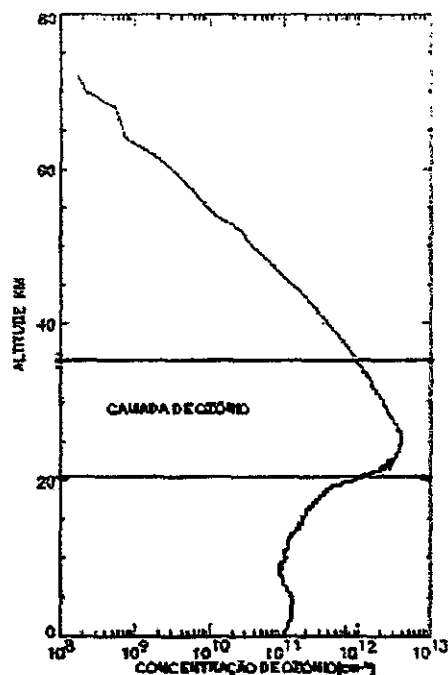


Fig. 2 - Perfil típico e a formação da camada de ozônio.

Fonte: Morris (2000, p.)

está concentrada, o tempo de vida fotoquímico do  $O_3$  é suficientemente longo para que este seja transportado pela circulação atmosférica, passando então por locais com diferentes composições químicas. Do equilíbrio entre produção e perda resulta a concentração do ozônio em estado estacionário, ou seja, aquela que deve ser observada através das medidas. Um perfil em condições normais, apresentando a camada de ozônio está na Figura 2. A concentração do ozônio não é a mesma em diferentes alturas, porque os processos de produção e perda têm intensidades diferentes a diferentes alturas. O próprio processo de produção do  $O_3$  atenua a intensidade do ultravioleta de cima para baixo e o que resulta é uma concentração de ozônio que é máxima numa certa altura, em torno de 30 km, diminuindo rapidamente para cima e para baixo. Surge assim, o conceito de camada de ozônio, isto é, uma fatia da atmosfera onde a concentração de  $O_3$  é relativamente elevada em relação ao resto da atmosfera. É comum o uso deste termo, camada de ozônio, estando já consagrado na literatura mundial (Kirchhoff, 1995; Salby, 1996).

Moléculas de ozônio são produzidas continuamente na estratosfera, principalmente sobre a região equatorial, onde o fluxo de radiação solar UV e a dissociação do O<sub>2</sub> são maiores e transportadas para as regiões polares. O tempo de vida do ozônio varia consideravelmente com a altitude. Na baixa estratosfera seu tempo de vida é cerca de várias semanas, nestas altitudes, a sua distribuição é controlada pelos processos dinâmicos. A medida que aumenta a altura, o tempo de vida decresce para cerca de 1 dia em torno de 30 km, para somente 1 hora na estratopausa (12 km de altitude). Assim, na alta estratosfera e na mesosfera, a distribuição de ozônio é controlada principalmente pelos processos fotoquímicos.

A medida da coluna total de ozônio na atmosfera é normalmente apresentada em unidades Dobson. A coluna total de ozônio é definida como sendo a quantidade de ozônio contida em uma coluna vertical com uma base de 1 cm<sup>2</sup>, calculada para a condições padrão de temperatura e pressão (CNTP), cujos valores são expressos em atmosfera-centímetro (atm-cm). Porém, o que mais se utiliza é o miliatmosfera-centímetro, o qual é conhecido como unidade Dobson (UD). A Figura 3 apresenta a distribuição do ozônio total em função da latitude obtida com dados do satélite Earth Probe (EP), com o equipamento Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS). Valores típicos variam entre 230 e 500 UD, com uma média global de aproximadamente 300 UD, ou seja, se toda a coluna de ozônio fosse colocada próximo a superfície da Terra, sua espessura seria menor do que meio centímetro (Solby, 1996). Embora a distribuição de ozônio na coluna não tenha uma distribuição uniforme, cerca de 90% do O<sub>3</sub> atmosférico encontra-se na estratosfera.

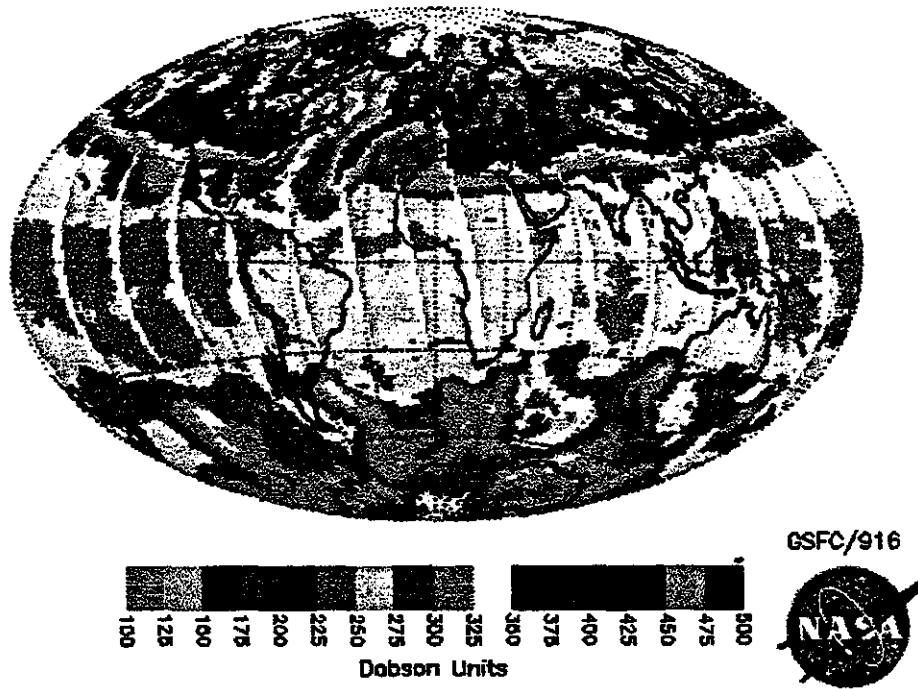


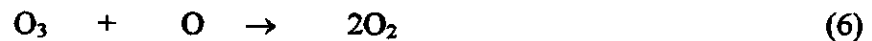
Fig. 8.3 - Coluna total de ozônio global medida pelo EP/TOMS para o dia 10 de março de 1998.  
 Fonte: GSFC/NASA (2000)

### 3. DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO

Até o início da década de 70 não se imaginava que a atividade humana poderia alterar de alguma forma a camada de ozônio. Em 1973 Rowland e Molina mostraram que uma grande classe de compostos inertes conhecidos como cloroflourcarbonetos (CFCs) eram transportados para a estratosfera por movimentos convectivos de ar. Na estratosfera, estes compostos poderiam absorver radiação solar de maior energia e liberar átomos de cloro. Uma vez liberado, o cloro poderia destruir o ozônio estratosférico através de uma série de reações catalíticas. Entre os CFCs, destacam-se o CFC-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) e o CFC-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), os mais abundantes CFCs na atmosfera e que fornecem cloro para as reações catalíticas de destruição do ozônio, como na reação abaixo (Kirchhoff, 1988):



cujo resultado final será:



Neste ciclo fechado, as espécies Cl e ClO permanecem inalteradas, de modo que o átomo de cloro pode destruir muitas moléculas de ozônio antes de sofrer uma reação que o tire do ciclo. Hoje tem-se que o bromo proveniente dos halons usados em extintores também podem atingir a estratosfera, resultando em um poder destrutivo maior do ozônio.

Halocarbonos é um termo genérico para designar um grupo de gases produzidos pelo homem contendo carbono e halogênios (cloro, flúor e bromo). Neste grupo incluem-se os (CFCs) e os halons. Na troposfera, os halocarbonos são inertes, não tóxicos, não inflamáveis, sem odor e sem cor. No entanto, quando estes gases atingem a estratosfera, particularmente entre 19 e 23 km de altura, a radiação ultravioleta de alta energia libera

os átomos de cloro ou bromo. Estes átomos destroem a molécula de ozônio de modo catalítico. O Protocolo de Montreal assinado em 1987 e já com vários aditivos, propôs um corte programado na emissão dos CFCs e halons, o que vem se refletindo na lenta diminuição dos CFCs na atmosfera. No entanto, devido a longa vida destas espécies na troposfera (CFC-11: 65 anos e CFC-12: 130 anos) e dado estoque ainda existente, torna-se difícil prever como será a diminuição destas espécies na atmosfera (Bojkov, 1995). A Figura 4 mostra a variação das concentrações do CFC-11 e CFC-12, obtida a partir de medidas realizadas em várias estações do Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory/National Oceanic and Atmospheric Administration (CMDL/NOAA).

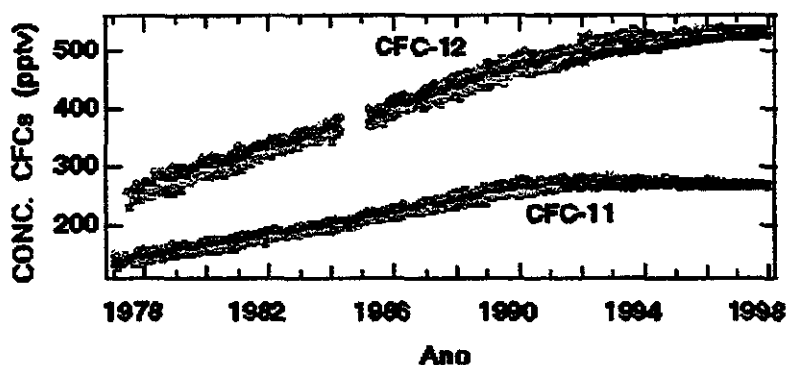


Fig. 4 - Variação temporal da concentração do CFC-11 e CFC-12 na troposfera medidas em partes por trilhão em volume (pptv), a partir de várias estações da rede CMDL/NASA.

Fonte: Hofmann and Peterson, (1998, p. )

A perda de ozônio é especialmente grande sobre o continente antártico, formando o conhecido “buraco de ozônio”. Esta destruição do ozônio deve-se a existência do vórtice circumpolar estratosférico, o qual não permite a penetração de massas de ar de

médias latitudes, ricas em ozônio na região polar. Este vórtice produz temperaturas muito baixas (menores que  $-80^{\circ}\text{C}$ ), o que favorece a formação de nuvens de partículas de gelo na estratosfera polar, onde os átomos de cloro e bromo são aprisionados em compostos mais estáveis (compostos reservatórios). Quando do retorno da luz solar no

início da primavera, os átomos de cloro e bromo presos nestes reservatórios são liberados, convertendo-se em espécies ativas. Estas podem então destruir as moléculas de ozônio com grande eficiência. A mesma destruição não é tão intensa no Ártico devido a duas razões: a) as temperaturas na estratosfera raramente são mais baixas que



Fig. 5 - Distribuição da coluna total de ozônio obtida pelo satélite EP/TOMS para a região da Antártica para 10 março de 1998.

Fonte: NASA/GSFC (2000)

-80°C devido a constante troca de massas de ar com massas de latitudes médias; e b) o desaparecimento do vórtice polar no início da primavera, antes da luz solar causar grande destruição do ozônio em larga escala (WMO, 1995). A Figura 5(a) apresenta a distribuição da coluna total de ozônio na região polar obtida pelo satélite EP/TOMS para 10 de março de 1998, dia em que não se tem a formação do buraco de ozônio nesta região, com valores em torno de 300 UD na região Antártica. Já a Figura 5(b), para o

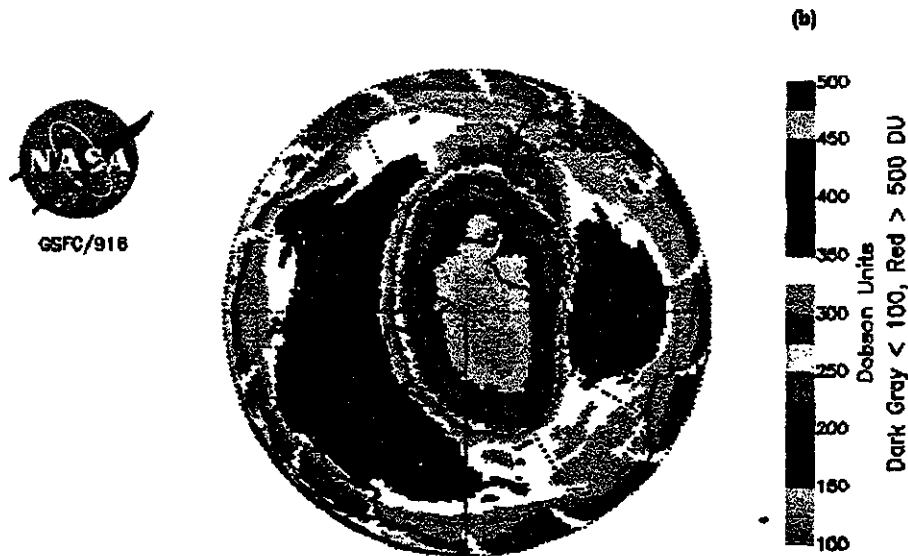


Fig. 6 - Distribuição da coluna total de ozônio obtida pelo satélite EP/TOMS para a região da Antártica para 10 outubro de 1998, onde pode ser visto o buraco de ozônio, com seu formato oval e valores inferiores a 200 UD na coluna total.

Fonte: NASA/GSFC (2000)

dia 10 de outubro de 1998, observa-se a formação do buraco de ozônio na região, com um formato oval característico, onde o buraco de ozônio é definido para valores inferiores a 200 UD. Na região central a coluna total apresenta valores inferiores a 100 UD, enquanto que o contorno mais externo tem-se uma coluna de 250 UD.

Paralelo as evidências da destruição do ozônio nas regiões polares, os cientistas também observaram uma diminuição na camada de ozônio em termos globais. Esta diminuição é considerável, estando em torno de 4% por década, sendo que as regiões de média e altas latitudes apresentaram uma queda cumulativa de aproximadamente 10% nos últimos 20 anos.

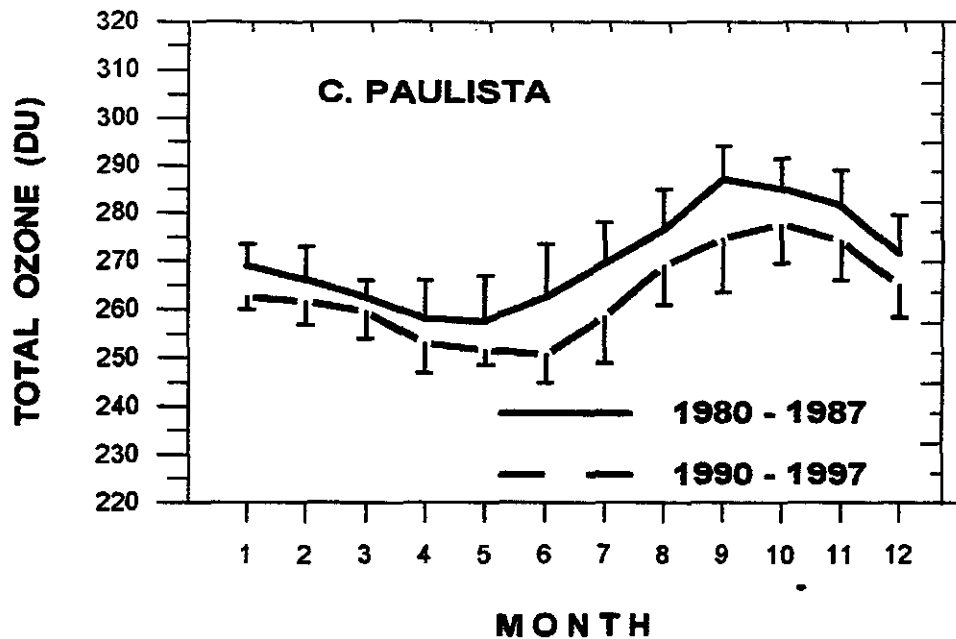


Fig. 7 - Médias mensais da coluna total de ozônio nos períodos 1980-1987 e 1990-1997, medidas em Cachoeira Paulista, SP, utilizando-se um espectrofotômetro Dobson.

Fonte: Sahai et al. (1999, p. )

O INPE desenvolve importante programa de observações da camada de ozônio no Laboratório de Ozônio, mantendo no território nacional uma rede de observatórios da camada de ozônio e de radiação ultravioleta. Entre os instrumentos utilizados para estudo em solo do ozônio estratosférico tem-se os espectrofotômetros Brewer e Dobson (coluna total de ozônio e radiação UV), Radiômetro GUV (radiação UV em 5 bandas), Solar Light (radiação UV em banda larga). A Figura 6 mostra a coluna total de ozônio utilizando-se um espectrofotômetro Dobson instalado no INPE em Cachoeira Paulista, SP. São comparados as médias mensais dos períodos 1980-1987 e 1990-1997 (Sahai et al., 1999). Esta comparação mostra uma diminuição nos valores da coluna total de ozônio sobre esta localidade, a qual não sofre influência do buraco de ozônio, evidenciando então a queda no ozônio global. Fora do Brasil, foram instalados ainda equipamentos em um observatório em La Paz, na Bolívia, para obter dados nos Andes, e



também em Punta Arenas, região mais austral do continente, com o objetivo de observar a influência do Buraco da Camada de Ozônio na região do cone sul.

#### **4. CAMADA DE OZÔNIO E RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA**

A radiação ultravioleta compreende a faixa entre 100 e 400 nm no espectro eletromagnético. Esta faixa é subdividida em três regiões: UV-A, entre 400 e 320 nm, UV-B entre 320 e 280 nm, e a UV-C, entre 280 e 100 nm. A radiação UV-A atinge a superfície terrestre, não sendo absorvida eficientemente por nenhum dos constituintes atmosféricos, porém uma exposição elevada contribui significativamente para a ocorrência de danos biológicos, tais como o envelhecimento precoce da pele e a formação da catarata ocular. Já a radiação UV-B é fortemente absorvida pela camada de ozônio, causando uma grande variação na intensidade de radiação entre 280-320 nm que atinge a superfície. A faixa mais energética, a radiação UV-C é totalmente absorvida na atmosfera terrestre (Kirchhoff, 1995).

A diminuição ou a destruição da camada de ozônio teria consequências muito danosas para a humanidade. Em condições sem nebulosidade estima-se que a redução em 1% na camada de ozônio resulta num acréscimo em torno de 1,3% na intensidade da radiação UV-B. O aumento da radiação UV-B traria danos consideráveis, não só para os humanos, mas também para as outras formas de vida e para a química atmosférica. Nos humanos, os efeitos mais citados devido ao aumento desta radiação são: um aumento dos casos de câncer da pele, danos ao DNA e no sistema imunológico. Alguns efeitos são em função da dose total recebida, enquanto outros dependem de um dado limiar cumulativo a ser atingido (WMO, 1995).

Pode-se obter uma avaliação da importância da absorção da radiação pelo ozônio através da avaliação da probabilidade da radiação UV em gerar algum dano biológico através da alteração do DNA, o que é denominado de espectro de ação (“action spectrum”). A resposta do organismo pode ser desde um eritema (queimadura do Sol) até a alterações no DNA, tanto nos animais como nos vegetais. A Figura 7 apresenta os

fluxos de radiação ultravioleta solar (UV-B) em quatro diferentes alturas: no topo da atmosfera (acima de 100 km), 20 km, 30 km e na superfície, e o espectro de ação sobre o DNA. Devido a atmosfera e a camada de ozônio, o fluxo diminui para alturas mais menores e a radiação UV praticamente não atinge a superfície. Para radiação com comprimentos de onda menores que 290 nm, a intensidade na superfície é cerca de 350 milhões de vezes mais fraca do que no topo da a atmosfera. Felizmente onde o DNA pode ser danificado, o ozônio absorve fortemente. A linha vermelha representa o fluxo de radiação UV para uma queda de 10% na camada de ozônio, o que corresponderia a um incremento no espectro de ação em torno de 22%.

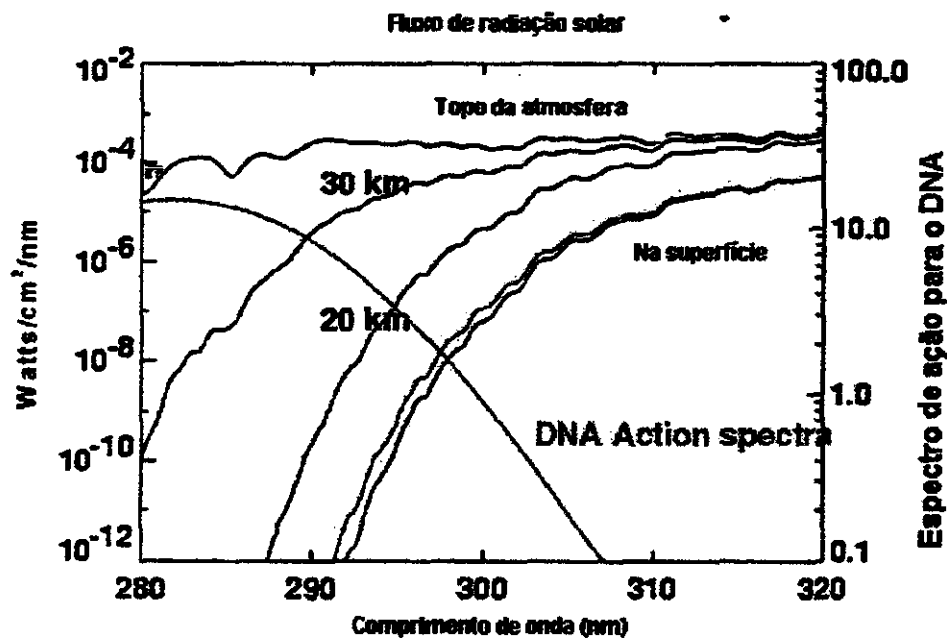


Fig. 8 - Fluxo de radiação solar para várias alturas (topo da atmosfera, 20km, 30 km e na superfície) em função do comprimento de onda e o espectro de ação para dano ao DNA (azul) e o fluxo para uma diminuição de 10% na camada de ozônio (vermelho).

Fonte: Newman (2000, p. )

O fitoplâncton marinho, elemento básico da cadeia alimentar dos mares, é obrigado a permanecer próximo a superfície das águas para utilizar a radiação solar como fonte de

energia. Além disso, eles são um grande sumidouro de CO<sub>2</sub> e qualquer efeito da radiação UV-B neste organismos teria graves conseqüências para a vida marinha, para o balanço do CO<sub>2</sub> na atmosfera, e portanto no clima. O delicado equilíbrio determinado entre as diversas espécies aquáticas e a radiação solar pode ser perturbado com o aumento da radiação UV-B (Kirchhoff, 1995, WMO, 1995).

Embora ainda existam poucos experimentos, a maior parte das pesquisas preocupa-se com plantas mais comuns em agricultura. Sabe-se que algumas plantas seriam danificadas, outras apresentariam produtividade diminuída, e ainda outras teriam sua reprodução perturbada. Experimentos em florestas de pinheiros mostraram um crescimento reduzido quando expostas a um aumento a radiação UV-B.

Na atmosfera as alterações seriam drásticas, pois com a ausência da camada de ozônio não haveria a estratosfera, provocando grandes alterações na distribuição térmica e na circulação da atmosfera. Na troposfera, a diminuição do ozônio provocaria grandes impactos na química desta região, uma vez que este participa da produção do radical OH, uma das moléculas mais reativas e importante na nossa atmosfera. A diminuição deste radical na troposfera, levaria ao aumento nas concentrações de metano, monóxido de carbono e outros gases, alguns deles responsáveis pelo efeito estufa (Kirchhoff, 1988).

41

## 5. SUMÁRIO

A molécula de ozônio (O<sub>3</sub>) é formada a partir da fotodissociação da molécula de oxigênio e a subsequente reação entre um átomo de oxigênio e uma molécula de oxigênio. A maior concentração de ozônio situa-se na estratosfera entre 20 e 35 km de altura formando a camada de ozônio.

A radiação UV pode destruir a molécula de ozônio, resultando em uma molécula de oxigênio e átomo de oxigênio, os quais podem recombinar regenerando a molécula de ozônio. Este ciclo consome radiação UV convertendo-a em calor.

A molécula de ozônio também pode ser destruída através de processos catalíticos, em ciclos envolvendo cloro, bromo e nitrogenados, os quais são regenerados nestes ciclos, podendo destruir novas moléculas de ozônio, enquanto que o ozônio é perdido neste processo.

Clorofluorcarbonetos (CFCs) emitidos para a atmosfera, penetram na estratosfera, onde são transportados da região tropical para as regiões de médias e altas latitudes. Ao atingir a alta estratosfera estes compostos são destruídos pela radiação solar, liberando átomos de cloro, que irão destruir as moléculas de ozônio em ciclos catalíticos.

O buraco de ozônio aparece durante a primavera no Hemisfério Sul sobre a Antártica, logo após o inverno na região. O buraco resulta de reações químicas envolvendo a formação de nuvens estratosféricas polares e CFCs, onde ocorre a liberação de átomos de cloro e bromo, os quais podem destruir as moléculas de ozônio através de reações catalíticas. Já existem evidências de uma diminuição na camada de ozônio global, com uma queda em torno de 4% por década. Com o Protocolo de Montreal está em curso uma diminuição na emissão dos CFCs para a atmosfera, com isto espera-se uma queda nos efeitos destes gases na destruição da camada de ozônio.

A radiação UV-B (280-320 nm) tem alto poder de danificar as moléculas de DNA. Uma maior exposição a esta radiação tende a aumentar os casos de câncer de pele e danos no sistema imunológico humano. Felizmente esta radiação é fortemente absorvida pelas moléculas de ozônio estratosféricas. Uma diminuição na camada de ozônio seria danoso não só para os homens, como para as plantas, animais e na própria atmosfera, alterando sua química e balanço térmico.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hofmann D J.; Peterson. *Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory – Summary Report N° 24*, Boulder, CO, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1998, 166p.

- Kirchhoff, V. W. J. H. Geoquímica da média e baixa atmosfera: impactos ambientais por deterioração da camada de Ozônio. *Geochimica Brasiliensis*, 2(1): 41-52, 1988.
- Kirchhoff, V. W. J. H. *Ozônio e Radiação UV-B*. Transtec Editorial. 66p. 1995.
- Morris, G. Morphology fo Ozone. In: Todaro, R. M. ed. *The Stratospheric Ozone Eletronic Textbook*. <http://see.gsfc.nasa.gov/see>. Abril,2000.
- Morris, G.; Gage, B.; Newman, P. A.; Aikin, A.; Willian, H.; Messers, F. C.; Larko, D.; Todaro, R. M. The Chemical/Thermal and Dynamical Structure of Earth Atmosphere. In: Todaro, R. M. ed. *The Stratospheric Ozone Eletronic Textbook*. <http://see.gsfc.nasa.gov/see>. Abril,2000.
- National Aeronautcs and Space Admenistration/Godard Space Fly Center Homepage: <http://jwocky.gsfc.nasa.gov>, 1999.
- Newman, P. A. An Introcdution to Stratospheric Ozone. In: Todaro, R. M. ed. *The Stratospheric Ozone Eletronic Textbook*. <http://see.gsfc.nasa.gov/see>. Abril,2000.
- Sahai, Y.; V. W. J. H. Kirchhoff, N. Paes Leme. Total ozone decreases in the tropics: evidende for larger in the 90's. *Journal Geophysics Researh*, Accepted, 1999.
- Stolarski, R. Polution of the Stratosphere. In: Todaro, R. M. ed. *The Stratospheric Ozone Eletronic Textbook*. <http://see.gsfc.nasa.gov/see>. Abril,2000.
- Salby, M. L. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. Academic Press, Inc. San Diego. 630p. 1996.
- World Meteorological Organization (WMO). *The changing ozone layer*. Rumen D. Bujkov. 25p. 1995.

## **CAPÍTULO 9**

# **MONITORAMENTO DA COBERTURA VEGETAL ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE**

**Flávio Jorge Ponzoni\***

**Evlyn M.L. de Moraes Novo**

**Lênio Soares Galvão**

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [flavio@ltid.inpe.br](mailto:flavio@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>9-5</b>
<b>1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>9-7</b>
<b>2. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>9-8</b>
2.1 – CONCEITUAÇÃO .....	9-8
2.2 – CONCEITOS RADIOMÉTRICOS BÁSICOS .....	9-12
2.3 – COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS .....	9-16
2.4 - DA ELABORAÇÃO DE IMAGENS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE .....	9-19
<b>3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>9-24</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>2.1.1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS QUATRO ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO .....</b>	<b>9-9</b>
<b>2.1.2 – FLUTUAÇÕES DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO DE UMA ONDA .....</b>	<b>9-10</b>
<b>2.1.3 – O ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO E SUAS PRINCIPAIS REGIÕES .....</b>	<b>9-11</b>
<b>2.1.4 – INTENSIDADE DE ENERGIA SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA NA SUPERFÍCIE TERRESTRE E DE UM CORPO NEGRO A 6000°K .....</b>	<b>9-11</b>
<b>2.2.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS POSSÍVEIS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA SOBRE UM ALVO .....</b>	<b>9-12</b>
<b>2.2.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO CONCEITO DE RADIÂNCIA MEDIDA ATRAVÉS DE UM SENSOR REMOTAMENTE LOCALIZADO .....</b>	<b>9-14</b>
<b>2.3.1 – GRÁFICO CONTENDO AS CURVAS DE REFLECTÂNCIA PARA ALGUNS RECURSOS NATURAIS .....</b>	<b>9-18</b>
<b>2.4.1 – REPRESENTAÇÃO DE UMA MATRIZ BIDIMENSIONAL COM N LINHAS E M COLUNAS .....</b>	<b>9-20</b>
<b>2.4.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COLETA DE DADOS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE MEDIANTE UM SENSOR IMAGEADOR .....</b>	<b>9-21</b>
<b>2.4.3 – PROCEDIMENTO DE ELABORAÇÃO DE UMA COMPOSIÇÃO COLORIDA .....</b>	<b>9-22</b>



## 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma das aplicações mais simples de dados obtidos por sensores remotamente situados é a elaboração de mapas temáticos. Mapas temáticos são representações cartográficas de temas específicos, principalmente aqueles relacionados aos recursos naturais existentes na superfície terrestre, como a água, os solos, a vegetação etc.

Qualquer pessoa, mesmo aquelas que não dispõem de qualquer formação técnica em qualquer área do conhecimento humano que lhes permita identificar as possibilidades nas quais se fundamenta a elaboração desses mapas temáticos, é fácil imaginar como esses mapas poderiam ser elaborados. Provavelmente, fotografias aéreas ou imagens de satélite registrariam de alguma forma os contornos dos temas de interesse e bastaria uma pessoa treinada para extrair esses contornos desses produtos e dar-lhes a forma de mapas. De fato, o procedimento é fundamentado nessa idéia intuitiva sobre como fazer um mapa temático a partir de fotografias aéreas ou imagens, mas existem intrínsecos vários conhecimentos e detalhes que devem ser levados em consideração, sem os quais nada do que foi imaginado se concretizará em mapas temáticos confiáveis.

Primeiramente é necessário compreender claramente quais objetivos o mapa temático a ser elaborado irá atender. Nessa compreensão está intrínseca a legenda que se pretende explorar, ou seja, quais os temas que deverão ser extraídos dos produtos de sensoriamento remoto (imagens e/ou fotografias aéreas). A definição da legenda é uma tarefa fundamental e nunca deve ser feita por uma única pessoa. Normalmente, vários especialistas de várias áreas e que de alguma forma participarão da elaboração do mapa em questão, sentam-se à mesa e passam muito tempo discutindo todas as possibilidades, independentemente do tipo de produto que será utilizado na extração dos dados de interesse. A definição desses produtos será feita após a definição da legenda.

Uma vez estabelecido o elenco de temas cujos contornos serão extraídos, segue a identificação do (s) produtos de sensoriamento remoto que será (ão) utilizado (s) e a escala de apresentação/ mapeamento que será adotada. Quando da escolha por imagens

orbitais, vários são os cuidados que devem ser tomados. Ainda, outros cuidados deverão se somar aos primeiros em função da extensão da área a ser mapeada.

No Brasil, temos mapeado áreas extensas da região amazônica, principalmente com o objetivo de identificar a ocorrência de incrementos nas áreas desmatadas. Objetivo semelhante tem sido cumprido nos mapeamentos dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica e de seus Ecossistemas Associados, que abrange 10 Estados da Federação localizados na região litorânea do país. Estes são exemplo de alguns mapeamentos intensivos e sistemáticos sobre os quais paira ainda muita desinformação sobre como são feitos, quais as limitações ainda existentes e quais os principais resultados que têm sido alcançados.

O objetivo deste trabalho é apresentar alguns detalhes e informações sobre os procedimentos que têm viabilizado o mapeamento da cobertura vegetal de extensas áreas no país.

## **2. FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

### **2.1. CONCEITUAÇÃO**

A definição clássica do termo *sensoriamento remoto* (SR) refere-se a um conjunto de técnicas destinado à obtenção de informação sobre objetos, sem que haja contato físico com eles. Para melhor compreender esta definição, faz-se necessário identificar os quatro elementos fundamentais das técnicas de SR, os quais podem ser representados através do esquema apresentado na Figura 2.1.1.

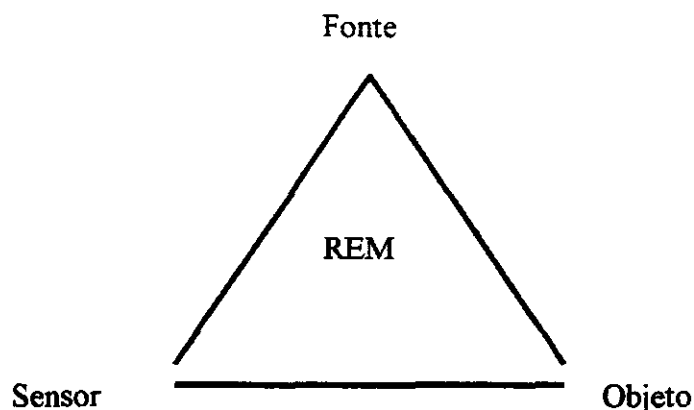
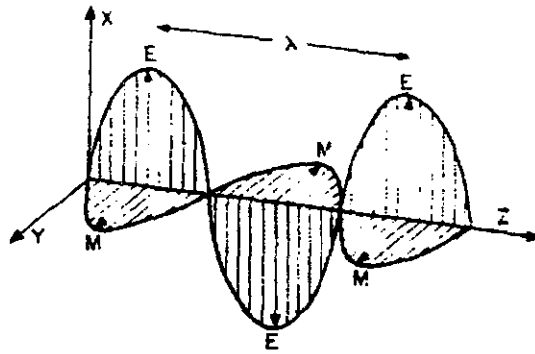


Fig. 2.1.1 - Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto.

No centro do triângulo deste esquema, encontra-se a Radiação Eletromagnética (REM), que é o elemento de ligação entre todos os demais que se encontram nos vértices. São eles, a *fonte* de REM, que para o caso da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto no estudo dos recursos naturais, é o Sol; o *sensor*, que é o instrumento capaz de coletar e registrar a REM refletida ou emitida pelo *objeto*, que também é denominado *alvo*, e que representa o elemento do qual se pretende extrair informação.

A partir deste esquema compreende-se que o elemento fundamental das técnicas de sensoriamento remoto é a REM, que no vácuo propaga-se à velocidade da luz e sua interação com o meio físico pode ser explicada através de dois modelos: o modelo corpuscular (ou quântico) e o ondulatório.

Sob uma perspectiva quântica, a REM é concebida como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, enquanto que sob uma perspectiva ondulatória, a REM se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos elétrico e magnético. A Figura 2.1.2 apresenta um esquema da representação dos campos elétrico e magnético e as oscilações mencionadas.



E= Campo Elétrico;

M= Campo Magnético;

XZ= Plano de excitação do campo elétrico;

YZ= Plano de excitação do campo magnético;

Z= Direção de propagação da onda eletromagnética;

$\lambda$ = Comprimento de onda;

Fig. 2.1.2 - Flutuações dos campos elétrico e magnético de uma onda.

FONTE: Novo (1989, p. 10)

No modelo ondulatório então a REM é caracterizada em comprimentos de onda que representam a distância entre dois pontos de igual intensidade dos campos elétrico e magnético. O conjunto de comprimentos de onda que compõem a REM é conhecido como *Espectro eletromagnético*, o qual é dividido didaticamente em um certo número de regiões espectrais, conforme apresentado na Figura 2.1.3.

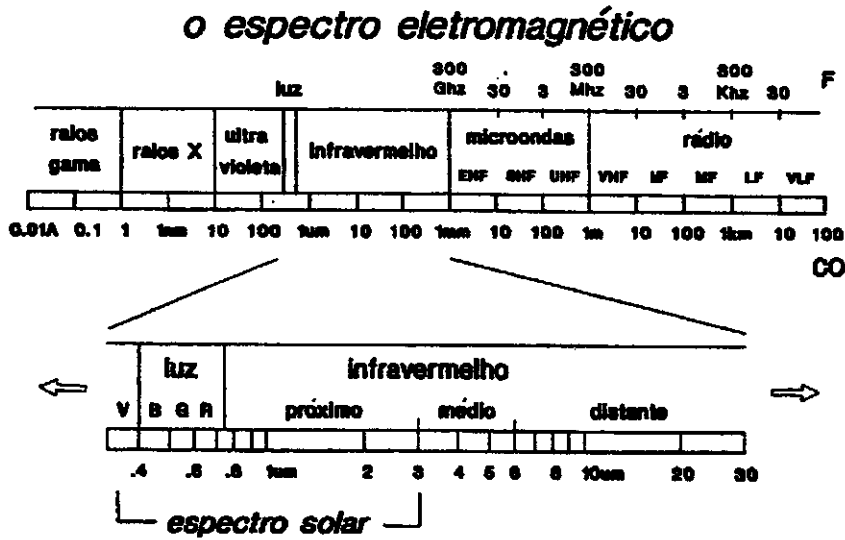


Fig. 2.1.3 - O espectro eletromagnético e suas principais regiões.

FONTE : Adaptado de Steffen et al. (1996, p. 3)

Cada fonte de REM possui espectros próprios de radiação. O Sol radia a REM segundo o gráfico apresentado na Figura 2.1.4.

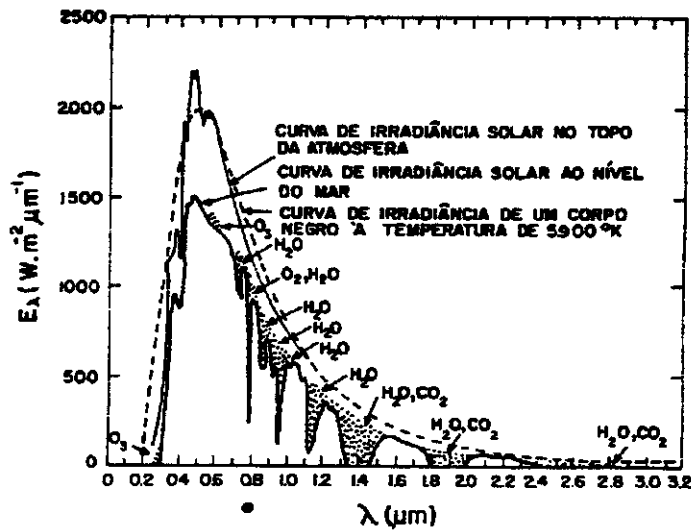


Fig. 2.1.4 - Intensidade de energia solar no topo da atmosfera na superfície terrestre e de um corpo negro a 6000° K.

FONTE: Adaptado de Swain e Davis (1978, p. 24)

No eixo x deste gráfico são encontrados os comprimentos de onda, enquanto que no eixo y, o parâmetro E pode ser compreendido como “intensidade” de REM emitida pela fonte. A linha tracejada representa então a “intensidade” emitida a cada comprimento de onda no topo da atmosfera, enquanto que a linha cheia que apresenta algumas descontinuidades, representa esta mesma “intensidade” agora na superfície terrestre.

Conforme pode ser observado, em ambas as linhas, as maiores intensidades de REM são identificadas na faixa de comprimentos de onda compreendida entre 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$ . Esta faixa foi apresentada na Figura 2.1.3 como sendo a região do visível (Luz), assim denominada pelo fato de que a maioria dos animais, assim como o homem, são capazes de perceber a REM refletida dos objetos que os rodeiam nesta região espectral.

As faixas mais comumente exploradas para fins do SR dos recursos naturais são: *visível*, *infravermelho próximo*, *infravermelho médio* e *microondas*.

## 2.2 CONCEITOS RADIOMÉTRICOS BÁSICOS

Para que se possa compreender melhor como se viabiliza a aplicação das técnicas de SR no estudo dos recursos naturais, faz-se necessária a apresentação de pelo menos quatro parâmetros radiométricos. O primeiro deles, refere-se à *Irradiância*. Em termos bastante simplificados, a *Irradiância* representa a intensidade do fluxo radiante, proveniente de todas as direções, que atinge uma dada superfície. A Figura 2.2.1 ilustra o aspecto geométrico mencionado.

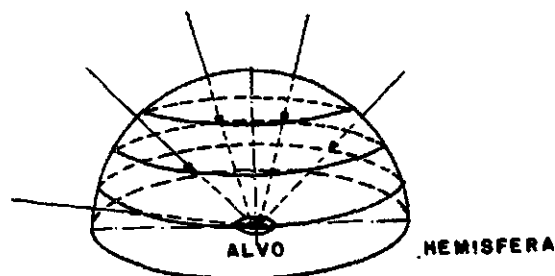


Fig. 2.2.1 - Representação gráfica dos possíveis ângulos de incidência sobre um alvo.

FONTE: PONZONI e DISPERATI (1995, p. 11)

Vale salientar que neste fluxo radiante estão contidos todos os diversos comprimentos de onda que são radiados pela fonte, segundo suas próprias características, assim como apresentado na Figura 2.1.4 para a fonte Sol.

Assim que um determinado fluxo radiante atinge uma superfície, ele sofre três fenômenos: reflexão, transmissão e absorção. Estes fenômenos são dependentes das características físico-químicas do próprio objeto, que definem as intensidades de reflexão, transmissão e absorção da REM em cada comprimento de onda incidente no objeto.

Imaginando então somente a porção refletida pelo objeto, um novo fluxo será originado em sentido contrário ao incidente, mas nas mesmas direções. A intensidade deste fluxo pode também ser quantificada e é expressa pela chamada *Excitância*.

Parte deste fluxo refletido pelo objeto pode ser coletado por um sensor localizado remotamente. O termo “parte” refere-se a dois aspectos: um de ordem geométrica e outro de ordem espectral. O de ordem geométrica refere-se por sua vez ao fato de que não há instrumentos capazes de registrar a *Excitância*, uma vez que seria necessário o desenvolvimento de um sensor que envolvesse todo o objeto, o que comprometeria a incidência da REM. Evidentemente poderiam ser desenvolvidos métodos que permitissem sua estimativa, mas outra solução foi adotada.

Para melhor compreender esta solução, a Figura 2.2.2 apresenta um esquema da trajetória da REM proveniente de um ponto da superfície de um objeto fictício.

Todo sensor possui uma abertura pela qual a REM refletida ou emitada pelos objetos passa em direção ao chamado “detetor”, que é o elemento que realmente “sente” a REM. Essa abertura possui dimensões variáveis e dependentes das características tecnológicas do instrumento ou da própria natureza das operações de coleta de dados. De qualquer forma, entre esta abertura e o ponto da superfície do objeto passa a ser

definido um cone por onde trafega a REM. Esse cone é denominado de *ângulo sólido* ( $\Omega$ ).

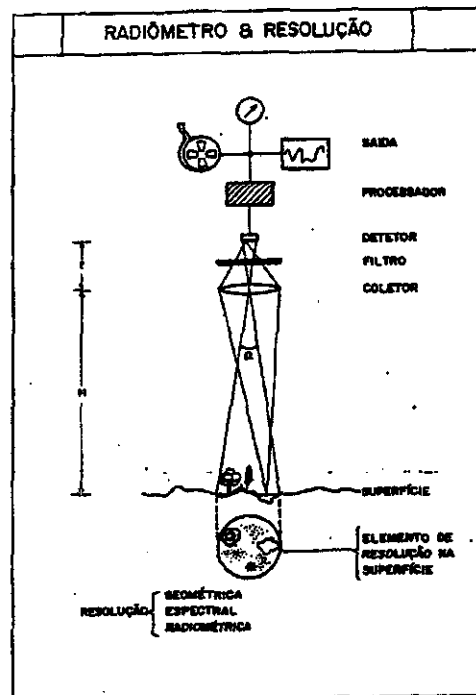


Fig. 2.2.2 - Representação esquemática do conceito de *Radiância* medida através de um sensor remotamente localizado.

FONTE : Steffen et al. (1996, p. 12)

Fica claro que somente a REM que estiver contida neste *ângulo sólido* será sentida pelo detector, mas ao mesmo tempo, o sensor não observa somente um ponto na superfície e sim uma determinada área desta superfície, a qual é constituída por infinitos pontos. Assim, o que realmente é medido pelo sensor é a intensidade de todos os infinitos fluxos contidos nos *ângulos sólidos* dos pontos da área da qual ele é capaz de observar. Esta intensidade é denominada de *Radiância*. A *Radiância* é portanto a intensidade do fluxo radiante por unidade de ângulo sólido.

O conceito de *Radiância* pode ser comparado ao conceito de brilho, ou seja, um objeto é considerado mais brilhante quanto maior for sua *Radiância* medida.



O aspecto espectral refere-se ao fato de que a composição espectral do fluxo que deixa a superfície sofre alterações que são dependentes das suas características físico-químicas. Assim, a *Radiância* medida por um sensor pode ser determinada para um intervalo específico de comprimentos de onda (região ou banda espectral).

No esquema apresentado na Figura 2.2.2, fica claro que o sensor “observa” instantaneamente uma determinada porção da superfície do terreno. A área desta superfície define o chamado elemento de resolução espacial. Desta área é registrado um único valor de *Radiância* para cada faixa ou região espectral que o sensor é capaz de perceber a REM refletida ou emitida pelos objetos contidos em seu elemento de resolução espacial.

Nota-se portanto a existência de dois principais aspectos intrínsecos às técnicas de SR: o aspecto espacial e o aspecto espectral. Estes aspectos são comumente denominados de domínios espacial e espectral, respectivamente.

O domínio espacial é expresso pela resolução espacial do sensor, a qual é definida como a menor área da qual o sensor é capaz de registrar a REM. O domínio espectral refere-se à largura da faixa espectral que este mesmo sensor é sensível. Faixas mais largas conferem uma resolução espectral menor ao sensor. Contrariamente, elementos de resolução espacial menores, conferem aos sensores, maiores resoluções espaciais.

Existe ainda um terceiro domínio que é o domínio temporal, o qual refere-se ao período de tempo compreendido entre duas coletas de dados sobre uma mesma superfície do terreno. Este domínio é expresso pela resolução temporal da plataforma que sustenta o sensor, podendo ser ela uma haste portátil, uma aeronave ou até mesmo um satélite. Diz-se que um sensor possui maiores resoluções temporais, quanto menores forem os períodos de tempo entre coletas de dados.

Pelo já exposto, pode ser verificado que a *Radiância* é também dependente da intensidade do fluxo radiante que atinge o objeto (*Irradiância*). Quanto maior for essa

intensidade, maior também será aquela referente ao fluxo que deixa o objeto, e conseqüentemente, maior será a *Radiância*. Para que se conheça as propriedades intrínsecas dos objetos em termos de sua interação com a REM, faz-se necessária a apresentação de mais um conceito importante que é o da *Reflectância*.

A *Reflectância* representa uma relação entre a *Radiância* refletida de um dados objeto pela *Irradiância*. Nota-se portanto que a *Reflectância* expressa as propriedades intrínsecas dos objetos em refletir a REM sobre eles incidente. Ela é expressa em percentagem, possuindo então um caráter relativo.

É através da *Reflectância* que são estudadas as características intrínsecas dos objetos em refletir a REM incidente, pois ela é dependente das suas propriedades físico-químicas. Este estudo é denominado de estudo do *Comportamento espectral de alvos*, cujos principais aspectos serão apresentados à seguir.

### **2.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS**

O termo *Comportamento espectral de alvos* tem sido atribuído pelos profissionais que atuam na aplicação do SR no estudo dos recursos naturais, como ao estudo da *Reflectância espectral* destes recursos, quer sejam: vegetação, solos, minerais e rochas, água, etc.

Em termos mais abrangentes, estudar como um objeto se comporta espectralmente, deveria contemplar os três fenômenos já mencionados que ocorrem após a incidência da REM sobre um dados objeto: reflexão, transmissão e absorção. Assim, o comportamento espectral de um alvo só é plenamente compreendido quando são estudadas suas propriedades de refletir, transmitir e absorver a REM. Contudo, serão enfatizadas aqui as propriedades de reflexão dos alvos (recursos naturais), uma vez que a maioria dos sensores atualmente disponíveis para o estudo dos recursos naturais, utilizam a REM refletida por eles.

A caracterização de como e de quanto um objeto reflete de REM pode ser feita em diversos níveis e formas. Nos primeiros estão incluídos os chamados níveis de aquisição de dados, os quais podem ser de laboratório, campo, aéreo e orbital. Em cada um destes níveis podem ser adotadas variadas formas, as quais incluem as chamadas geometrias de iluminação e de visada. A primeira refere-se ao posicionamento espacial da fonte de REM em relação ao objeto, enquanto que a segunda refere-se ao posicionamento espacial do sensor.

Os níveis e as formas condicionam as caracterizações tornando seus resultados específicos para as situações nas quais foram concebidos. Este fato torna imprescindível que em qualquer caracterização da *Reflectância espectral* de um objeto, sejam bem descritas as condições de iluminação e visada adotadas, tanto no que se refere aos domínios espacial, espectral, temporal e ainda das suas geometrias.

Os aspectos que serão apresentados a seguir referem-se às características básicas dos principais recursos naturais em refletir a REM sobre eles incidente. A Figura 2.3.1 ilustra um gráfico contendo as curvas de *Reflectância* de alguns recursos naturais.

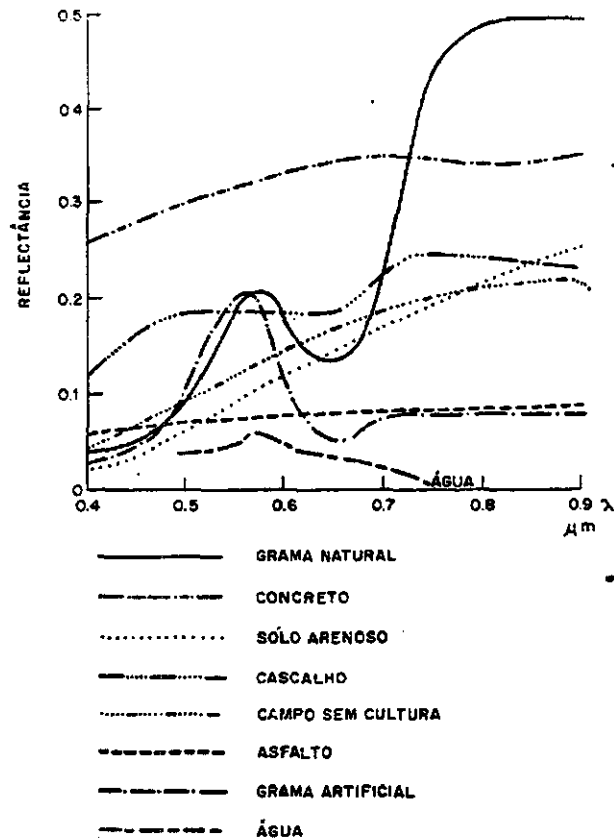


Fig. 2.3.1 - Gráfico contendo as curvas de *Reflectância* para alguns recursos naturais.

Como pode ser observado nesta Figura 2.3.1, na região do visível (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) a maioria das curvas dos alvos apresentados encontram-se muito próximas entre si, em contraste com um maior distanciamento entre elas na região espectral do infravermelho próximo (0,7 a 0,9  $\mu\text{m}$ ). Isto indica que na região do visível, os alvos apresentam-se “parecidos”, enquanto que na região do infravermelho eles podem ser mais facilmente individualizados. Nos pontos de interseção entre as curvas, os quais ocorrem com alguma frequência em pontos específicos do espectro, diz-se que os alvos apresentam a mesma Reflectância, ou seja, eles assumem uma mesma “aparência” quando observados mediante alguma técnica de SR.

Estas curvas de *Reflectância* são curvas médias que somente ilustram as formas típicas dos alvos apresentados, refletirem a REM sobre eles incidente. Servem então somente de base para formar uma idéia da reflexão destes alvos, não sendo possível sua

generalização, uma vez que também não foram fornecidas informações adicionais sobre as condições (geométricas e dos próprios alvos) adotadas quando foram geradas. Esta forma típica é geralmente referenciada com o termo *Assinatura Espectral*.

Através da análise de curvas, como estas apresentadas na Figura 2.3.1, pode ser prevista a aparência de alvos em produtos de SR, tais como imagens orbitais e/ou fotografias aéreas. Esta aparência é expressa pela tonalidade (clara ou escura) assumida pelos alvos e dependendo do tipo de produto, ela ainda pode ser expressa pela cor e pela textura.

O conhecimento sobre o comportamento espectral de alvos é portanto fundamental para a extração de informações a partir de produtos de SR, quer sejam fotografias, ou imagens.

## **2.4 DA ELABORAÇÃO DE IMAGENS DA SUPERFÍCIE TERRESTRE**

Uma imagem é constituída pelos chamados *elementos de resolução*, que representam um valor relacionado com a *Radiância* de uma determinada superfície terrestre. A dimensão desta superfície é função das características do sensor e da plataforma que o sustenta, assim como ilustrado na Figura 2.2.2. Nesta Figura 2.2.2, o sensor estaria coletando a REM refletida de uma específica porção da superfície terrestre na qual encontram-se alvos distintos, cada um com suas próprias características de interagir com a REM incidente. Como resultado, o sensor registrará um único valor numérico relacionado à *Radiância* medida que apresentar-se-á como uma média das *Radiâncias* de todos os alvos contidos no elemento de resolução, o qual é costumeiramente denominado *pixel* (picture element).

O procedimento descrito acima deve ser encarado sob ponto de vista espectral, ou seja, a *Radiância* é medida numa determinada faixa ou região espectral, ou pode ser medida em diferentes regiões espectrais instantaneamente. O sensor pode então ser preparado para “sentir” a REM refletida pelos alvos contidos numa dada superfície em várias regiões espectrais. Assim, como resultado, seriam registrados tantos valores numéricos

quantas forem as regiões espectrais abrangidas pelo sensor, cada um deles proporcional ao “brilho” da superfície em cada destas regiões.

Para a elaboração de uma imagem pictórica de uma porção da superfície terrestre, o procedimento descrito acima pode ser repetido sistematicamente e de forma a cobrir pequenas áreas contíguas, ou seja, fazendo com que *pixels* sejam definidos no terreno um ao lado do outro. A *Radiância* de cada um deles passa a ser registrada nas regiões espectrais mais convenientes e os valores numéricos provenientes dessa medição são então representados na forma de uma matriz bidimensional com n linhas e m colunas, assim como mostrado na Figura 2.4.1.

x1y1	x2y1	x3y1	.....	xmy1
x1y2	x2y2	x3y2	.....	xmy2
x1y3	x2y3	x3y3	.....	xmy3
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
x1yn	x2yn	x3yn	.....	xmyn

Fig. 2.4.1 - Representação de uma matriz bidimensional com n linhas e m colunas.

Na Figura 2.4.2 encontra-se apresentado um esquema de um sensor orbital coletando dados da superfície terrestre. Neste esquema podem ser identificados um espelho oscilante o qual é responsável pela chamada “varredura” no sentido ortogonal ao deslocamento da plataforma que sustenta o sensor, os detetores, que são os elementos que efetivamente “sentem” a REM refletida dos *pixels* nas diferentes regiões espectrais (bandas espectrais) e entre ambos, o sistema óptico que é o responsável pela focalização e pelo direcionamento da REM sobre os detetores.

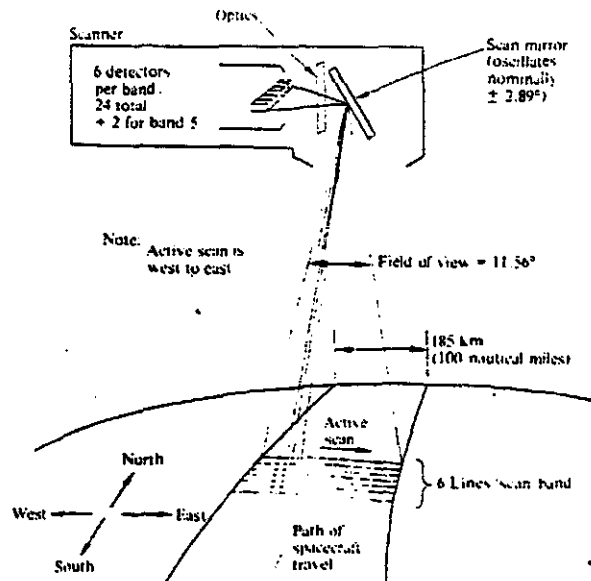


Fig. 2.4.2 - Representação esquemática da coleta de dados da superfície terrestre mediante um sensor imageador.  
 FONTE : Swain e Davis (1978, p.127)

A medida que a plataforma segue seu deslocamento sobre a superfície terrestre, o espelho oscila num plano ortogonal à esse deslocamento de forma síncrona, garantindo que assim que uma “linha” de *pixels* tenha sido observada e dela coletada a REM refletida, outra linha subsequente seja constituída. Vale salientar que são vários detetores “sentindo” a REM em igualmente várias regiões espectrais, originando portanto várias imagens da mesma porção da superfície terrestre.

Estas imagens podem ser apresentadas em duas formas básicas: a forma analógica (produto fotográfico) e a forma digital. Na forma analógica as imagens são processadas e impressas em papel fotográfico em escalas padrão, conforme normas específicas definidas por critérios cartográficos. As imagens provenientes de diferentes regiões espectrais de uma mesma superfície terrestre, podem então ser impressas separadamente, o que origina as chamadas imagens em preto e branco, ou em composições coloridas, as quais são constituídas por imagens de três regiões espectrais deferentes. Em cada uma destas imagens são dispostos filtros coloridos nas cores vermelho, verde e azul. A Figura 2.4.3 ilustra o procedimento de elaboração de uma composição colorida.

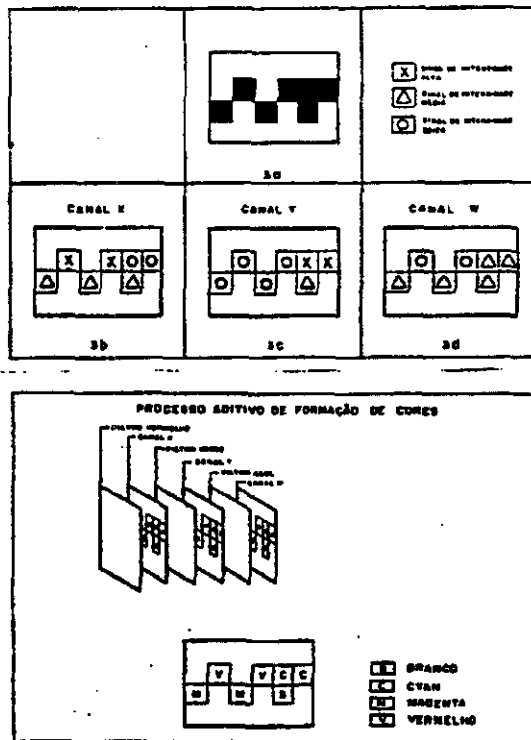


Fig. 2.4.3 - Procedimento de elaboração de uma composição colorida.

FONTE: Novo (1989, p. 100 e 102)

Nesta Figura 2.4.3, têm-se três imagens de uma mesma porção da superfície terrestre, sendo cada uma referente à uma região espectral fictícia, aqui denominadas canais X, Y e W. O sensor que gerou estas imagens era capaz de “sentir” a REM refletida pelos diferentes alvos desta superfície em três diferentes níveis de intensidade, aqui denominados alto, médio e baixo. Como consequência, considerando uma só destas imagens, os *pixels* que a compõe apresentaram três tipos de “brilho”, traduzidos na legenda por símbolos, mas que usualmente são substituídos por tons de cinza. Os níveis mais baixos são traduzidos por tons de cinza escuros e os níveis mais altos, por tons de cinza claros.

Imaginando que estas imagens pudessem ser colocadas uma frente à outra e que estas fossem ainda translúcidas. Na frente de cada uma destas imagens fossem colocados ainda os filtros coloridos conforme apresentado na Figura 2.4.3. Como resultado do “brilho” relativo entre os alvos em cada uma das imagens e do processo de adição de



cores, cada um dos *pixels* apresentaria cores e tonalidades diferenciadas, resultando portanto na chamada composição colorida. Vale salientar que as cores e tonalidades resultantes nada tem à ver com as cores reais dos alvos contidos nas cenas. Qualquer alteração promovida na ordem dos filtros ou imagens, implicaria na alteração total das aparências de cada um dos *pixels* da imagem.

Na forma digital, as imagens são gravadas em um meio magnético que podem ser fitas magnéticas e discos ópticos (CDs). Através de aplicativos especialmente desenvolvidos para este fim, as imagens podem ser manipuladas em computadores através das técnicas de processamento de imagens digitais que podem ser divididas em três grupos: técnicas de pré-processamento, técnicas de realce e técnicas de classificação.

Nas técnicas de pré-processamento, procura-se corrigir imperfeições radiométricas oriundas das diferenças de sensibilidade existente entre os diferentes detetores que “sentiram” a REM, assim como imperfeições de ordem geométrica ou espacial, as quais referem-se ao “posicionamento” dos *pixels* dentro das imagens, de forma a garantir uma aceitável representatividade dos pontos no terreno em relação aos padrões cartográficos estabelecidos.

As técnicas de realce têm com objetivo “melhorar” a qualidade visual das imagens através do aumento de contraste entre tons de cinza dos *pixels*. Existem aqui inúmeros procedimentos já desenvolvidos com essa finalidade, os quais fundamentam-se em critérios determinísticos e/ou estatísticos.

Finalmente as técnicas de classificação visam a identificação das chamadas *classes* ou *temas* que vão compor um dos principais produtos da extração de informações de produtos de SR que são os mapas temáticos. Essa identificação pode ser efetuada de diversas maneiras, incluindo os algoritmos supervisionados e os não-supervisionados. Nos primeiros, o intérprete ou especialista interessado na elaboração do mapa interage com o algoritmo fornecendo indicações sobre a localização dos temas de seu interesse. O algoritmo segue o processamento identificando todos os *pixels* que apresentam

características semelhantes daquelas apresentadas pelos *pixels* indicados pelo especialista. Como resultado, são ressaltados e individualizados cada *pixel* de cada tema ou classe em toda a imagem ou parte desta da qual se pretende extrair a informação (elaborar o mapa). Nos algoritmos não-supervisionados, é fornecido somente o número de classes que se pretende fracionar, a imagem e o algoritmo “decide” sobre a natureza de cada *pixel* segundo critérios estatísticos.

### **3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo. Edgard Blucher. 1989. 308p.

Ponzoni, F. J.; Disperatti, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos : INPE, 1995. 37 p. (INPE - 5619/PUD – 065)

Swain, P. H.; Davis, S. M. **Remote sensing : a quantitative approach**. Lafayette : McGraw-Hill, 1978.

Steffen, C. A.; Moraes, E. C.; Gama, F. F. Radiometria óptica espectral. In: Tutorial 1: Radiometria Espectral. Curitiba, 10-14 maio, 1993. p. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. **Tutorial**. São José dos Campos : INPE, 1993.

## **CAPÍTULO 10**

# **ATLAS DOS REMANESCENTES FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA**

**Flávio Jorge Ponzoni\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [flavio@ltid.inpe.br](mailto:flavio@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>10-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10-7</b>
<b>1. ATLAS DO REMANESCENTES FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA: UM EXEMPLO .....</b>	<b>10-9</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	10-9
<b>2. METODOLOGIA EMPREGADA .....</b>	<b>10-13</b>
2.1 BASE CARTOGRÁFICA .....	10-13
2.2 LEGENDA ADOTADA .....	10-17
2.3 PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADOS .....	10-20
2.4 INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS .....	10-24
2.5 DIGITALIZAÇÃO DOS “OVERLAYS” .....	10-26
2.6 EXATIDÃO DE CLASSIFICAÇÃO .....	10-28
2.7 CONFECÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS .....	10-30
2.8 PARECER TÉCNICO E AVALIAÇÃO .....	10-30
2.9 APRIMORAMENTOS PREVISTOS .....	10-30
<b>3. ATUALIZAÇÃO DOS ATLAS REFERENTE AO MAPEAMENTO 90-95</b>	<b>10-31</b>
<b>4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>10-32</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>2.3 – CURVA DE REFLECTÂNCIA TÍPICA DE UMA FOLHA VERDE SADIA</b> .....	<b>10-21</b>
---	--------------

## LISTA DE TABELAS

<b>2.1 – RELAÇÃO DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS .....</b>	<b>10-13</b>
<b>2.5 – RELAÇÃO DE TEMAS MAPEADOS NOS ANOS DE 1985, 1990 E 1995 .....</b>	<b>10-27</b>
<b>2.6 – ESQUEMA DE MATRIZ DE ERRO ELABORADA A PARTIR DOS DADOS DE CAMPO E DAS PLOTAGENS .....</b>	<b>10-29</b>

# **1. ATLAS DOS REMANESCENTES FLORESTAIS DA MATA ATLÂNTICA: UM EXEMPLO**

## **1.1. INTRODUÇÃO**

A Mata Atlântica e seus ecossistemas associados cobriam originalmente uma área de 1.290.692,46 quilômetros quadrados, que correspondia a cerca de 15% do território brasileiro, espalhados por 17 Estados (RS, SC, PR, SP, GO, MS, RJ, MG, ES, BA, AL, SE, PB, PE, RN, CE e PI).

O processo de ocupação do Brasil levou este Bioma a uma drástica redução de sua cobertura vegetal original, hoje disposta esparsamente ao longo da costa brasileira e no interior das regiões sul e sudeste, além de importantes fragmentos no sul dos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul e no interior dos estados do Nordeste.

A partir de meados da década de 1980 inicia-se no País uma intensa mobilização da sociedade civil pela preservação da Mata Atlântica. Inúmeras entidades ecológicas são criadas, sendo muitas delas voltadas especificamente para este fim. Este movimento social, no entanto, contava com poucas informações consistentes sobre a situação desta que foi a primeira floresta a sofrer o impacto do processo de colonização européia. Até então, muito pouco se sabia sobre sua área original, dimensão e distribuição espacial de seus remanescentes.

Com o objetivo de suprir esta lacuna de informações, consideradas fundamentais para orientar uma efetiva ação de conservação, a Fundação SOS Mata Atlântica, em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE e o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, elaborou o "Atlas dos Remanescentes Florestais do Domínio da Mata Atlântica", lançado em 1990. Este foi o primeiro mapeamento da Mata Atlântica realizado no País a partir da análise de imagens de satélite e incluiu, além das fisionomias florestais, os ecossistemas associados

(mangues e restingas), na escala 1:1.000.000, determinando suas áreas e estabelecendo uma referência inicial para o desenvolvimento de novos estudos.

A escala adotada neste primeiro trabalho apresentou limitações para análises mais detalhadas, pois algumas unidades de pequena extensão não puderam ser mapeadas. Além disto, polígonos de remanescentes descontínuos tiveram de ser agrupados pela sua densidade, oferecendo uma informação inicial, mas que necessitava de aprofundamento.

A fim de aprimorar estas informações, e atendendo a recomendação dos principais cientistas brasileiros atuantes na Mata Atlântica sobre a necessidade de se conhecer a dinâmica contemporânea dos remanescentes do Bioma, a Fundação SOS Mata Atlântica e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE deram início, em 1990, a um novo mapeamento, visando obter informações mais precisas, mais detalhadas e passíveis de atualização permanente.

Para tanto, foi ampliada a escala de trabalho para 1:250.000 e definido período de cinco anos, entre 1985 e 1990, para a avaliação da evolução das fisionomias florestais e ecossistemas associados no Domínio da Mata Atlântica em dez estados brasileiros onde o mapeamento anterior apontava a maior concentração de áreas preservadas (Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul).

Este projeto, denominado “Atlas da Evolução dos Remanescentes Florestais e Ecossistemas Associados no Domínio da Mata Atlântica - Período 1985-1990”, contou com apoio financeiro do BRADESCO S.A., das Indústrias Klabin de Papel e Celulose e Metal Leve e foi concluído em 1993.

Este mapeamento estudou a dinâmica dos remanescentes florestais e ecossistemas associados (vegetação de restinga e mangue) do Domínio da Mata Atlântica de áreas dos dez estados, da Bahia ao Rio Grande do Sul. As análises foram realizadas a partir de



técnicas de interpretação visual de imagens de satélite do sistema Landsat TM, em escala 1:250.000, levantamentos de campo para checagem e aferição dos dados e análise dos dados por especialistas com conhecimentos de campo e outras informações disponíveis. Os dados foram digitalizados e o cálculo das áreas foi efetuado através de um sistema de informação geográfica. A execução dos serviços de interpretação das imagens, digitalização e produção dos mapas foi realizada pela empresa Imagem Sensoriamento Remoto S/C Ltda.

A conclusão dos trabalhos de atualização foi submetida a pesquisadores e especialistas em Mata Atlântica, conhecedores da situação florestal dos Estados analisados pelo projeto, que emitiram pareceres técnicos a respeito dos mapeamentos produzidos.

Dando seqüência ao projeto, a Fundação SOS Mata Atlântica e o INPE iniciaram em 1996 a atualização dos dados com base em imagens de satélite de 1995, a fim de analisar a dinâmica do período 1990-1995.

Para este novo período foram atualizados os dados de nove estados, pois para a Bahia, avaliada no período anterior, não foi possível obter imagens de satélite sem cobertura de nuvens. Em termos metodológicos algumas inovações importantes foram introduzidas nesta nova etapa, como alteração no processamento das imagens de satélite, possibilitando maior precisão na separação entre as diferentes fisionomias vegetais. Graças a este aperfeiçoamento, além da maior confiabilidade dos dados de 1995, foi possível corrigir erros de interpretação verificados do mapeamento realizado nos anos 1985 e 90.

Outro aperfeiçoamento importante no trabalho foi a inclusão de uma avaliação estatística, supervisionada pelo INPE, que apontou o índice de exatidão global do mapeamento do Estado do Espírito Santo, com objetivo de indicar o percentual de confiabilidade das cartas.

Além dos aprimoramentos anteriormente citados, o Instituto Socio-ambiental, com quem a Fundação SOS Mata Atlântica assinou convênio em 1995, desenvolveu para o projeto um sistema de informação geográfica com a abrangência original das fisionomias vegetais que compõem o Domínio da Mata Atlântica, limites municipais e limites das unidades de conservação. Com base neste sistema, está sendo possível avaliar a dinâmica da Mata Atlântica de forma mais precisa e localizada, permitindo a definição de políticas de conservação mais objetivas e coerentes com cada situação. Este aperfeiçoamento permitiu, ainda, que fossem separados dos dados sobre as formações florestais da Mata Atlântica, dados de outros biomas, principalmente savana e estepe, que na etapa anterior estavam incluídos no cômputo geral.

É importante ressaltar, no entanto, que este estudo permite apenas uma avaliação quantitativa, em termos de área remanescente. Uma avaliação qualitativa, que verifique a situação das áreas florestais e ecossistemas associados identificadas no mapeamento, é fundamental para se obter uma análise adequada da real situação da Mata Atlântica no País.

O trabalho continuará verificando a dinâmica das ações antrópicas na Mata Atlântica, que envolve mais do que o acompanhamento do desmatamento. Envolve também o aprimoramento da legislação e de sua implementação, com a participação da sociedade civil, fiscalização eficiente, recuperação de áreas degradadas, pesquisa científica e conscientização da população. Espera-se que os resultados de mais esta etapa do projeto seja uma importante contribuição para o aperfeiçoamento das ações de conservação desenvolvidas pelas organizações públicas e privadas.

Em cada Estado, o projeto contou com a colaboração de órgãos ambientais, especialistas de universidades e instituições de pesquisa e entidades ambientalistas. A viabilização desta atualização só foi possível graças ao apoio financeiro recebido do BRADESCO S.A., da POLIBRASIL S.A. Indústria e Comércio e do Fundo Nacional do Meio Ambiente/MMA.

## 2. METODOLOGIA EMPREGADA

O mapeamento temático dos remanescentes florestais, de vegetação de restinga e de mangue do Domínio da Mata Atlântica, entre 1990 e 1995, abrangeu nesta fase nove Estados e utilizou técnicas de interpretação visual de imagens de satélite, levantamentos de campo e outras informações disponíveis sobre a área analisada.

### 2.1 BASE CARTOGRÁFICA

Como base cartográfica para os mapas temáticos produzidos, foram utilizadas folhas topográficas na escala 1:250.000 do mapeamento sistemático do Território Nacional realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), referente a todos os Estados incluídos neste mapeamento. As informações planimétricas, tais como estradas e rios, foram extraídas destas cartas e serviram para o georeferenciamento das imagens orbitais.

**TABELA 2.1 - RELAÇÃO DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS UTILIZADAS**

MIR	NOME DA CARTA	UF	CÓDIGO
381	GUANAMBI	BA/MG	SD-23-Z-B
397	JANAÚBA	BA/MG	SD-23-Z-D
398	PEDRA AZUL	BA/MG	SD-24-Y-C
399/400	ITAPETINGA	BA/MG	SD-24-Y-D
413	ARAÇUAÍ	MG	SE-23-X-B
414	ALMENARA	BA/MG	SE-24-V-A
415/416	GUARATINGA	BA/MG	SE-24-V-B
426	PIRAPORA3	MG	SE-23-X-C
427	CAPELINHA	MG	SE-23-X-D
428	TEÓFILO OTONI	ES/MG/BA	SE-24-V-C
429	NANUQUE	BA/ES/MG	SE-24-V-D
435	QUIRINÓPOLIS	MG/GO	SE-22-Z-A

436	UBERLÂNDIA	MG/GO	SE-22-Z-B
437	PATOS DE MINAS	MG/GO	SE-23-Y-A
438	TRÊS MARIAS	MG	SE-23-Y-B
439	CURVELO	MG	SE-23-Z-A
440	GUANHÃES	MG	SE-23-Z-B
441	GOVERNADOR VALADARES	MG/ES	SE-24-Y-A
442	SÃO MATEUS	BA/ES	SE-24-Y-B
447	PARNAÍBA	MS/GO/MG	SE-22-Y-D
448	ITURAMA	SP/MG/GO/MS	SE-22-Z-C
449	PRATA	MG/SP	SE-22-Z-D
450	UBERABA	MG/SP	SE-23-Y-C
451	BOM DESPACHO	MG	SE-23-Y-D
452	BELO HORIZONTE	MG	SE-23-Z-C
453	IPATINGA	MG	SE-23-Z-D
454	COLATINA	ES/MG	SE-24-Y-C
455	LINHARES	ES	SE-24-Y-D
460	ANDRADINA	MS/SP/MG	SF-24-Y-C
461	VOTUPORANGA	SP/MG	SF-22-X-A
462	SÃO JOSÉ DO RIO PRETO	SP/MG	SF-22-X-B
463	FRANCA	SP/MG	SF-23-V-A
464	FURNAS	MG	SF-23-V-B
465	DIVINÓPOLIS	MG	SF-23-X-A
466	PONTE NOVA	MG/RJ	SF-23-X-B
467	CACHOEIRO DO ITAPEMIRIM	ES/MG/RJ	SF-24-V-A
468	VITÓRIA	ES	SF-24-V-B
473	DRACENA	SP/MS	SF-22-V-D
474	ARAÇATUBA	SP	SF-22-X-C
475	ARARAQUARA	SP	SF-22-X-D
476	RIBEIRÃO PRETO	MG/SP	SF-23-V-C

477	VARGINHA	MG	SF-23-V-D
478	BARBACENA	MG	SF-23-X-C
479	JUIZ DE FORA	MG/RJ/ES	SF-23-X-D
480	CAMPOS	ES/RJ	SF-24-V-C
484	LOANDA	MS/PR/SP	SF-22-Y-A
485	PRESIDENTE PRUDENTE	MS/PR/SP	SF-22-Y-B
486	MARÍLIA	PR/SP	SF-22-Z-A
487	BAURU	SP	SF-22-Z-B
488	CAMPINAS	SP/MG	SF-23-Y-A
489	GUARATINGUETÁ	SP/MG	SF-23-Y-B
490	VOLTA REDONDA	MG/SP/RJ	SF-23-Z-A
491	RIO DE JANEIRO	RJ/MG	SF-23-Z-B
492	MACAÉ	RJ	SF-24-Y-A
494	AMAMBAÍ	MS/PR	SF-21-Z-D
495	UMUARAMA	PR/MS	SF-22-Y-C
496	LONDRINA	PR	SF-22-Y-D
497	CORNÉLIO PROCÓPIO	PR/SP	SF-22-Z-C
498	ITAPETINGA	SP/PR	SF-22-Z-D
499	SÃO PAULO	SP	SF-23-Y-C
500	SANTOS	SP	SF-23-Y-D
501	ILHA GRANDE	RJ/SP	SF-23-Z-C
503	GUAÍRA	MS/PR	SG-21-X-B
504	CASCAVEL	PR	SG-22-V-A
505	CAMPO MOURÃO	PR	SG-22-V-B
506	TELÊMACO BORBA	PR	SG-22-X-A
507	ITARARÉ	PR/SP	SG-22-X-B
508	IGUAPE	SP	SG-23-V-A
510	FOZ DO IGUAÇU	PR	SG-21-X-D
511	GUARANIAÇU	PR	SG-22-V-C

512	GUARAPUAVA	PR	SG-22-V-D
513	PONTA GROSSA	PR	SG-22-X-C
514/515	CURITIBA	SC/PR/SP	SG-22-X-D
516	PATO BRANCO	SC/PR	SG-22-Y-A
517	CLEVELÂNDIA	SC/PR	SG-22-Y-B
518	MAFRA	SC/PR	SG-22-Z-A
519	JOINVILLE	SC/PR	SG-22-Z-B
521	CHAPECÓ	SC/PR	SG-22-Y-C
522	ERECIM	SC/PR	SG-22-Y-D
523	LAGES	SC/PR	SG-22-Z-C
524	FLORIANÓPOLIS	SC	SG-22-Z-D
527	CRUZ ALTA	RS	SH-22-V-A
528	PASSO FUNDO	RS	SH-22-V-B
529	VACARIA	SC/RS	SH-22-X-A
530	CRICIÚMA	SC	SH-22-X-B
534	SANTA MARIA	RS	SH-22-V-C
535	CAXIAS DO SUL	RS	SH-22-V-D
536	GRAVATAÍ	SC/RS	SH-22-X-C
540	CACHOEIRA DO SUL	RS	SH-22-Y-A
541	PORTO ALEGRE	RS	SH-22-Y-B
542	CIDREIRA	RS	SH-22-Z-A
545	PEDRO OSÓRIO	RS	SH-22-Y-C
546	PELOTAS	RS	SH-22-Y-D
547	MOSTARDAS	RS	SH-22-Z-C

FONTE : IBGE (19 ) e DSG(19 )

## 2.2 LEGENDA ADOTADA

Considerando o caráter de monitoramento dos remanescentes florestais e ecossistemas associados do Domínio da Mata Atlântica, a legenda adotada no presente mapeamento incluiu os mesmos temas do mapeamento anterior (período 1985 e 1990), bem como outros itens que foram concebidos com o objetivo de permitir uma avaliação mais detalhada da dinâmica apresentada pelos itens já mapeados. Assim foi definida a seguinte legenda:

Remanescentes Florestais  
Desflorestamento  
Regeneração Florestal  
Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Decremento de Vegetação de Restinga  
Regeneração de Vegetação de Restinga  
Remanescentes de Vegetação de Mangue  
Decremento de Vegetação de Mangue  
Regeneração de Vegetação de Mangue

Considerando as diferenças ambientais inerentes à extensão geográfica abrangida pelo mapeamento, alguns temas abrangeram tipologias vegetais específicas em cada Estado. Assim, serão apresentados a seguir os temas e as tipologias a eles relacionados em cada Estado incluído no mapeamento.

### **Rio Grande do Sul**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista (Mata de Pinheiros) Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando vegetação rasteira, formações arbustivas e florestais;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **Santa Catarina**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Mista (Mata de Pinheiros), Floresta Estacional Decidual, Floresta Ombrófila Densa e a Savana Gramíneo-lenhosa;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando a Floresta Ombrófila de Terras Baixas, ou Restinga Higrófila;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **Paraná**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Semidecidual, assim como as transições entre estas;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando formações arbustivas e florestais. Sua discriminação foi feita com base nos limites visíveis de vegetação nas imagens e também de acordo com a distribuição espacial dos cordões litorâneos arenosos livres de ação antrópica. Foram incluídas nesta classe as áreas de Floresta Ombrófila Densa das terras baixas, ou Restinga Higrófila;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **São Paulo**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Semidecidual, assim como as transições entre estas;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando formações arbustivas e florestais.



Sua discriminação foi feita com base nos limites visíveis de vegetação nas imagens e também de acordo com a distribuição espacial dos cordões litorâneos arenosos livres de ação antrópica. Foram incluídas nesta classe as áreas de Floresta Ombrófila Densa das terras baixas, ou Restinga Higrófila;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **Rio de Janeiro**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Mista;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando formações arbustivas e florestais. Sua discriminação foi feita com base nos limites visíveis de vegetação nas imagens e também de acordo com a distribuição espacial dos cordões litorâneos arenosos livres de ação antrópica. Foram incluídas nesta classe as áreas de Floresta Ombrófila Densa das terras baixas, ou Restinga Higrófila;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **Minas Gerais**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Áreas de contato entre as formações mencionadas, matas ciliares e remanescentes incrustados em outras formações foram também incluídos.

### **Espírito Santo**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Áreas de

*cabruca*, que são plantios de cacau sombreados com espécies arbóreas das formações florestais mencionadas foram também incluídas;

*Remanescentes de Vegetação de Restinga*: refere-se à cobertura vegetal típica de terrenos arenosos da área litorânea, englobando formações arbustivas e florestais. Sua discriminação foi feita com base nos limites visíveis de vegetação nas imagens e também de acordo com a distribuição espacial dos cordões litorâneos arenosos livres de ação antrópica. Foram incluídas nesta classe as áreas de Floresta Ombrófila Densa das terras baixas, ou Restinga Higrófila;

*Remanescentes de Vegetação de Mangue*: cobertura vegetal litorânea característica de ambientes salobros.

### **Mato Grosso do Sul**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Matas ciliares, remanescentes incrustados ou limítrofes inseridos em outras formações.

### **Goiás**

*Remanescentes Florestais*: formações florestais (primárias e secundárias em estágio avançado de regeneração) de Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual. Matas ciliares, remanescentes incrustados ou limítrofes inseridos em outras formações.

## **2.3 PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO UTILIZADOS**

Para a identificação dos itens da legenda apresentada, foram utilizadas imagens orbitais TM/Landsat em formato analógico (papel fotográfico), referentes aos dois períodos considerados para o mapeamento: período de 1985 -1990 e período de 1990 - 1995. As imagens referentes ao primeiro período (1985 - 1990) foram disponibilizadas sob forma de composições coloridas confeccionadas com as imagens das bandas TM3, TM4 e TM5, com os filtros azul, verde e vermelho, respectivamente; o que conferiu às

formações vegetais tonalidades esverdeadas nestas composições. Já as imagens referentes ao período de 1990 - 1995, foram disponibilizadas sob forma de composições coloridas confeccionadas com as mesmas bandas, porém foi invertido o posicionamento dos filtros coloridos, sendo atribuído o filtro azul para a imagem da banda TM3, o filtro vermelho para a imagem da banda TM4 e finalmente o filtro verde para a imagem da banda TM5. Este procedimento conferiu às formações vegetais tonalidades avermelhadas.

A aparência assumida pelas formações vegetais nestas composições coloridas é explicada pelo processo de interação entre a própria vegetação e a radiação eletromagnética (REM). Este processo envolve vários níveis de abordagem, incluindo a análise de folhas isoladas em laboratório e/ou campo e conjuntos de plantas que caracterizam os chamados *dosséis*, cujas arquiteturas e densidades exercem grande influência sobre a porção de REM refletida, tanto no que se refere à intensidade, quanto às suas características espectrais.

Considerando as características espectrais de uma única folha verde sadia, para a amplitude espectral abrangida pelas bandas TM3, TM4 e TM5, estas poderiam ser resumidamente descritas segundo o gráfico apresentado na Figura 2.3.

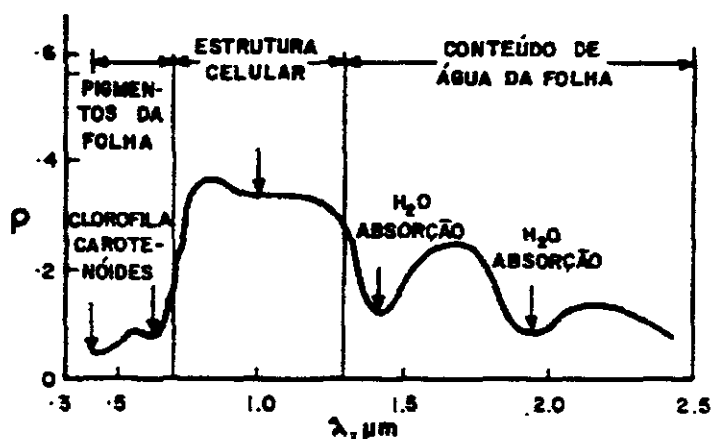


Fig. 2.3 - Curva de reflectância típica de uma folha verde sadia.

FONTE: Novo (1989, p. 191)

A análise da Figura 2.3 indica que a região compreendida entre 0,4 a 2,5 mm pode ser dividida em três áreas: **a)** região do visível (0,4 a 0,7 mm), **b)** região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 mm) e **c)** região do infravermelho médio (1,3 a 2,5 mm). A seguir são comentados alguns aspectos relacionados ao comportamento espectral da folha, em cada uma destas regiões.

**a) região do visível:** Nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Estes pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos são: clorofila (65%), carotenos (6%), e xantofilas (29%). Os valores percentuais destes pigmentos apresentados nas folhas podem variar grandemente de espécie para espécie. A energia radiante interage com a estrutura foliar por absorção e por espalhamento. A energia é absorvida seletivamente pela clorofila e é convertida em calor ou fluorescência, e também convertida fotoquimicamente em energia estocada na forma de componentes orgânicos através da fotossíntese.

**b) região do infravermelho próximo:** Nesta região existe uma absorção pequena da REM e considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região. A reflectância espectral é quase constante nessa região. Gates (1965) mencionou que a reflectância espectral de folhas nessa região do espectro eletromagnético é o resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo. Fatores externos a folha, como disponibilidade de água por exemplo, podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância de uma folha nesta região. De maneira geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e conseqüentemente, maior será também a reflectância.

**c) região do infravermelho médio:** A absorção devido a água líquida predomina na reflectância espectral das folhas na região do infravermelho médio. A água absorve consideravelmente a REM incidente na região espectral compreendida entre 1,3 a 2,0 mm. Em termos mais pontuais, a absorção da água se dá em 1,1; 1,45; 1,95; 2,7 e 6,3 mm.

Considerando que a folha é o principal elemento da vegetação sob ponto de vista de sua interação com a REM, as características espectrais de um dossel deverão ser muito semelhantes às aquelas apresentadas pelas folhas que o constitui. Contudo existem outros fatores que interferem na interação mencionada. Estes fatores referem-se principalmente aos chamados parâmetros geométricos de iluminação e visada (posição espacial do Sol e do sensor, respectivamente), aos parâmetros biofísicos da vegetação (Índice de Área Foliar e Distribuição Angular de Folhas) e aos parâmetros espectrais das folhas e do solo no qual a vegetação se desenvolve. Alguns detalhes adicionais sobre as diferenças espectrais entre folhas isoladas e dosséis podem ser obtidos em Silva e Ponzoni (1995).

Para o caso das imagens TM aqui relacionadas, os parâmetros geométricos de iluminação e visada são considerados fixos para cada composição colorida utilizada no mapeamento, sendo assim, a identificação visual dos diferentes itens da legenda mencionada anteriormente torna-se função das diferenças existentes entre estes itens, no que se refere aos parâmetros biofísicos e espectrais, bem como na capacidade do sensor TM em detectar e registrar as influências destes parâmetros sobre a reflectância dos dosséis vegetais incluídos nestes itens.

Através de inúmeros trabalhos realizados com dados TM no estudo da vegetação, verificou-se que a separabilidade entre as diferentes formações vegetais existentes na superfície terrestre somente pode ser feita considerando suas diferenças fisionômicas. Dentro de um mesmo tipo fisionômico, possíveis diferenças estruturais precisam alcançar magnitudes bastante significativas para que os padrões presentes nas imagens sofram algum tipo de variação visualmente perceptível. Neste momento, é possível o aparecimento das chamadas *ambiguidades*, quando diferentes fisionomias podem assumir o mesmo padrão nas imagens.

De maneira geral portanto, considera-se que em uma imagem da banda TM3 (região do vermelho) a tonalidade apresentada por um dossel deverá ser escura, enquanto que em uma imagem da banda TM4 (infravermelho próximo) sua tonalidade deverá ser clara e finalmente numa imagem da banda TM5 (infravermelho médio) a tonalidade deste

dossel deverá ser também escura. As diferenças apresentadas nestas tonalidades implicarão em alterações nos padrões de cor/tonalidade presentes nas composições coloridas, as quais deverão ser associadas pelo fotointérprete como alterações fisionômicas/estruturais da vegetação.

## 2.4 INTERPRETAÇÃO VISUAL DAS IMAGENS

Esta etapa foi realizada utilizando-se os seguintes materiais:

- Imagens TM/Landsat na forma de composições coloridas elaboradas a partir das bandas 3(B), 4 (G) e 5(R), processadas com os níveis 4 e 5 de correção geométrica e referentes ao período de 1985 a 1990;
- Imagens TM/Landsat na forma de composições coloridas elaboradas a partir das bandas 3(B), 4 (R) e 5(G), processadas com o nível 6 de correção geométrica e referentes ao período de 1990 a 1995;
- Cartas topográficas do IBGE e da DSG, na escala de 1:250.000;
- Cartas do mapeamento fito-ecológico do RADAMBRASIL na escala 1:1.000.000;
- Acetato utilizado no mapeamento do período 1985-1990, contendo a drenagem e as estradas principais extraídas das cartas topográficas, além do conteúdo temático do período em questão.

A interpretação propriamente dita era feita por carta topográfica (escala 1:250.000), materializada sob a forma de um acetato, aqui denominado de “overlay” 1985-1990, o qual era superposto sobre as imagens 1990-1995 que cobriam toda a extensão abrangida pela carta. Procedendo desta forma, foi possível verificar que as composições coloridas utilizadas no mapeamento referente ao período 1990-1995 possibilitaram uma melhor discriminação visual entre padrões de tonalidade e cor, em relação às composições coloridas utilizadas no mapeamento anterior (1985-1990). Isso permitiu tanto a identificação mais facilitada dos temas da legenda, quanto a verificação de possíveis enganos da interpretação realizada no mapeamento anterior. Os principais enganos verificados foram:

**Remanescentes Florestais não mapeados**  
**Reflorestamento considerado Remanescentes Florestais**  
**Desflorestamento não mapeado**  
**Remanescentes de Vegetação de Restinga não mapeados**

Reflorestamento considerado Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Decremento de Remanescentes de Vegetação de Restinga não mapeado  
Remanescentes de Vegetação de Mangue não mapeados  
Reflorestamento considerado Remanescentes de Vegetação de Mangue  
Decremento de Remanescentes de Vegetação de Mangue não mapeado  
Remanescentes Florestais mapeados como Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Remanescentes de Vegetação de Restinga mapeados como Remanescentes Florestais  
Remanescentes de Vegetação de mangue mapeados como Remanescentes Florestais

Foram ainda incluídas nesta interpretação as áreas referentes aos incrementos e decrementos ocorridos no período 1990-1995, nos temas Remanescentes Florestais, Remanescentes de Vegetação de Restinga e Remanescentes de Vegetação de Mangue; as áreas de remanescentes de cada um deste três temas que estavam encobertos por nuvens no mapeamento anterior e finalmente, as interseções de nuvens nos dois períodos de mapeamento, as quais indicaram as áreas que não foram mapeadas tanto no mapeamento passado, quanto no mapeamento atual. Assim, durante a interpretação das imagens do período 1990-1995, foi considerada a seguinte legenda, denominada “legenda de trabalho”:

Remanescentes Florestais  
Desflorestamento  
Regeneração Florestal  
Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Decremento de Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Regeneração de Vegetação de Restinga  
Remanescentes de Vegetação de Mangue  
Decremento de Vegetação de Mangue  
Regeneração de Vegetação de Mangue  
Remanescentes Florestais não mapeados  
Reflorestamento considerado Remanescentes Florestais  
Desflorestamento não mapeado  
Remanescentes de Vegetação de Restinga não mapeados  
Reflorestamento considerado Remanescentes de Vegetação de Restinga  
Decremento de Remanescentes de Vegetação de Restinga não mapeado  
Remanescentes de Vegetação de Mangue não mapeados  
Reflorestamento considerado Remanescentes de Vegetação de Mangue  
Decremento de Remanescentes de Vegetação de Mangue não mapeado

- Remanescentes Florestais mapeados como Remanescentes de Vegetação de Restinga
- Remanescentes de Vegetação de Restinga mapeados como Remanescentes Florestais
- Remanescentes de Vegetação de Mangue mapeados como Remanescentes Florestais

Foi adotado um critério de cores para representação gráfica destes temas de forma a garantir a distinção visual entre os temas identificados. Os contornos dos polígonos representativos de cada tema em questão eram definidos mediante a superposição visual da drenagem e estradas principais existentes nos “overlays”, com seus homólogos existentes nas imagens correspondentes. Este procedimento foi adotado para garantir um mínimo de exatidão cartográfica na representação dos polígonos cuja dimensão mínima foi estipulada em 4 mm<sup>2</sup>, correspondendo a uma superfície no terreno de 0,25 Km<sup>2</sup>. Seguiram-se as etapas de verificação e auditoria, que incluíam a observação das articulações temáticas entre “overlays” de cartas vizinhas, revisão da interpretação por parte dos próprios intérpretes e esclarecimento de dúvidas junto a um especialista do INPE.

## 2.5 DIGITALIZAÇÃO DOS “OVERLAYS”

Uma vez concluída a etapa de interpretação visual de imagens, seguiu-se a digitalização do conteúdo temático dos “overlays” realizada no aplicativo denominado Sistema de Informações Geográficas (SGI) desenvolvido pelo INPE, constituindo portanto um banco de dados digitais que possibilitou a edição de mapas temáticos e a quantificação das áreas de cada tema do mapeamento. Esta etapa foi realizada através do uso de mesas digitalizadoras.

Uma vez concluída a entrada de dados no sistema, era impressa a chamada “plotagem” da carta, a qual continha alguns elementos da toponímia e todo o conteúdo temático originado na interpretação visual de imagens. Essa plotagem era então comparada com o “overlay” correspondente através de uma auditoria, onde eram feitos acertos de forma a tornar a plotagem uma cópia fiel do “overlay”. Concluída esta etapa, os “overlays” e



suas respectivas plotagens eram encaminhados para consultores contatados nos estados, que procediam então uma auditoria definitiva. As considerações destes consultores eram então analisadas e procediam-se as alterações pertinentes nos “overlays” e posteriormente nas plotagens. Seguiram-se os cálculos das áreas dos temas Remanescentes Florestais (RF), Desflorestamento (D), Regeneração de Remanescentes Florestais (GF), Remanescentes de Vegetação de Restinga (VR), Decremento de Remanescentes de Vegetação de Restinga (DVR), Regeneração de Remanescentes de Vegetação de Restinga (GVR), Remanescentes de Vegetação de Mangue (VM), Decremento de Remanescentes de Vegetação de Mangue (DVM) e Regeneração de Remanescentes de Vegetação de Mangue (GVM), para os anos de 1985, 1990 e 1995. A Tabela a seguir apresenta um exemplo destes cálculos, uma vez que estes foram definidos de forma particular para cada Estado mediante a existência ou não de classes específicas de mapeamento.

**TABELA 2.5 – RELAÇÃO DE TEMAS MAPEADOS NOS ANOS DE 1985, 1990  
E 1995**

<i>Tema</i>	<i>1985</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>
Remanescentes Florestais	RF90 + D90	RF95 + D95	RF95=RF95 + RF não mapeados + RF mapeada como VR+RF mapeada como VM +Outros mapeados como RF + GF não mapeada
Desflorestamento		D90 + D90 não mapeado	D95
Regeneração de Remanescentes Florestais		GF90 + GF90 não mapeado	GF95
Vegetação de Restinga	VR90 + DVR90	VR 95 + DVR 95	VR 95 + VR95 não mapeada+ VR95 mapeada como RF+ VR95 mapeada como VM

Decremento de Vegetação de Restinga		DVR95 +DVR95 não mapeado	DVR95
Regeneração de Vegetação de Restinga		GVR90+GVR90 não mapeado	GVR95
Vegetação de Mangue	VM90 + DVM90	VM95 + DVM95	VM95 + VM não mapeada
Decremento de Vegetação de Mangue		DVM90+DVM90 não mapeado	DVM95
Regeneração de Vegetação de Mangue		GVM90+GVM não mapeado	GVM 95

## 2.6 EXATIDÃO DE CLASSIFICAÇÃO

Esta etapa teve como objetivo estimar a exatidão global da classificação, caracterizado por um valor que expressa, de forma genérica para todo um Estado, o percentual de confiabilidade das cartas. Esse percentual é determinado segundo metodologia preconizada por Congalton e Mead (1983), que inclui a verificação de pontos no terreno, cujas coordenadas são definidas mediante a chamada amostragem estratificada sistemática não alinhada, sugerida por Fitzpatrick-Lins (1981), Rosenfield *et al.* (1982) e Stehman (1992). Esta técnica de amostragem apresenta como vantagem a ponderação da área de cada tema mapeado.

Esta metodologia foi aplicada inicialmente para o Estado do Espírito Santo, que teve sobre seu território definidos 232 pontos que foram visitados em campo. A equipe de profissionais que realizou este trabalho de campo recebeu orientações sobre a metodologia a ser empregada na estimativa da exatidão de mapeamento, quando foi salientada ainda a importância da decisão tanto no que se referia à localização do ponto no campo, quanto da identificação correta do tema no qual este estava inserido. Neste sentido, foram contatados consultores do Estado que ajudaram na definição de critérios

de reconhecimento dos temas em campo. Neste trabalho de campo foram preenchidas fichas individuais por ponto.

Em seguida, foram resgatados das plotagens os temas que haviam sido atribuídos a cada um dos pontos amostrados em campo, mediante a aplicação de um programa computacional especialmente desenvolvido que se utilizava das coordenadas destes pontos, para cada carta topográfica, e listava os temas a que cada um pertencia. Os dados de campo e estes obtidos em cada uma das plotagens, foram organizados sob a forma de uma Matriz de Erro segundo a tabela a seguir.

**TABELA 2.6 - ESQUEMA DA MATRIZ DE ERRO ELABORADA A PARTIR DOS DADOS DE CAMPO E DAS PLOTAGENS**

<i>Temas</i>	<i>Mata</i>	<i>Mangue</i>	<i>Restinga</i>	<i>Outros</i>
<i>Mata</i>				
<i>Mangue</i>				
<i>Restinga</i>				
<i>Outros</i>				

Em cada célula desta matriz são escritos os números de pontos, por tema, que coincidiram com o tema que havia sido interpretado (diagonal da matriz) e os números de pontos que foram confundidos com os demais temas. O tema *Outros* refere-se a todos os demais temas do mapeamento que não Mata, Mangue e Restinga.

O cálculo da Exatidão Global de mapeamento foi feito mediante a seguinte equação:

$$E = \frac{\text{Total de pontos da diagonal}}{\text{Total de pontos amostrados}} \times 100$$

O relatório deste estudo, que contempla o detalhamento da metodologia, incluindo fórmulas, tabelas e resultados encontra-se à disposição para consultas no acervo da Fundação SOS Mata Atlântica.

## 2.7 CONFECÇÃO DOS MAPAS TEMÁTICOS

Os temas mapeados foram digitalizados utilizando-se de mesa digitalizadora e do Sistema de Informações Geográficas - SGI, desenvolvido pelo INPE, constituindo um banco de dados.

O banco de dados digitais possibilitou a edição dos mapas temáticos que compõem este atlas.

Informações adicionais obtidas da carta topográfica do IBGE, tais como drenagens, rodovias, ferrovias, limites administrativos e cidades também foram digitalizadas, de maneira que possam servir como pontos de referência para a localização dos remanescentes.

A quantificação da área coberta pelos diferentes temas avaliados foi efetuada automaticamente através de funções específicas do SGI. Essas áreas são apresentadas em termos absolutos (ha) e relativos (%) à área total avaliada dos Estados contemplados neste estudo.

## 2.8 PARECER TÉCNICO E AVALIAÇÃO

Como no mapeamento anterior, o objetivo principal da realização do parecer técnico é a avaliação dos dados por especialistas com conhecimento e experiência de campo nas áreas estudadas, que possa identificar, no mapeamento, possíveis omissões de remanescentes significativos existentes ou desmatamentos ocorridos durante o período estudado e eventuais erros de interpretação.

## 2.9 APRIMORAMENTOS PREVISTOS

Pelo exemplo apresentado anteriormente, verifica-se que os trabalhos de interpretação foi elaborado sobre imagens em formato analógico, assim como uma fotografia sobre a

qual se coloca um papel transparente e para este são traçados os limites dos temas identificáveis. Atualmente, com o desenvolvimento e disponibilidade de sistemas computacionais compatíveis com aplicativos destinados ao processamento de imagens, abre-se uma nova perspectiva, agora do uso de imagens em formato digital. Com essas imagens, a interpretação é feita da mesma forma como vinha sendo feita com os produtos analógicos, ou seja, através da interpretação visual dos temas definidos na legenda. Contudo, o intérprete pode agora alterar uma série de parâmetros da imagem de forma a permitir uma melhor distinção visual. Ainda, poderá ser viabilizada uma melhor precisão no georreferenciamento dos polígonos delimitados e ainda a atualização futura dos mapas elaborados no presente, será tremendamente facilitada, o que dará maior confiabilidade aos dados gerados.

### **3. ATUALIZAÇÃO DO ATLAS REFERENTE AO MAPEAMENTO 90-95**

Encontra-se em elaboração a atualização do Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica e dos Ecossistemas Associados referente ao período 95-2000. Todo o trabalho está sendo elaborado sobre bases digitais e a escala de mapeamento na tela do computador foi definida em 1:50.000. Como consequência, espera-se muita alteração nos resultados encontrados quando do mapeamento realizado para o período 90-95, uma vez que está sendo possível a identificação de feições impossíveis de serem identificadas na escala de 1:250.000, anteriormente adotada.

Nessa oportunidade, a intenção é aproveitar ao máximo as bases temáticas elaboradas anteriormente. Para tanto, aquelas bases serão georreferenciadas tomando como referência as imagens corrigidas geometricamente. Posteriormente, essas bases serão utilizadas pelo intérprete que se orientará com elas na atualização das novas bases. Ainda serão re-interpretadas as mesmas imagens que foram utilizadas no mapeamento 90-95, com o objetivo de gerar uma nova base referente a esse período de mapeamento que será atualizada agora na escala 1:50.000. Em seguida, essas novas bases geradas serão atualizadas a partir da utilização de imagens de 2000, o que será uma atividade

relativamente fácil de concluir em função das facilidades de manuseio dos dados digitais, mediante o uso de aplicativos específicos.

#### **4 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher. 1989. 308p.

Ponzoni, F. J.; Disperatti, A. A. **Comportamento espectral da vegetação**. São José dos Campos : INPE, 1995. 37 p. (INPE – 5619/PUD – 065).

Swain, P. H.; Davis, S. M. **Remote sensing : a quantitative approach**. Lafayette : McGraw-Hill. 1978.

Congalton, R. G.; Mead, R. A. A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 69-74, 1983.

Fitzpatrick-Lins, K. Comparison of sampling procedures and data analysis for land-use and land-cover map. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 343-351, 1981.

Rosenfield, G. H.; Fitzpatrick-Lins, K.; Ling, H. S. Sampling for thematic map accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 131-137, 1982.

Stehman, S. V. Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, n. 9, p. 1343-1350, 1992.

Silva, E. L. S.; Ponzoni, F. J. Comparação entre a reflectância hemisférica de folhas e a reflectância bidirecional de um dossel. **Revista Árvore**, v. 19, n. 4, p. 466-478, 1995.

Gates, D. M.; Keegan, H. J.; Schleter, J. C.; Weidner, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, n. 1, p. 11-20, 1965.

## **CAPÍTULO 11**

# **MONITORAMENTO OCEÂNICO POR TECNOLOGIA ESPACIAL**

**Milton Campbell\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [milton@tid.inpe.br](mailto:milton@tid.inpe.br)



## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>11-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>11-7</b>
<b>1. APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>11-9</b>
<b>2. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11-11</b>
2.1 O QUE É OCEANOGRAFIA .....	11-11
2.2 O QUE É SENSORIAMENTO REMOTO.....	11-12
<b>3. NÍVEIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....</b>	<b>11-14</b>
<b>4. SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA .....</b>	<b>11-14</b>
4.1 POTENCIALIDADES DA TECNOLOGIA ESPACIAL NA OBSERVAÇÃO DOS OCEANOS .....	11-17
<b>5. PRINCIPAIS SENSORES ORBITAIS COM APLICAÇÕES EM OCEANOGRAFIA .....</b>	<b>11-21</b>
5.1 MAPEADOR TEMÁTICO TM/LANDSAT.....	11-21
5.2 O SENSOR HRV/SPOT .....	11-22
5.3 O SENSOR SeaWiFS/SEASTAR.....	11-24
5.4 O RADIÔMETRO AVHRR/NOAA.....	11-25
5.5 O RADIÔMETRO DA SÉRIE GOES/VAS .....	11-27
5.6 O SATÉLITE EUROPEU - ERS.....	11-28
5.7 O SATÉLITE CANADENSE - RADARSAT .....	11-30
5.8 A COOPERAÇÃO FRANCO-AMERICANA TOPEX/POSEIDON.....	11-31
5.9 OUTROS SATÉLITES .....	11-32
<b>6. PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>11-32</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>11-34</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>1 – AQUISIÇÃO DE DADOS OCEANOGRÁFOS EM DIFERNTES NÍVEIS</b> .....	<b>11-16</b>
---	--------------

## LISTA DE TABELAS

<b>2.2 – COMPARAÇÃO ENTRE OS PERÍODOS DA HISTÓRIA DO SR.....</b>	<b>11-13</b>
<b>4.1 – BANDAS ESPECTRAIS DO TM/LANDSAT.....</b>	<b>11-22</b>
<b>4.2 – BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR SEAWIFS.....</b>	<b>11-25</b>
<b>4.3 – CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA SEASTAR/SEAWIFS.....</b>	<b>11-25</b>

## 1. APRESENTAÇÃO

A Terra é um planeta aquático com dois terços de sua superfície coberta por oceanos. Mais da metade da radiação solar que chega à superfície terrestre é primeiro absorvida pelo oceano, onde é armazenada e redistribuída pelas correntes oceânicas antes de ser liberada para a atmosfera.

Enquanto que a atmosfera e os continentes suportam grandes variações de temperatura nas altas e médias latitudes, a temperatura do oceano permanece mais constante. O alto calor específico da água do mar impede que a amplitude da temperatura varie rapidamente ao longo do dia.

Os processos atuantes nos oceanos são também, importantes em relação à absorção de gases. Eles podem atrasar ou reduzir o impacto do aquecimento global provocado pelo aumento nas taxas de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis e fósseis.

Além do aspecto climático e meteorológico, os oceanos são importantes por outros motivos: o comércio internacional se utiliza muito dos meios marinhos, e programas de defesa nacionais são cada vez mais dependentes de operações navais. Da mesma forma, os recursos pesqueiros abastecem uma fração significativa da proteína consumida mundialmente. Além disso, a física, química e biologia dos oceanos são fundamentais para o desenvolvimento e gerenciamento desses recursos vivos. Os oceanos também, assimilam grande, se não a maior parte da poluição antropogênica, desde derramamentos de óleo, esgotos domésticos e industriais, até lixo atômico.

No fundo oceânico existem grandes depósitos de minerais valiosos – óleo e fontes potenciais de minerais estratégicos. Os depósitos oceânicos fornecem um quadro da evolução climática global ao longo de milhões de anos. A topografia do solo oceânico e

suas propriedades magnéticas fornecem, similarmente, uma visão da evolução das crostas oceânica e continental.

Por mais de um século, os oceanógrafos vêm elaborando uma descrição científica dos oceanos a partir de medições realizadas no mar. Entretanto, essa descrição é limitada pela cobertura esparsa de dados na maioria dos oceanos do planeta. Os dados obtidos tendem a vir de navios (de pesquisa ou oportunidade) que muitas vezes são obrigados a alterar suas rotas normais em função de condições meteorológicas adversas ou pela presença de gelo no mar. Grandes áreas oceânicas, particularmente no Hemisfério Sul, são pouco visitadas por quaisquer navios. Além disso, os oceanos apresentam uma variabilidade espaço-temporal, necessitando de medições freqüentes em locais bem distribuídos ao redor de todo o globo terrestre.

O sensoriamento remoto a partir de instrumentos orbitais ou aerotransportados, fornece uma visão sinóptica dos oceanos, que associada a novos e velozes computadores, permite novas perspectivas para a descrição e entendimento dos oceanos. A quantidade de parâmetros oceanográficos que podem ser medidos e monitorados por sensoriamento remoto é bem ampla. As aplicações dos dados orbitais são tão diversas que podemos considerar este meio de aquisição de informações para a oceanografia como um todo – biológica, química, geológica e física – tão eficaz como as informações obtidas por meios convencionais.

Este capítulo “Monitoramento Oceânico por Tecnologia Espacial” pretende apresentar, de forma resumida, alguns aspectos importantes relacionados à Oceanografia, ao Sensoriamento Remoto dos oceanos, aos principais sistemas sensores que possuem utilidade para os oceanógrafos e que operam em diferentes faixas espectrais, além de alguns exemplos de suas aplicações.

Gostaria de dedicar este capítulo aos professores e alunos do Ensino Fundamental e Médio. É pensando em deixar uma semente e uma rota para que possam navegar, que me estimulo a preparar estas notas de aula, colocando-as à disposição da comunidade. Espero que seja útil.

## **2. INTRODUÇÃO**

### **2.1 O QUE É OCEANOGRAFIA**

Segundo o dicionário, a Oceanografia é o “estudo das características físicas e biológicas dos oceanos e dos mares”. Já segundo a UNESCO, a Oceanografia é uma “ciência universal, que tem por objetivo o estudo do meio marinho, sua flora, sua fauna e seus limites físicos com a terra firme e a atmosfera. Como qualquer outra ciência, ela se baseia no método experimental. Devido às grandes dimensões dos fenômenos oceânicos e do fato de que eles raramente são gerados num mesmo lugar, a oceanografia depende da cooperação internacional”.

Na verdade, a Oceanografia é uma disciplina multi e interdisciplinar, envolvendo diversas áreas como a Meteorologia, Paleontologia, Cartografia, Engenharia, Sensoriamento Remoto, Administração/Marketing, entre outras. A Oceanografia pode ser considerada como o estudo científico dos oceanos com ênfase no seu caráter como Ambiente. É convenientemente dividida em: Oceanografia Biológica, Oceanografia Física, Oceanografia Química e Oceanografia Geológica.

O principal objetivo do estudo oceanográfico é obter uma descrição sistemática dos oceanos, suficientemente quantitativa para permitir a previsão de seu comportamento com algum grau de certeza.

## 2.2 O QUE É SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) pode ser entendido como a observação, ou coleta de informações, de um alvo a partir de um dispositivo separado dele por uma certa distância (ou seja, sem contato físico). A expressão “Sensoriamento Remoto” foi empregada, primeiramente, pelos geógrafos do *US Office of Naval Research* na década de 1960, quando o uso de satélites militares espões começou a ser praticado, também, por civis. Desde então, a expressão SR é normalmente empregada com relação à observação da Terra. Ainda, o emprego do SR terrestre, normalmente envolve a utilização de satélites artificiais. Entretanto, deve ser mencionado que a atividade prática de sensoriamento remoto não somente precede a esta expressão, como também, precede o desenvolvimento e lançamento destes satélites artificiais. A idéia de se tirar fotografias da superfície terrestre a partir de uma plataforma elevada desta superfície, foi colocada em prática por balonistas, ainda no século 19 (fotografia da cidade de Petit Bicêtre, próxima a Paris, em 1859). As técnicas de fotografia aérea a partir de aeronaves militares de reconhecimento, foram significativamente desenvolvidas durante as Guerras Mundiais (I e II). Depois, os sistemas radares e de infravermelho-termal foram inventados e também, desenvolvidos.

Além de câmaras fotográficas (com filmes nas faixas do visível e infravermelho), radiômetros (*scanners*) multiespectrais também podem ser instalados em aviões. Estes radiômetros podem operar nas faixas do visível, infravermelho ou microondas do espectro eletromagnético. Ainda, sensores ativos (como os radares), também podem ser instalados em aeronaves, utilizando suas próprias fontes de radiação.

Ondas ultra-sônicas, apesar de serem fortemente atenuadas na atmosfera, podem se propagar por grandes distâncias submarinas. Daí sua aplicabilidade em sondagens batimétricas em rios ou oceanos, inspeções submarinas, caça de minas, detecção de cardumes e comunicações submarinas.

O SR também não está limitado a geração e interpretação de dados na forma de imagens. Por exemplo, dados de pressão, temperatura e umidade em diferentes níveis da atmosfera são rotineiramente coletados por serviços meteorológicos, através do emprego de balões e foguetes meteorológicos. Informações científicas sobre os altos níveis atmosféricos também são coletadas por métodos de rádio-sondagens operados tanto por estações terrestres, como a bordo de satélites.

A iniciativa original e a principal força incentivadora do programa espacial está nas mãos dos militares. A fotografia aérea iniciou-se durante a I Guerra Mundial e já durante esta guerra, obtiveram grande importância. O uso de filme infravermelho permitia a identificação de equipamentos camuflados. Atualmente, todos os sensores e plataformas que apresentam interesse militar, possuem um similar do mesmo nível, ou até melhor, operando sob controle militar. A história do SR pode ser dividida em 2 períodos: um antes da era espacial (até 1960), e o período posterior. As diferenças entre estes períodos estão resumidas na Tabela 2.2.

**TABELA 2.2 - COMPARAÇÃO ENTRE OS PERÍODOS DA HISTÓRIA DO SR**

<b>ANTES DA ERA ESPACIAL (1860-1960)</b>	<b>DESDE 1960</b>
A. Somente 1 tipo e data de fotografia	A. Muitos tipos e datas (multi-temporal) de dados de SR
B. Forte dependência da análise do fotointérprete de imagens pouco claras (sem contraste)	B. Forte dependência de análises computacionais e manipulações digitais de contraste
C. Uso intenso de chaves de fotointerpretação	C. Uso mínimo de chaves de fotointerpretação
D. Aplicabilidade mínima do conceito "MULTI"	D. Grande aplicabilidade do conceito "MULTI"
E. Equipamentos de simples operação e de fácil manutenção	E. Equipamentos caros, necessitando intenso treinamento para operação e manutenção
F. Pouca preocupação sobre a renovação de recursos, proteção ambiental, mudanças globais, aspectos socio-econômicos etc.	F. Preocupação crescente com estes aspectos.
G. Forte resistência a novas tecnologias pelos usuários potenciais de SR	G. Continuidade da resistência a aceitação de novas tecnologias de SR pelos usuários potenciais.

FONTE: Adaptado de Colwell (1983, p. 13)



### **3. NÍVEIS DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

A altitude do sensor em relação à superfície imageada também é um fator de grande interferência, não só na intensidade e qualidade do sinal, como nas formas de registro e análise dos dados. Esta altitude em relação ao alvo define o nível de aquisição dos dados. Existem basicamente três níveis de coleta de dados por SR: nível de campo ou laboratório, nível de aeronave e nível orbital. Ao passarmos de um nível para outro, modificam-se as dimensões da área observada, o que influi na resolução espacial do dado obtido.

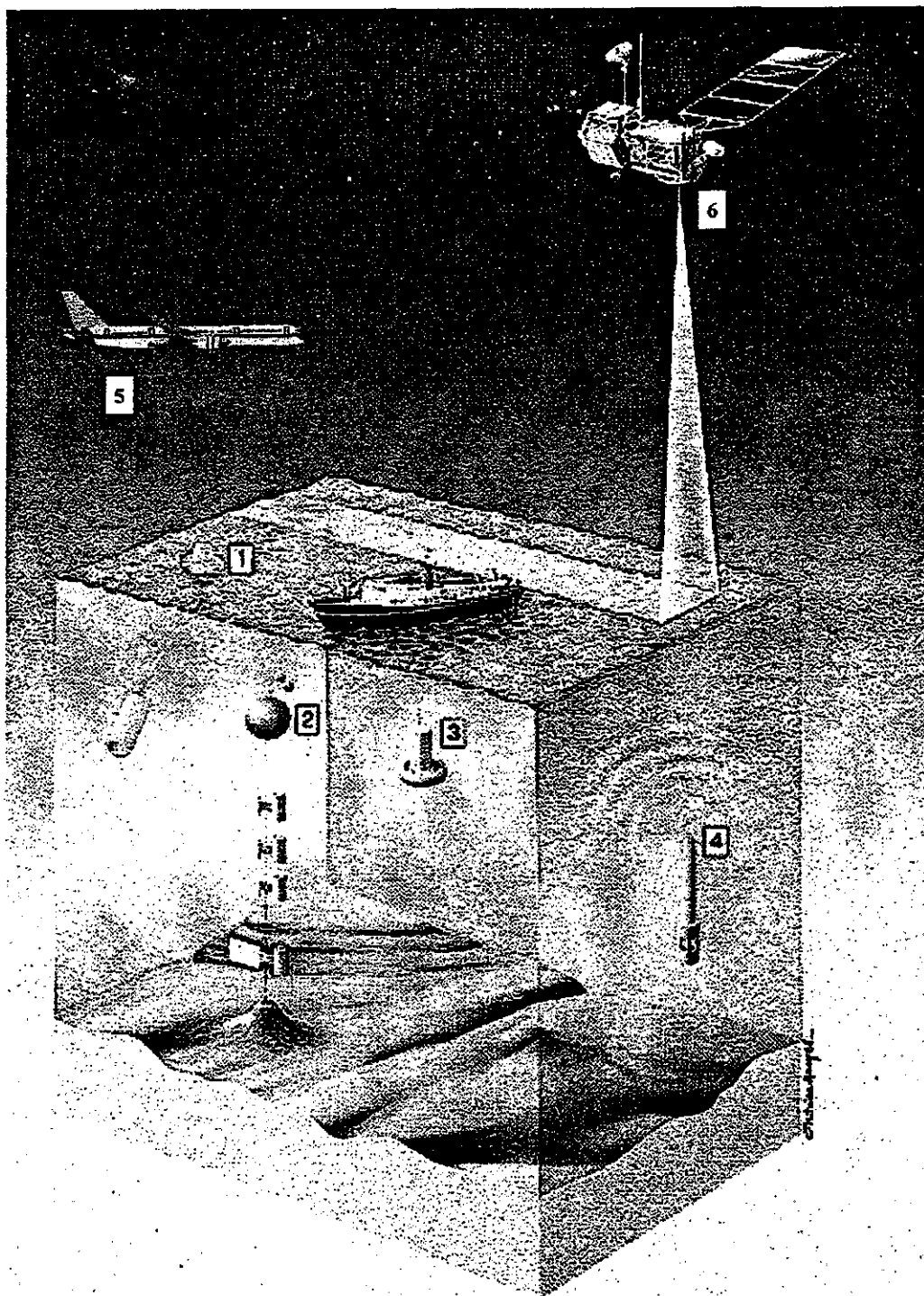
A Figura 1 a seguir ilustra de forma esquemática, os 3 níveis de aquisição de dados oceanográficos. A nível de campo, podem ser utilizados diversos tipos de equipamentos como sistemas CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) para hidrografia, derivadores de superfície e subsuperfície para medição de correntes, fundeios para obtenção de séries temporais de dados, por exemplo, equipados para telemetria via satélite. A nível de aeronave, podem ser empregados principalmente, *scanners*, câmaras óticas ou digitais, radares de abertura real ou sintética. A nível orbital, estão disponíveis uma série de satélites operando em diferentes faixas do espectro eletromagnético.

### **4. SENSORIAMENTO REMOTO E OCEANOGRAFIA**

Como já mencionado anteriormente, a descrição científica dos oceanos a partir de medições realizadas no mar é limitada pela cobertura esparsa de dados na maioria dos oceanos do planeta. O sensoriamento remoto a partir de instrumentos orbitais ou aerotransportados, fornece uma visão sinóptica dos oceanos, que associada a outros métodos e tecnologias permite novas perspectivas para a descrição e entendimento dos oceanos. A quantidade de parâmetros oceanográficos que podem ser medidos por sensoriamento remoto é bem ampla.

Se por um lado, alguns oceanógrafos mais conservadores afirmam que as informações obtidas por satélites não podem ser tão precisas ou relevantes como quando coletadas por embarcações de pesquisa, cabe lembrar que técnicas de sensoriamento remoto tem sido empregadas, ao longo dos anos, por vários oceanógrafos utilizando métodos acústicos nos oceanos. Ondas sonoras tem sido utilizadas para estudos do fundo e subfundo marinho, para observação do material em suspensão na água do mar, para estudos biológicos, determinações de estruturas termohalinas, medições de velocidade pelo efeito Doppler etc.

Desta forma, não há nenhuma objeção fundamental impedindo a extensão das técnicas de sensoriamento remoto nos oceanos, com a utilização das ondas eletromagnéticas através da atmosfera.



1-Derivador de superfície; 2-Fundeio; 3-Hidrografia; 4-Derivador de subsuperfície; 5-Aeronave; 6-Satélite

Fig. 1 – Aquisição de dados oceanográficos em diferentes níveis

Fonte : IOC/UNESCO (s.d., p. 6)

A representatividade dos dados de sensoriamento remoto para parâmetros oceanográficos dependentes da profundidade ou que apresentem variações temporais de alta frequência é válida, na medida em que se analisam três aspectos:

1. Inicialmente, para quaisquer variações que ocorram em profundidades nos oceanos, são os parâmetros superficiais - temperatura, velocidades, concentrações salinas, de gases dissolvidos etc. - que controlam as interações energia/matéria entre o oceano e a atmosfera. Desta forma, apesar da coleta de dados via SR ocorrer em apenas uma única profundidade, praticamente, trata-se do nível mais importante, ou seja, a superfície;
2. Outros aspectos positivos a serem considerados são: a visão sinótica, a alta resolução espacial (para determinados sensores) e a possibilidade de se obter séries temporais por longos períodos, mesmo para locais oceânicos isolados;
3. Ainda, podemos considerar o fato de que os dados obtidos via SR incorporam um valor médio, por unidade de área, automaticamente, sendo particularmente relevantes para testar previsões de modelos numéricos.

#### 4.1 POTENCIALIDADES DA TECNOLOGIA ESPACIAL NA OBSERVAÇÃO DOS OCEANOS

É conveniente classificar os sensores e instrumentos de SR de acordo com o comprimento de onda eletromagnética usada, ou seja, as regiões do visível (ótico), infravermelho-próximo, infravermelho-termal, microondas e ondas de rádio. Outra classificação importante, separa os sensores passivos dos sensores ativos. Em um sistema passivo, o instrumento de SR simplesmente detecta qualquer radiação que esteja no comprimento de onda (ou bandas espectrais) para a qual o instrumento foi projetado. Em um sistema ativo, o próprio instrumento de SR gera radiação, transmite esta radiação em direção ao alvo, e extrai informações a partir do sinal de retorno.

Robinson (1985) classifica os sensores de comprimento de onda visível como passivos em relação à fonte de radiação inicial, a iluminação do sol. Esta é refletida pelo mar e atinge o satélite, de forma que a informação que se busca por meio do imageamento da cor do mar está relacionada com os processos de reflexão e retroespalhamento. Uma vez que o sensor evite a reflexão direta da luz solar, a radiação ascendente conterà informações conseqüentes dos processos de retroespalhamento do corpo d'água. Os sensores que atuam na região espectral do visível respondem diretamente às condições da parte superior da coluna d'água. Em águas claras, a luz refletida pelo fundo pode ser vista do espaço, e sua intensidade depende do tipo de fundo e da profundidade, tornando assim a batimetria e a identificação de sedimentos de fundo, duas aplicações viáveis para estes sensores.

Os sensores do infravermelho-próximo apresentam um caráter de complementaridade em relação aos do visível, ainda que a absorção da água aumente para comprimentos de onda maiores que 800 nm, de forma mais rápida. Sensores operando na faixa entre 3  $\mu\text{m}$  e 4  $\mu\text{m}$  registrarão quantidades apreciáveis de energia solar refletida durante o período diurno, mas no período noturno, registrarão a radiação emitida pela superfície do mar. Esta radiação é predominante para comprimentos de onda entre 10  $\mu\text{m}$  e 12  $\mu\text{m}$ , de forma que, sensores operando na faixa do infravermelho-termal podem ser utilizados para estimar a temperatura da superfície.

Ainda que os lasers tenham sido mais empregados para sondar a atmosfera, cada vez mais eles são instalados em aeronaves e navios, voltados diretamente para baixo, para investigar a hidrosfera. O SR dos oceanos, lagos e rios é possível por meio das radiações visível, infravermelha e microondas. Os lasers operando numa ampla faixa do espectro, tem dado uma nova dimensão às pesquisas hidrográficas e oceanográficas, permitindo um alto grau de resolução em profundidade e uma pesquisa subsuperficial que é inatingível por outras técnicas de SR.

Os radiômetros passivos são equipamentos que medem o fluxo de energia eletromagnética que chega ao seu sensor direcionalmente. Medem comprimentos de onda até a região de microondas, e podem ser utilizados na determinação da temperatura da superfície do mar. A radiação emitida pela superfície marinha depende da emissividade desta (o fluxo radiante emitido por uma superfície, dividido por sua área denomina-se “exitância radiante”; a emissividade é a razão entre a exitância radiante de um corpo e a exitância radiante de um corpo negro para uma mesma temperatura). Se fossem realizadas medições em vários canais, no infravermelho e microondas, seria possível, em princípio, obter informações da emissividade e dos parâmetros dos quais ela depende, incluindo aí a salinidade, películas superficiais de óleo, fluxos de calor superficial, etc.

Sensores de microondas ativos são desenvolvidos para aplicações específicas, como o estudo de correntes, marés, estado-do-mar, velocidade e direção de ventos superficiais, espectro direcional de ondas, ondas internas, entre outras. As possibilidades de aplicações dos sensores ativos ainda pode ser bastante desenvolvida, em contraste aos sensores passivos.

Os sensores de microondas ativos utilizam o retroespalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície marinha para obter informações a nível orbital, mesmo na presença de nuvens. Pelo registro do tempo de retorno de um pulso emitido na direção nadir, o radar altímetro consegue medir a altitude da superfície marinha, em relação à sua própria posição. Uma vez que sua posição possa ser definida precisamente, é possível determinar a altitude da superfície marinha em relação ao geóide terrestre. Esta informação é útil no estudo de marés e da circulação oceânica. Além disso, a deformação do pulso refletido transporta informações sobre a altura de ondas significativas.

O radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) é capaz de processar a medição do tempo e da fase do sinal retroespalhado, e de sua amplitude. Este

processamento permite a produção de uma imagem do retroespalhamento da superfície, ou seja, da rugosidade desta superfície como é vista pelo radar. É possível obter uma resolução espacial na ordem de dezenas de metros. A rugosidade medida é causada por pequenas ondas, de poucos centímetros de comprimento. Esta técnica orbital permite detectar ondas de gravidade, ondas internas, feições topográficas de fundo, esteiras de navios, derramamentos de óleo etc.

Outra tecnologia espacial cada vez mais utilizada no monitoramento oceânico é a utilização de plataformas remotas para a aquisição de dados com telemetria via satélites. Bóias de deriva ou fundeadas medem *in situ* diferentes parâmetros oceanográficos e meteorológicos em diferentes regiões do oceano mundial, transmitindo os dados via satélites. Estes dados são utilizados em estudos da circulação oceânica, transporte de calor, calibração de imagens orbitais termais, entre outras aplicações.

Atualmente, os benefícios do SR na Oceanografia brasileira ainda são restritos. O planejamento, gerenciamento e monitoramento de recursos naturais necessitam de informações atualizadas, que possam ser interrelacionadas em diferentes conjuntos de informações para auxiliar a tomada de decisão de forma ampla e objetiva.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas computacionais para Geoprocessamento que permitem realizar análises complexas, integrando dados de diversas fontes e criando bancos de dados georreferenciados. Os SIG's são normalmente utilizados para a produção de mapas, como suporte para a análise espacial de fenômenos, como um banco de dados geográficos com funções de armazenamento e recuperação de informações espaciais, e ainda na modelagem de processos e fenômenos naturais permitindo o diagnóstico ambiental e seus prognósticos.

Num ambiente computacional, a noção de mapa deve ser estendida para incluir diferentes tipos de dados como imagens de satélites, modelos numéricos e dados *in situ*. Um SIG é

capaz de integrar numa única base de dados, informações espaciais provenientes de imagens de satélites, mapas cartográficos, arquivos batimétricos, dados oceanográficos e meteorológicos históricos, dados coletados *in situ*, entre outros. O SIG oferece também, mecanismos para combinar as várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, e para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

## **5. PRINCIPAIS SENSORES ORBITAIS COM APLICAÇÕES EM OCEANOGRAFIA**

### **5.1 MAPEADOR TEMÁTICO TM/LANDSAT**

Os satélites LANDSAT foram inicialmente concebidos para o monitoramento de recursos terrestres. Todos os satélites da série foram lançados em órbitas polares, heliosíncronas, com ciclos de 18 dias (Landsat 1, 2 e 3) e 16 dias (Landsat 4, 5 e 7). Os satélites atualmente em operação são o LANDSAT 5 e 7, a uma altitude de 705 km, com horário de cruzamento com o equador às 09:45 h.

O sensor destes satélites que possui interesse oceanográfico é o mapeador temático TM (*Thematic Mapper*), cujas bandas espectrais podem ser visualizadas na Tabela 5.1. Este sensor possui 30 m de resolução espacial nas bandas multiespectrais o que propicia a utilização do TM nas regiões costeira e estuarina, melhor do que nas oceânicas abertas. A bordo do Landsat-7, o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), inclui uma banda pancromática com 15 m de resolução espacial, calibração radiométrica a bordo e um canal no infravermelho termal com resolução espacial de 60 m.

Outra característica do TM é a largura da imagem em torno de 180 km, com pequena superposição de passagens de dias subsequentes, além da repetitividade ser de 16 dias. Quando se associam estas características com os problemas advindos da cobertura de



nuvens, a frequência de obtenção de imagens úteis para uma mesma região, pode ser reduzida a cerca de uma ou duas por ano.

**TABELA 5.1 - BANDAS ESPECTRAIS DO TM/LANDSAT**

CANAL	COMPRIMENTO DE ONDA ( $\mu\text{M}$ )	COR CARACTERÍSTICA
1	0.45 - 0.52	azul/verde
2	0.52 - 0.60	verde
3	0.63 - 0.69	vermelho
4	0.76 - 0.90	IV refletido (*)
5	1.55 - 1.75	IV refletido
6	10.4 - 12.5	IV termal
7	2.08 - 2.35	IV refletido

Fonte: Adaptado de Robinsosn (1985, p. )

(\*) IV = infravermelho

Apesar destas limitações, diversas aplicações oceanográficas tem sido desenvolvidas tais como estudos de processos dinâmicos de correntes de maré, lançando mão da distribuição de sedimentos em suspensão como traçador. Estas imagens também, podem ser utilizadas para monitorar plumas de sedimentos carreados por rios para a região costeira, servindo como indicadores auxiliares no controle da poluição marinha. Da mesma forma, plumas de efluentes domésticos e/ou industriais também podem ser monitorados com esta tecnologia. A cor da água do mar é, algumas vezes, alterada pela presença de determinados tipos de poluentes.

O satélite LANDSAT-7 será o último desta série iniciada em 1972. A série temporal de imagens adquiridas pelos satélites LANDSAT constituem o registro contínuo mais longo da superfície terrestre disponível para a comunidade.

## 5.2 O SENSOR HRV/SPOT

Os satélites da série SPOT (*System Probatoire d'Observation de la Terre*) são desenvolvidos pela agência espacial francesa CNES, e orbitam a uma altitude de 822 km. Cada satélite possui dois sistemas imageadores HRV (*High Resolution Visible*), que

varrem eletronicamente a imagem ao longo da órbita do satélite. Ao contrário do sistema utilizado pelo LANDSAT, um espelho móvel permanece estacionado em determinada posição durante o imageamento, refletindo energia para dentro do sistema ótico que focaliza esta imagem dentro de um conjunto de detetores. A posição de entrada dos espelhos em cada HRV pode ser controlada pelas estações em Terra, visando a observação de superfícies que não estejam necessariamente na vertical embaixo do sensor. Existem tantos detetores quantos forem os elementos da imagem a serem varridos. O HRV opera nos modos pancromático (0,51 a 0,73  $\mu\text{m}$ ), com resolução espacial de 10 m, e no modo multiespectral (0,50–0,59  $\mu\text{m}$ ; 0,61–0,68  $\mu\text{m}$ ; 0,79–0,89  $\mu\text{m}$ ), com resolução de 20 m.

Cada sistema HRV cobre uma faixa de 60 km de largura, podendo operar no nadir (os dois sistemas cobrem juntos 117 km, com 3 km superposição) ou *off-nadir*, podendo os espelhos serem inclinados até 27° para cada lado a partir da vertical, em passos de 0,5°. Sua resolução temporal que seria de 26 dias pelas características orbitais, pode ser reduzida para 7 ou 11 vezes durante um ciclo, graças à sua mobilidade da visada *off-nadir*. Suas demais capacidades e limitações são comparáveis às do sistema LANDSAT.

Em 24 de março de 1998, foi lançado com sucesso pelo foguete Ariane a partir da Guiana Francesa, o novo satélite francês de observação da Terra SPOT 4. Com uma maior capacidade de gravação a bordo, será possível melhorar sua capacidade de aquisição global, contando ainda com uma nova banda espectral na faixa do infravermelho-médio (1,58–1,75  $\mu\text{m}$ ). A vida útil nominal do satélite, que até o SPOT 3 era de 3 anos, foi ampliada para 5 anos, garantindo a continuidade do programa depois do ano 2000.

A banda pancromática foi modificada para o intervalo entre 0,61–0,68  $\mu\text{m}$ , permitindo a gravação dos dados com resoluções de 10 m ou 20 m a bordo do satélite. O instrumento *Vegetation* também foi instalado no satélite, permitindo uma varredura larga de 2.000

km, com resolução espacial de 1 km e alta resolução radiométrica. Este instrumento utiliza as mesmas bandas multiespectrais dos sensores HRV, além de uma banda entre 0,43-0,47  $\mu\text{m}$  para aplicações oceanográficas.

Seguindo o SPOT 4, a família SPOT está programando o SPOT 5 com um novo sensor a bordo, o HRG (*High Resolution Geometry*). O novo sensor apresentará uma resolução de 5 m no modo pancromático e 10 m de resolução espacial no modo multiespectral. O intervalo espectral da banda pancromática retornará para 0,51-0,73  $\mu\text{m}$ .

### 5.3 O SENSOR SeaWiFS/SEASTAR

Devido à natureza dinâmica do clima e do oceano mundial, e à importância do papel dos oceanos nas mudanças climáticas globais, ficou aparente à comunidade oceanográfica que novos sensores deveriam suceder o *Coastal Zone Color Scanner - CZCS* (Hooker *et al.*, 1992). Desta forma, o *Sea-viewing Wide-field-of-view Sensor* (SeaWiFS) foi lançado a bordo da missão espacial *SeaStar* em agosto de 1997. O propósito do Projeto SeaWiFS é fornecer dados quantitativos das propriedades bio-ópticas dos oceanos, examinando os fatores oceânicos que afetam as mudanças globais. Será possível avaliar o papel dos oceanos no ciclo do carbono global, assim como em outros ciclos biogeoquímicos, através de programas de pesquisa abrangentes. Os dados do SeaWiFS serão empregados para esclarecer a magnitude e variabilidade da concentração de clorofila e produtividade primária, e quantificar as relações entre a física dos oceanos e os padrões de produtividade em grande e mesoescala (McClain *et al.*, 1992).

O SeaWiFS supera o CZCS ao fornecer uma cobertura global a cada 48 horas, um esquema de correção atmosférica aperfeiçoado e uma determinação da concentração de clorofila mais precisa (Falkowski *et al.*, 1998). A velocidade com que esta concentração varia no tempo e/ou quanta fotossíntese está ocorrendo durante o dia é chamada de produtividade primária (primária porque é a fase inicial e crítica da teia alimentar). Para

entender a produtividade nos oceanos, inicialmente é preciso ser capaz de estimá-la. A utilização de algoritmos desenvolvidos para dados orbitais de cor da água permite a verificação dos produtos derivados (produtividade primária, clorofila ou parâmetros geofísicos) através de medidas *in situ*.

O sensor SeaWiFS possui bandas espectrais com resoluções espacial e temporal similares às do AVHRR/NOAA (Tabela 5.3.2). Algumas características do sistema orbital SeaStar/SeaWiFS estão na Tabela 5.3.1.

**TABELA 5.3.1 - BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR SEAWIFS**

BANDA	$\lambda$ SeaWiFS (Nm)	$\lambda$ AVHRR (nm)
1	402-422	580-680
2	433-453	725-1100
3	480-500	3550-3930
4	500-520	1030-1130
5	545-565	1150-1250
6	660-680	----
7	745-785	----
8	845-885	----

**TABELA 5.3.2 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA SEASTAR/SEAWIFS**

RESOLUÇÃO NO NADIR	1,1 km LAC; 4,5 km GAC
TIPO DE ÓRBITA	Heliossíncrona, 705 km
CRUZAMENTO COM EQUADOR	12:00, $\pm 20$ min., descendente
FAIXA IMAGEADA	2800 km LAC ( $\pm 58.3^\circ$ ); 1505 km GAC ( $\pm 45^\circ$ )
RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA	10 bits

#### 5.4 O RADIÔMETRO AVHRR/NOAA

Em 1º de abril de 1960, o primeiro satélite meteorológico do mundo foi lançado pelos EUA. O TIROS-1 (*Television and Infrared Observation Satellite*) demonstrou sua capacidade na aquisição de imagens sobre a Terra. O impacto destas observações iniciais

levou ao desenvolvimento de uma série de satélites que continua em operação até os dias de hoje, com os satélites do tipo ATN (*Advanced* TIROS-N) NOAA-12, NOAA-14 E NOAA-15.

Os satélites operam em órbita heliossíncrona, circular, quase-polar, com altitude média de 850 km. Como o número de órbitas por dia não é inteiro (14,1), a trajetória suborbital do satélite não se repete diariamente, ainda que a hora solar local de passagem do satélite seja essencialmente a mesma para todas as latitudes. As longitudes de cada passagem da órbita pelo equador são variáveis em função da rotação da Terra (Kidwell, 1995).

O principal instrumento a bordo destes satélites é o AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) que além de fornecer imagens diurnas e noturnas no visível e infravermelho, fornece dados para a determinação da temperatura da superfície do mar (TSM) e identificação de gelo sobre o mar, além de outras aplicações. O AVHRR é um sistema de varredura transversal que apresenta cinco canais espectrais. As bandas espectrais do AVHRR estão na Tabela 5.3.1. O campo de visada instantânea do satélite é de aproximadamente 1,4 miliradianos, o que leva a uma resolução no nadir de 1,1 km. A cada linha imageada, o sensor realiza uma abertura de  $\pm 55,4^\circ$  em relação ao nadir, cobrindo uma faixa aproximada de 2.400 km de largura.

O DCS (*Data Collection System*) coleta dados ambientais de plataformas fixas ou derivadores como bóias, balões, animais e outras plataformas remotas, e os retransmite para estações centrais. Esses dados são gerenciados pelo sistema ARGOS. O sistema SRSAT (*Search and Rescue Satellite Aided Tracking*) é também de grande utilidade para operações de busca e salvamento no mar.

A obtenção da TSM a partir do AVHRR tem sido empregada em diversas aplicações tais como estudos de mudanças globais, identificação de vórtices, meandramentos, ressurgências e frentes, fornecimento de suporte à pesca, monitoramento dos campos de

temperatura, entre outros. Na literatura nacional e internacional, podem ser encontrados diversos trabalhos que demonstram a utilidade das imagens obtidas na região do infravermelho.

## 5.5 O RADIÔMETRO DA SÉRIE GOES/VAS

Os satélites de órbita geoestacionária da série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) estão em órbitas a 36.000 km de altitude, com velocidades de 11.000 km/h. O radiômetro de varredura por rotação no visível (resolução espacial de 1, 2, 4 e 8 km) e infravermelho VAS (*Visible and Infrared Spin Scan Radiometer - VISSR, Atmospheric Sounder*) adquire, em sua banda do infravermelho termal, imagens dos oceanos com resolução espacial no nadir de 8 km a 14 km, a cada meia hora, fornecendo uma visão oblíqua de quase 2/3 da superfície terrestre. A distribuição das bandas espectrais do VAS é a seguinte: 0,55–0,75  $\mu\text{m}$  (visível) 8 canais; 3,7–7,3  $\mu\text{m}$  (infravermelho próximo) 2 canais; 7,7–14,7  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio) 2 canais; 6,7–14,7  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio e termal) 2 canais.

A principal utilização desses satélites é na área de meteorologia, porém, a alta resolução temporal das imagens pode auxiliar em estudos de processos dinâmicos, inferindo a quantidade diária de energia de ondas curtas sobre os oceanos pela estimativa das propriedades de absorção das nuvens, o que se constitui em valiosa informação tanto para a oceanografia como para a meteorologia.

Os satélites GOES também possuem sistemas de coleta de dados de plataformas remotas fixas ou móveis (similar ao ARGOS do NOAA), WEFAX que é um serviço de fax meteorológico, entre outros. Está previsto o lançamento do GOES-Next em substituição aos satélites da série, com novos sensores e uma plataforma baseada no satélite indiano INSAT.

## 5.6 O SATÉLITE EUROPEU - ERS

O programa ERS (*European Remote Sensing Satellite*) teve seu primeiro satélite lançado em julho de 1991 (ERS-1). O programa é administrado pela *European Space Agency* (ESA) e tem como principal objetivo a utilização de sistemas ativos de microondas para o estudo de processos oceanográficos. O ERS-2 foi lançado em maio de 1995, a uma altitude de 800 km e em função de missões programadas a sua repetitividade pode variar de 3 dias, recobrando áreas limitadas do planeta, e 35 dias, para se obter uma cobertura completa da Terra.

O satélite é capaz de medir parâmetros de estado do mar, ventos superficiais sobre o oceano, circulação oceânica e gelo marinho. As temperaturas de superfície do mar também, podem ser obtidas a partir de um radiômetro instalado a bordo. A carga útil dos satélites é composta principalmente pelo *Active Microwave Instrument* (AMI) que compreende dois radares, o SAR e o escaterômetro de vento; um radar altímetro (RA), um radiômetro *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR), além do *Precise Range and Range-rate Radiometer* (PRARE) e do *Laser Retroreflector*.

O AMI é o instrumento mais importante e pode operar em três modos distintos: o SAR imageador, o SAR modo onda e o escaterômetro de vento. No modo imageador, o SAR obtém imagens de 100 km de largura, com resolução espacial de 26 m, na banda C (5,3 GHz), com polarização VV e pequeno ângulo de incidência (em torno de 23°) o que o torna adequado para aplicações oceanográficas.

No modo Onda, o SAR mede alterações na refletividade do radar sobre a superfície marinha, devidas a ondas, em imagens de 10 km x 6 km, em intervalos de 200 km. Estas “imagetes” são transformadas em um espectro de ondas fornecendo informações sobre os comprimentos e direções das ondas. Séries de espectros de potência podem ser utilizados para determinação da evolução do *swell*.

O escaterômetro de vento ilumina a partir de três antenas uma faixa de 500 km de largura fornecendo medições do retroespalhamento do sinal de radar a partir da superfície do mar numa grade de 25 km de espaçamento. O resultado são três medições independentes do retroespalhamento para cada ponto de grade, obtidos pelas três antenas e separados por um pequeno retardo de tempo. O cálculo do vetor do vento superficial em termos de sua intensidade e direção é possível utilizando esses *triplets* em um modelo matemático que define a relação entre o retroespalhamento, velocidade e direção do vento e ângulo de incidência da observação. Ainda que o escaterômetro não possa operar em paralelo ao SAR imageador, ele pode operar juntamente com o modo Onda.

O RA é um radar de visada nadir projetado para medir os ecos a partir do oceano e/ou do gelo. No modo oceano, é utilizado para medir a altura significativa de ondas (com precisão em torno de 0,5 m), velocidade do vento superficial, e elevação da superfície do mar (0,1 m de precisão nas medidas de altitude), que são úteis para estudos de correntes oceânicas, marés e do geóide global. No modo gelo, o instrumento fornece, ainda que com resolução menor, informações sobre a topografia superficial da cobertura de gelo, tipos de gelo e limites entre gelo e água.

O ATSR consiste de dois instrumentos: o radiômetro infravermelho (IRR) e o perfilador de microondas (MWS). O IRR é um radiômetro com quatro canais (1,6  $\mu\text{m}$ ; 3,7  $\mu\text{m}$ ; 10,8  $\mu\text{m}$ ; e 12,0  $\mu\text{m}$  ) fornecendo temperaturas superficiais com precisão melhor que 0,5K. A técnica de varredura permite o imageamento de uma mesma área sobre o oceano por dois ângulos de visada diferentes ( $0^\circ$  e  $52^\circ$ ), com largura de 500 km. As duas visadas podem ser combinadas para correção dos efeitos atmosféricos na obtenção das TSM's.

Para condições de céu claro (sem cobertura de nuvens), os pixels de 1 km x 1 km podem apresentar uma precisão relativa em torno de 0,1K. O ATSR-2 a bordo do ERS-2 possui



ainda mais três canais, dois no visível e um no infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

O MWS é um radiômetro passivo de microondas com visada nadir, que fornece medições do teor de vapor d'água na atmosfera. Estes dados são utilizados para melhorar a precisão das TSM's e também, fornecer uma correção troposférica para o radar altímetro.

A capacidade do ERS-2 em adquirir dados globais e imagens locais sobre o oceano e gelo, contribui para o conhecimento científico de diversos tópicos, como por exemplo: circulação oceânica, marés, e frentes; ocorrência e propagação de ondas internas; relações entre os ventos e ondas globais; batimetria de águas rasas; e cobertura do gelo polar ou sobre o mar. Além disso, os dados ERS podem ser aplicados a atividades *offshore*, pesca, roteamento de navios, dimensionamento de estruturas oceânicas, detecção de embarcações, monitoramento de poluição no mar, etc.

#### 5.7 O SATÉLITE CANADENSE - RADARSAT

Foi lançado em novembro de 1995 para ser um satélite comercial, a semelhança do SPOT francês. Possui um único sensor a bordo que é o SAR, operando na banda C (5,3Ghz), polarização HH. Pode fornecer imagens independentemente das condições meteorológicas, diurnas e noturnas. Além de aplicações oceanográficas, também pode atender a outras aplicações como diferenciação de áreas desmatadas, áreas de cultivo, florestas etc., mapeamento de relevo, separação entre terra e água, identificação de alvos pontuais (navios, prédios etc.), diferenciação de graus de umidade no solo, entre outras.

Uma característica importante do RADARSAT é que pode ser programado para obter imagens em diferentes modos de aquisição, satisfazendo as necessidades específicas dos

usuários. Cada modo de aquisição é definido pelo tamanho da área imageada e pelo tipo de resolução espacial do dado.

Outra característica é que diferentes modos de aquisição podem ser obtidos em diferentes ângulos de incidência, variando entre 20° e 60°. O ângulo de incidência da radiação é um parâmetro de extrema importância para muitas aplicações.

A órbita do RADARSAT tem um ciclo de 24 dias, mas a antena pode ser movimentada aumentando a frequência de aquisição de dados sobre uma determinada área da superfície terrestre. Esta frequência pode variar com a latitude e com o modo de aquisição. No modo ScanSAR, por exemplo, o ciclo pode variar entre 2 e 5 dias no equador e 1 dia na latitude de 70°.

## 5.8 A COOPERAÇÃO FRANCO-AMERICANA TOPEX/POSEIDON

A missão altimétrica TOPEX/POSEIDON (T/P) iniciada em 1992 no âmbito do projeto WOCE (*World Ocean Circulation Experiment*), é dedicada exclusivamente à altimetria e tem como objetivo principal estudar os padrões globais de circulação oceânica superficial procurando melhorar o entendimento do papel dos oceanos na manutenção/alteração do clima mundial. Embora tenham sido consideradas um grande avanço na oceanografia, as missões altimétricas que precederam o T/P, como o SEASAT, GEOSAT e ERM, não obtiveram dados suficientemente precisos para o estudo de diversos aspectos da circulação oceânica. O T/P foi projetado exclusivamente para o estudo da circulação oceânica em grande escala. O satélite mantém uma órbita de 1336 km de altitude, com 66° de inclinação e uma resolução temporal é de 10 dias. O satélite está equipado com dois altímetros de última geração: o ALT (NASA) e o SSALT (CNES).

O ALT ou TOPEX, é o principal instrumento da missão, sendo o primeiro altímetro de dupla banda já utilizado orbitalmente. As medições são realizadas em duas frequências de

microondas (5,3 e 13,6 GHz), que são conjugadas para minimizar os efeitos ionosféricos. A precisão altimétrica obtida é de 3 cm. O SSALT ou POSEIDON é um altímetro experimental monobanda (13,6 GHz), que tem como objetivo principal a validação de uma tecnologia de baixa-energia, pequeno peso e longa duração para utilização em missões futuras.

## 5.9 OUTROS SATÉLITES

O primeiro Satélite de Coleta de Dados da missão espacial completa brasileira SCD-1, foi projetado e construído no INPE. A Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) é um programa nacional de capacitação tecnológica coordenado pela Comissão Brasileira de Atividades Espaciais e pela Agência Espacial Brasileira. A aplicação principal da carga útil do SCD-1, assim como do SCD-2, em órbita a 750 km de altitude (inclinação de 25° em relação ao equador), é a retransmissão de dados ambientais coletados na superfície terrestre e transmitidos ao satélite por plataformas automáticas (PCDs) espalhadas por todo o Brasil. Este tipo de órbita do SCD-1 e 2 propicia muito boas condições de visibilidade e passagens frequentes sobre o território brasileiro. Posteriormente, serão lançados satélites de SR - SSR 1 e 2, no âmbito da MECB.

Poderiam ainda ser citados os satélites chineses de órbita polar Feng Yun 1 e 2, os satélites indianos da série INSAT, os satélites militares americanos DMSP, o satélite geostacionário europeu METEOSAT, o satélite japonês ADEOS, entre vários outros. Porém, devido às limitações de tempo e espaço para a apresentação deste curso, deixaremos para uma outra oportunidade.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Eventos como o El-Niño que causam enormes prejuízos materiais e até perdas de vidas humanas, e o potencial efeito do aquecimento global devido ao aumento nos níveis de

dióxido de carbono na atmosfera proveniente da queima de combustíveis fósseis (efeito estufa), enfatizam a importância dos oceanos sobre o clima mundial.

Satélites de pesquisa tem demonstrado sua capacidade em medir parâmetros e/ou variáveis oceânicas importantes para o clima, assim como para a pesca, transportes marítimos, segurança nacional, monitoramento ambiental etc. Mesmo com a tecnologia espacial atualmente disponível, ainda existe uma insuficiência de informações sobre ventos superficiais, correntes oceânicas, produtividade biológica e do campo gravitacional da Terra em muitas regiões do planeta.

Programas de pesquisa com satélites tem ampliado nosso conhecimento e entendimento dos oceanos. Evidências deste progresso são os novos programas que utilizam a tecnologia espacial para aplicações em oceanografia.

O programa EOS (*Earth Observing System*) objetiva adquirir e agrupar um banco de dados globais obtidos via SR orbital, por um período igual ou superior a uma década, capaz de desenvolver estudos conclusivos sobre o sistema oceano, no que diz respeito à circulação oceânica, temperatura da superfície do mar, estado do mar e atividade biológica dos oceanos.

Novas missões de satélites levando a bordo sensores de microondas - altímetros, escaterômetros e SAR estão programadas para os próximos anos, como por exemplo, o ENVISAT e o METOP.

Atualmente, quase todos os ramos da Oceanografia consideram o SR como uma ferramenta de grande utilidade na aquisição de dados de interesse. O desafio àqueles que desenvolvem pesquisas em SR, mais especificamente na área de Oceanografia, é o de explorar teorias e conceitos e desenvolver aplicações que não se concretizariam somente com a utilização de métodos convencionais. Neste contexto geral, são incluídos os

estudos de processos oceanográficos que requerem uma resolução espacial sinóptica e uma capacidade de amostragem por longo período, características estas possíveis de serem obtidas com o emprego de satélites.

Se desejamos acompanhar esta evolução, não devemos esquecer os princípios básicos envolvidos na aquisição de dados por SR, bem como não podemos deixar de conhecer os sistemas e os sensores em disponibilidade e suas técnicas de utilização, para nos beneficiarmos da melhor forma possível, de mais esta conquista do Homem na procura da compreensão do meio em que vive.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Colwell, R. N. ed. *Manual of remote sensing*. Falls Church : ASPRS, 1983. 2 v.

Falkowski, P. G.; et al. **Satellite primary productivity data and algorithm development**: a science plan for mission to planet Earth. In: Hooker, S.B.; Firestone, E.R.; ed. : *SeaWiFS Technical Report Series, V.42 (NASA Technical Memorandum 104566)*. Washington, DC: NASA, 1998. 36 p.

Hooker, S. B.; Esaias, W.E.; Feldman, G. C.; Gregg, W. W.; McClain, C. **An overview of SeaWiFS and ocean color**. In: Hooker, S.B.; Firestone, E.R., ed. : *SeaWiFS Technical Report Series, V.1 (NASA Technical Memorandum 104566)*. Washington, DC : NASA, 1992. 24 p.

Kidwell, K. B. ed. **NOAA polar orbiter data users guide**. Washington, D.C.: NOAA/NESDIS/NCDC/SDSD, 1995. 260p.

McClain, C.; et al. **SeaWiFS calibration and validation Plan**. In: Hooker, S.B.; Firestone, E.R., ed. : *SeaWiFS Technical Report Series, V.3 (NASA Technical Memorandum 104566)*. Washington, DC : NASA, 1992. 43 p.

Robinson, I. S. **Satellite oceanography**: an introduction for oceanographers and remote sensing scientists. West Sussex : Ellis Horwood, 1985. 455p.

United Intergovernmental Oceanographic Commission (UNESCO.IOC-1). **Global ocean observing system (GOOS)**. Paris : s.d., p.12. Folder

## **CAPÍTULO 12**

# **ÁGUA: RECURSOS RENOVÁVEIS**

**Evlyn M. L. de Moraes Novo\***  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [evlyn@ltid.inpe.br](mailto:evlyn@ltid.inpe.br)





## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>12-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12-7</b>
<b>1. A ÁGUA E OS PROCESSOS VITAIS .....</b>	<b>12-9</b>
<b>2. A ÁGUA NO PLANETA .....</b>	<b>12-13</b>
<b>3. A ÁGUA NO BRASIL .....</b>	<b>12-17</b>
<b>4. A IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA ESPACIAL NO MANEJO DOS RECURSOS HIDRICOS DO BRASIL .....</b>	<b>12-18</b>
<b>5. ÁGUA, RECURSO RENOVÁVEL .....</b>	<b>12-23</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>12- 23</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL DA MATÉRIA VIVA .....</b>	<b>12-9</b>
<b>2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA MOLÉCULA DE ÁGUA .....</b>	<b>12-10</b>
<b>3 – PONTES DE HIDROGÊNIO DAS MOLÉCULAS DE ÁGUA .....</b>	<b>12-11</b>
<b>4 – DISTRIBUIÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS E FORMAS DE OCORRÊNCIA DA ÁGUA NO PLANETA .....</b>	<b>12-15</b>
<b>5 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA DISPONIBILIDADE DA ÁGUA .....</b>	<b>12-16</b>
<b>6 – EVOLUÇÃO DA DEMANDA DE ÁGUA NO BRASIL .....</b>	<b>12-17</b>
<b>7 – REDE DE TELEMETRIA DO ANEEL .....</b>	<b>12-20</b>
<b>8 – COMPOSIÇÃO COLORIDA DE IMAGENS MULTITEMPORAIS DO RADARSAT .....</b>	<b>12-22</b>
<b>9 – EVOLUÇÃO DA OCUPAÇÃO DAS MARGENS DO RIO ENTRE 1989 E 1998 .....</b>	<b>12-23</b>







## LISTA DE TABELAS

<b>1 – TEMPO DE RENOVAÇÃO DA ÁGUA NOS DIFERENTES SISTEMAS DO PLANETA TERRA .....</b>	<b>12-14</b>
<b>2 – REGIÕES CRÍTICAS NO TOCANTE À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA USOS MÚLTIPLOS .....</b>	<b>12-18</b>





## 1. A ÁGUA E OS PROCESSOS VITAIS

A vida, tal como a conhecemos até o momento, está intimamente relacionada à presença da água. Independentemente de cultura ou religião, o senso comum do homem através da história o guiou para junto de ribeiros de água doce para matar sua sede, o guiou para estuários ricos em peixes para matar sua fome.

A importância da água para a vida pode ser visualizada na Figura 1. A análise da matéria que constitui o seres vivos revela a predominância da água: em média cerca de 80 % do peso de qualquer ser vivo é devido à água. Os demais constituintes moleculares do organismo vivo comparecem em muito menores quantidades.

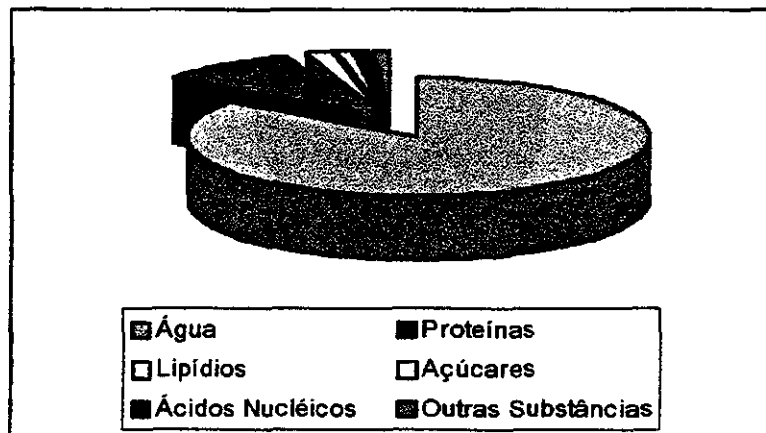


Fig. 1 – Composição química percentual da matéria viva

É claro que esses dados sobre a importância da água para a vida no planeta fazem parte de recentes descobertas da ciência. Entretanto, mesmo os povos antigos, intuitivamente, reconheciam o papel fundamental da água para a vida no planeta. Se vocês tiverem curiosidade de procurar na Bíblia, vocês lerão que “o Espírito de Deus pairava sobre as águas”, o que metaforicamente nos indica a importância da água na explicação teológica da origem da vida.

Um rápido inventário da história das civilizações vai mostrar que as primeiras civilizações floresceram às margens de grandes rios, ou às margens dos mares. Os Caldeus floresceram às margens do Eufrates, os Egípcios às margens do Nilo, os Sírios às margens do Mediterrâneo. Os Chineses às margens do Yang-Tse, os Indus às margens do Ganges, os Hebreus às margens do Jordão .

Mas o que faz da água um elemento tão importante na natureza? Para responder a essa questão, temos que estudar um pouco as propriedades da molécula da água. Na Figura 2, podemos observar uma representação simplificada da molécula de água.

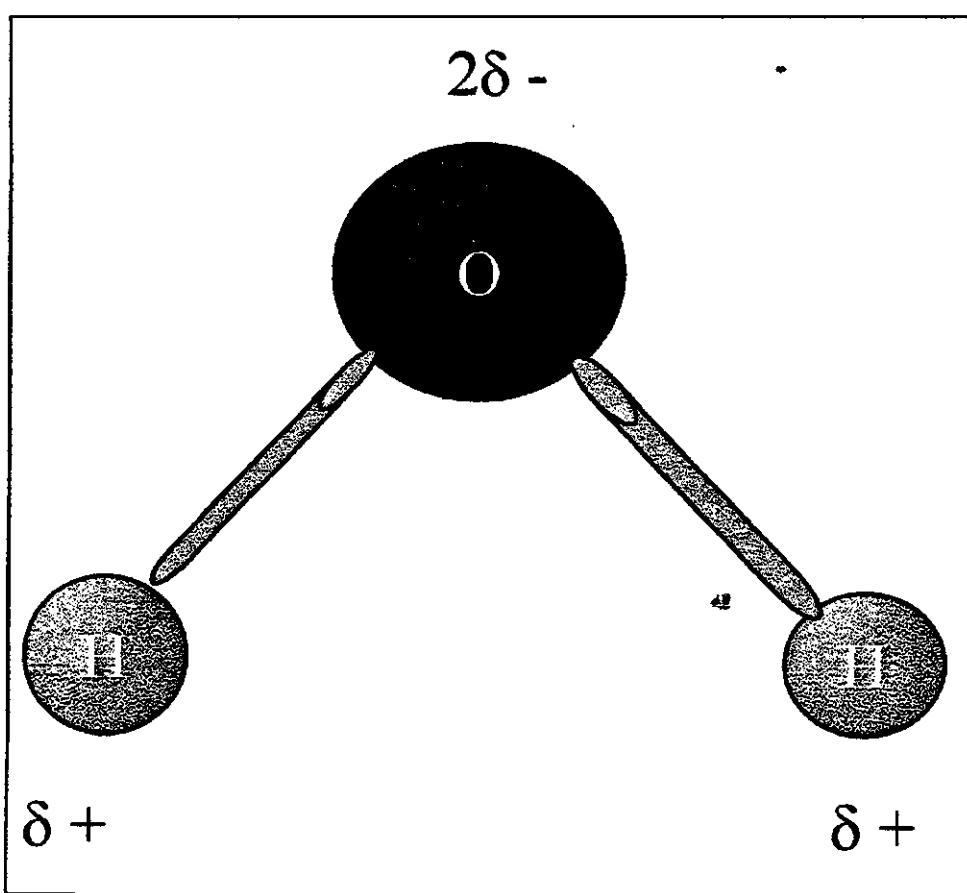


Fig. 2 – Representação esquemática de uma molécula de água.  
Fonte: Adaptado de Wetzel (1975, p. 8)

A molécula de água é formada por dois átomos de hidrogênio ligados a um átomo de Oxigênio ( $H_2O$ ). Esses átomos se organizam de tal forma que a molécula de água apresenta uma fraca carga positiva de um lado e uma carga negativa correspondente na

região oposta. Assim sendo, as moléculas de água podem ser comparadas a pequenos ímãs, ou seja, são dotadas de pólos negativos e positivos. São portanto moléculas polares ou polarizadas. Esta polaridade das moléculas da água explicam muitas de suas propriedades singulares. Os hidrogênios de uma molécula de água são atraídos pelo oxigênio das moléculas vizinhas formando com elas um tipo de ligação química conhecida por ponte de hidrogênio, para se ligarem ao oxigênio

A Figura 3 ilustra o conceito de formação das pontes de hidrogênio. No estado líquido, as pontes de hidrogênio estão continuamente compondo-se e decompondo-se em perpétuo rearranjo que dando à substância o seu caráter fluido. No gelo, a molécula fica estática, unida a moléculas vizinhas, a uma distância média maior do que na água líquida, o que explica sua menor densidade.

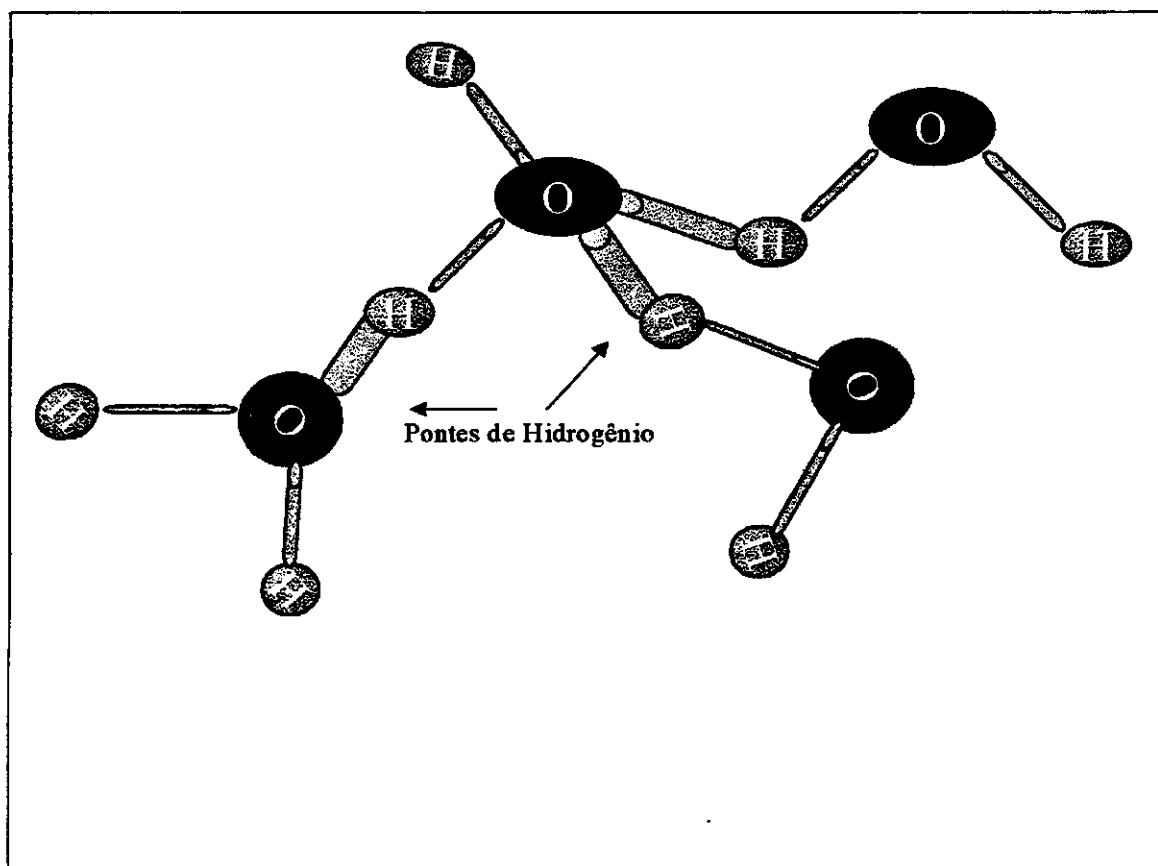


Fig. 3 – Pontes de Hidrogênio das Moléculas de Água

A água é um excelente solvente, capaz de dissolver grande variedade de substâncias tais como sais, gases, açúcares, aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc. A água é um poderoso indutor de reações químicas entre outras substâncias. A maioria das reações químicas ocorrem mais facilmente na presença da água do que de outros solventes. É a polaridade da água que explica sua versatilidade como solvente, visto que suas moléculas podem se associar tanto a íons positivos, quanto negativos. Isso portanto explica a terrível atração da água pelos íons salinos que deu origem aos mares.

A água participa como reagente em inúmeras reações químicas que acontecem no Planeta Terra. Na fotossíntese, por exemplo, os hidrogênios da glicose que se forma na reação provem da molécula da água. Isso significa que não há fotossíntese na ausência da água. Praticamente, todo o oxigênio existente na atmosfera resulta da fotossíntese, sendo proveniente da quebra da molécula de água. Isso significa que sem água, não haveria oxigênio em abundância como a que encontramos na atmosfera.

Em função do papel da molécula da água nas reações químicas, estas reações podem ser classificadas em reações por desidratação (a reação libera água como produto da síntese de moléculas de determinadas substâncias no interior das células). Existem reações em que a molécula da água é utilizada para “quebrar” ou reagir com outras moléculas. Neste caso as reações são por hidrólise.

A água também atua na natureza como um moderador de temperatura. A vida existe em faixas limitadas de temperatura, fora das quais, o metabolismo dos organismos pára de agir. A água tem um papel fundamental evitando a ocorrência de variações bruscas de temperatura no ambiente. Esta propriedade está relacionada ao elevado calor específico da água, ao elevado calor de vaporização e ao elevado calor de fusão.

O calor específico da água é definido como a quantidade de calor que precisa ser absorvida por 1 g da substância para que haja um aumento de temperatura equivalente a 1° C. A água pode absorver ou perder grande quantidade de calor sem alterar sua temperatura. O calor de vaporização da água é definido como a quantidade de calor que

ela precisa absorver para que 1 grama desta passe ao estado gasoso. A água tem elevado calor de vaporização quando comparada a outras substâncias líquidas. A evaporação da água é um mecanismo fundamental para evitar o superaquecimento dos organismos terrestres. As folhas das plantas não se queimam durante um dia de sol porque a maior parte do calor absorvido por elas é liberado através da evapotranspiração. O alto calor de evaporação da água é consequência da forte coesão entre suas moléculas. Para que uma molécula de água passe do estado líquido ao gasoso é necessário que sejam rompidas as pontes de hidrogênio, o que demanda grande energia.

A água também tem um elevado calor de fusão. Para se tornar gelo, ela tem que liberar muito calor, o que requer exposição a baixas temperaturas por tempo prolongado. As pontes de hidrogênio são responsáveis pela coesão entre as moléculas de água. Essa coesão, por sua vez, é responsável pela grande tensão superficial apresentada pela água, o que permite que insetos, plantas, etc., tenham condições de flutuarem sobre ela.

A natureza polar da molécula de água permite que esta se una a diferentes tipos de materiais, o que torna a água uma espécie de “mensageiro” entre os diferentes componentes da natureza.

A coesão e a adesão são responsáveis pela tendência que a água tem de subir através de materiais porosos, através de um processo conhecido por capilaridade. E através dessa propriedade que a água do solo pode ser levada até o topo das grandes árvores.

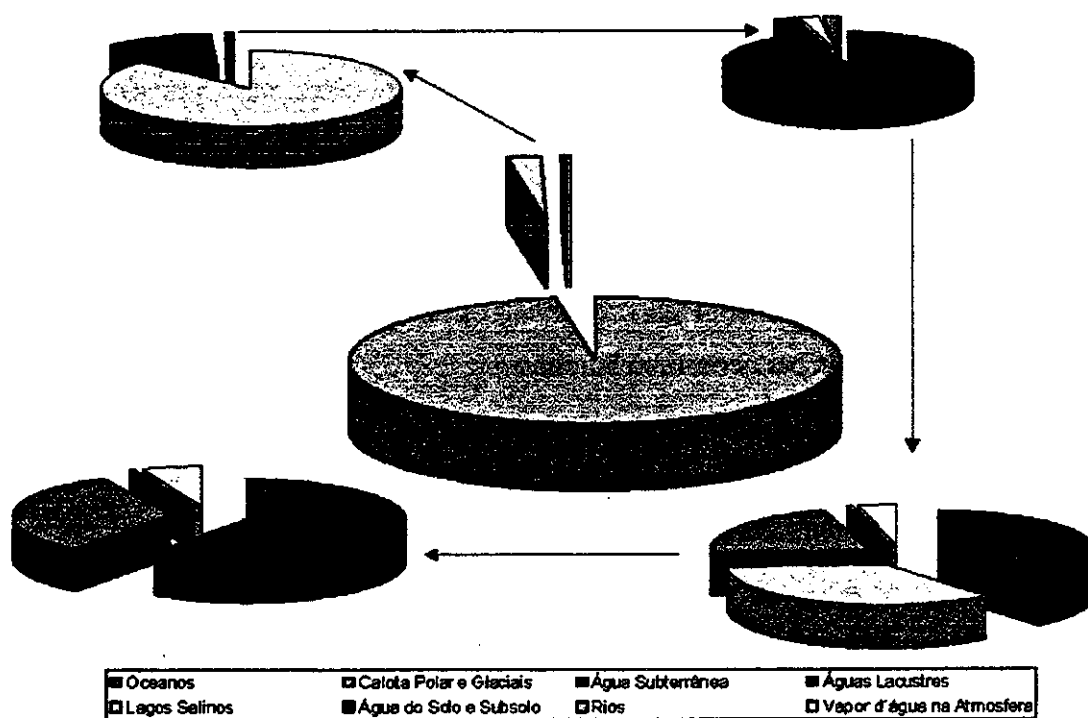
## **2. A ÁGUA NO PLANETA**

Em decorrência das características tão peculiares da molécula de água, ela se apresenta em diferentes formas no planeta. Ela ocorre na forma líquida, e pode ser doce ou salgada. Ela se apresenta, na forma sólida, como cristais de nuvens, como neve, como icebergs. Ela se apresenta como vapor d'água transportando umidade através da atmosfera. Ela se apresenta no interior dos solos, nos lençóis freáticos, no interior das rochas, na biosfera. As proporções com que ela ocorre no planeta Terra, entretanto, não são constantes no Tempo e no Espaço.

A Figura 4 permite observar a distribuição aproximada dos diferentes tipos e formas de ocorrência da água no Planeta Terra (descontada a água biológica). Pode-se perceber, que a proporção de água disponível para consumo humano (água doce) é proporcionalmente insignificante em relação ao total de água existente. Um outro fato importante, em relação à água, entretanto, é que ela além de estar distribuída de modo não eqüitativo entre suas diferentes formas de manifestação, os diferentes sistemas de ocorrência da água estão sujeitos a tempos diferentes no tocante à capacidade de renovação conforme pode ser observado na Tabela 1.

**TABELA 1 – TEMPO DE RENOVAÇÃO DA ÁGUA NOS DIFERENTES SISTEMAS DO PLANETA TERRA**

<b>Oceanos - 2500 anos</b>
<b>Água subterrânea - 1400 anos</b>
<b>Calota Polar - 9700 anos</b>
<b>Glaciais - 1600 anos</b>
<b>Permafrost - 10 000 anos</b>
<b>Lagos - 17 anos</b>
<b>Pântanos - 5 anos</b>
<b>Água do Solo - 1 ano</b>
<b>Atmosfera - 8 dias</b>
<b>Água biológica -algumas horas</b>



Fonte: Wetzel, 1975

Fig. 4 - Distribuição dos diferentes tipos e formas de ocorrência da água no planeta.  
 Fonte : Baseada no Wetzel (1975, p. 1)

As águas continentais cobrem menos do que 2 % da superfície terrestre, ou seja, cerca de  $2,5 \times 10^6 \text{ km}^2$ . Segundo Wetzel (1975) cerca de 20 lagos contêm uma grande proporção da água continental. O lago Baikal, localizado na Sibéria, possui uma área de  $31\,500 \text{ km}^2$ , uma profundidade média de 740 m e um volume de água de cerca de  $23\,000 \text{ km}^3$ . Estima-se que cerca de 20 % da água doce do planeta está contida naquele lago. Por outro lado, o Brasil possui cerca de 12 % da disponibilidade hídrica do planeta. A água portanto não é distribuída uniformemente no espaço e no tempo, o que gera conflitos em sua utilização.

A Figura 5 permite verificar as disparidades na distribuição da água no Planeta Terra para os diferentes continentes. A análise dessa figura permite verificar que em termos de disponibilidade natural do recurso hídrico existem diferenças marcantes entre as

diferentes regiões. A América do Sul é a região de maior disponibilidade natural de recursos expressa em termos de  $m^3$  de água por superfície ( $km^2$ ). Quando a disponibilidade natural, entretanto, é associada à população consumidora do recurso, vemos que há regiões em condições extremamente críticas, tais como a África, a Ásia e a Europa em que a disponibilidade per capita é bastante reduzida. Algumas regiões estão em condições críticas pela baixa disponibilidade natural do recurso, como é o caso da África, enquanto outras regiões enfrentam o problema de superpopulação, como é o caso da Ásia. É esta distribuição desigual que tem levado a previsões de analistas políticos de que uma terceira guerra mundial poderia ocorrer em função da posse de novas fontes de água para consumo humano.

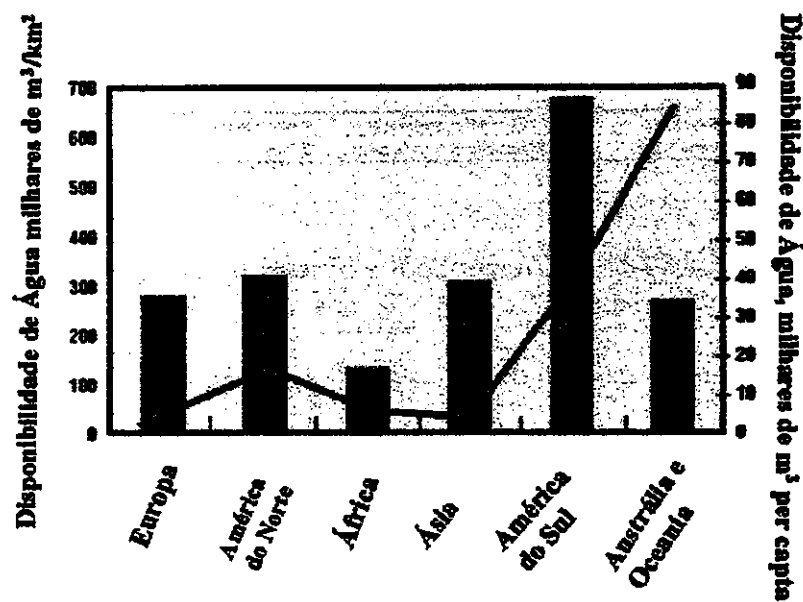


Fig. 5 - Distribuição espacial da disponibilidade da água.  
Fonte: Waterweb (1998)



### 3. A ÁGUA NO BRASIL

Embora o Brasil tenha abundância de recursos hídricos, sua distribuição no tempo e no espaço também é bastante variável. A disponibilidade hídrica do território brasileiro é estimada em cerca de  $177\,900\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , ou seja, cerca de 53 % da disponibilidade hídrica da América do Sul. Existem regiões como a Amazônica, onde os recursos hídricos são abundantes e sujeitos a baixa demanda devido à incipiente atividade econômica e baixa densidade populacional. Outras regiões do Brasil, como a região Nordeste, possuem baixo potencial hídrico e grande demanda devido à elevada densidade populacional. Na região sudeste, o racionamento da água já é uma prática em anos de seca prolongadas.

O grande problema no Brasil é que a demanda total de água tem crescido apesar do crescimento econômico ter sido inferior às necessidades do país. A Figura 6 mostra que a demanda total de água cresceu exponencialmente entre a década de 70 e 90, o que alerta para a necessidade de programas visando seu aproveitamento racional.

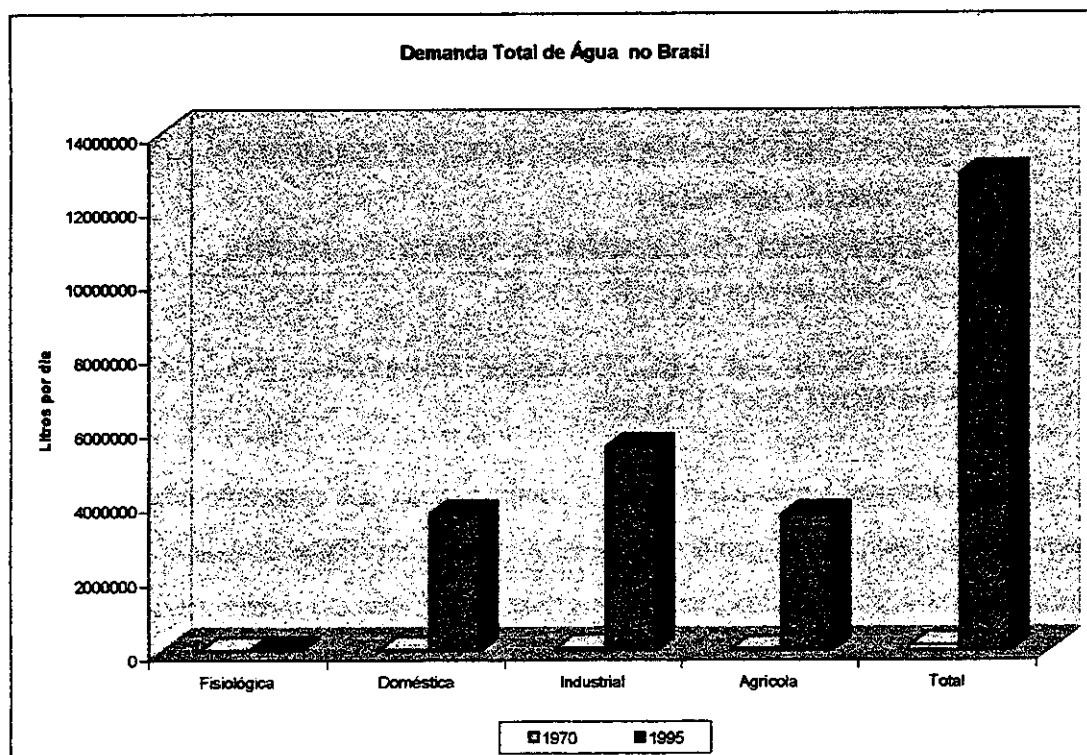


Fig. 6 – Evolução da Demanda de Água no Brasil  
Fonte : Adaptado de Esteves (1988, p. 46)

Como consequência da demanda constante por recursos hídricos, já existem hoje diversas regiões críticas no tocante à disponibilidade de água, conforme pode ser visualizado na Tabela 2.

**TABELA 2 – REGIÕES CRÍTICAS NO TOCANTE À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA USOS MÚLTIPLOS**

- 1) Região Metropolitana de São Paulo;**
- 2) Região de Cubatão;**
- 3) Bacia hidrográfica do Médio Tietê**
- 4) Bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, em Minas, São Paulo e Rio de Janeiro;**
- 5) Região Metropolitana do Rio de Janeiro;**
- 6) Bacias hidrográficas de Pernambuco;**
- 7) Região Metropolitana de Belo Horizonte;**
- 8) Região Metropolitana de Recife;**
- 9) Região Metropolitana de Salvador;**
- 10) Região Metropolitana de Porto Alegre;**
- 11) Região Metropolitana de Curitiba;**
- 12) Região de Volta Redonda;**
- 13) Bacia hidrográfica do Jacuí e estuário do Guaíba no Rio Grande do Sul;**
- 14) Região Sul do Estado de Santa Catarina**

FONTE : Barth e Pompeu (1987, p.42 )

#### **4. A IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA ESPACIAL NO MANEJO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO BRASIL**

Um dos grandes problemas em relação à administração dos recursos hídricos, seja em termos de sua quantidade quanto qualidade, é a disponibilidade de dados que permitam diagnosticar as condições dos recursos e prever tendências de médio e longo prazo em face de decisões políticas.

Num país das dimensões do Brasil, o gerenciamento dos recursos hídricos é muito complexo, porque são necessários recursos imensos para a implantação de redes de

coleta de dados. Essas redes em geral encontram-se aquém das necessidades de informação. Por isso, muito esforço tem sido realizado no sentido de implantar redes de coleta automática de dados via telemetria. A Agência Nacional de Energia Elétrica possui uma rede de coleta de dados baseada em plataformas de coleta de dados que são transmitidos para os satélites da série SCD lançados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e retransmitidos para as centrais de controle. A Figura 7 mostra a rede de estações de telemetria da ANEEL que é de grande utilidade para o gerenciamento dos recursos hídricos no tocante ao seu aproveitamento hidrelétrico.

Mas a tecnologia espacial traz outros benefícios ao manejo dos recursos hídricos. Um exemplo desse benefício é o uso de imagens de satélites de recursos naturais para o monitoramento do uso e da ocupação do solo nas bacias hidrográficas. Um dos maiores problemas no manejo dos recursos d'água é o uso inadequado da bacia hidrográfica, com a remoção da vegetação natural, o aterro das nascentes para a construção urbana, a disposição de resíduos sólidos (lixões) em áreas próximas a mananciais, entre outros. Como as imagens de satélite podem oferecer uma visão sinótica da superfície terrestre em diferentes datas, pode-se acompanhar com facilidade as modificações que o homem está impondo ao uso e ocupação da bacia e desta forma desenvolver mecanismos e políticas de controle.



Fig. 7 – Rede de Telemetria da Aneel  
Fonte: Aneel (2000)

Na Figura 8, por exemplo, podemos observar o reservatório da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, localizado no Estado do Pará, e construída na década de 70 como parte do Plano de Desenvolvimento Nacional e da Política de Integração da Amazônia promovida pelos governos do ciclo militar. Esta usina foi construída, sobretudo, para garantir o funcionamento das atividades de mineração ligadas à Cia Vale do Rio Doce e à exploração da minério da reserva de Carajás.

Durante o processo de construção da barragem, não houve a remoção da floresta, a qual foi submersa pelo lago de Tucuruí, um lago de 2 800 km<sup>2</sup> de superfície, profundidade máxima de 72 metros (na calha do rio Tocantins) e profundidade média de 18 metros. Como consequência, esse reservatório foi infestado por macrófitas aquáticas as quais trouxeram, entre outros problemas, o aumento da incidência de casos de malária, transtornos à navegação, problemas para a pesca artesanal (aquela pesca feita para subsistência). Esses problemas são agravados pela operação anual do reservatório.

O rio Tocantins tinha um regime natural caracterizado por um máximo de vazão no verão (Dezembro a Março) e um mínimo no período de menores precipitações (Maio a Setembro). Com a construção do reservatório, o nível da água no reservatório se mantém máximo entre Maio e Setembro e mínimo entre Dezembro e Março, invertendo deste modo o funcionamento natural do sistema aquático.

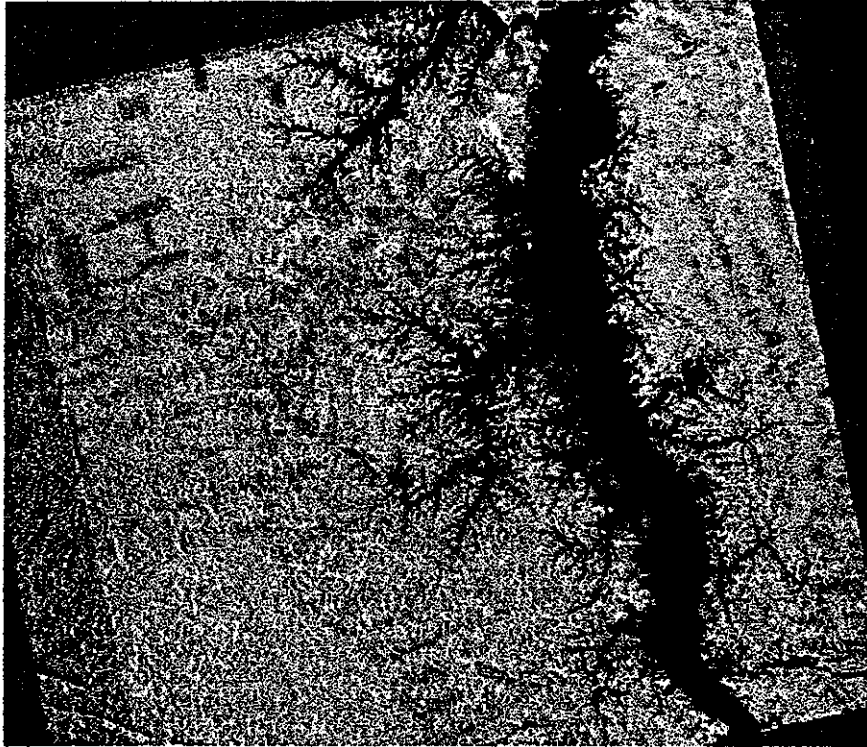
Essas alterações do regime natural do rio, a retenção de sedimentos e nutrientes em decorrência da barragem, a redução da velocidade da água, a decomposição da floresta, provocaram modificações nas cadeias biológicas pre-existentes, provocando o desaparecimento de algumas espécies, e a proliferação excessiva de outras.

A Figura 8, por exemplo, representa, uma composição colorida feita a partir de imagens obtidas pelo satélite canadense RADARSAT em três datas diferentes. A imagem adquirida em Maio de 1996 ( período em que o reservatório está começando a alcançar a cota máxima (72 m) está associada à cor vermelha; a imagem adquirida em Agosto de 1996 (período em que o reservatório já atingiu a cota máxima e está começando a liberação de água) está associada à cor verde; a imagem adquirida em Dezembro de 1996 (período em que o nível da água é mínimo, em torno de 68 metros) está associada à cor azul. Nessas imagens, as áreas escuras representam a água do reservatório que permaneceu com características de profundidade e estado superficial constante nas três datas. As regiões do reservatório em que a superfície da água foi dominada pela árvores emersas em Dezembro devido a redução do nível da água, aparecem em azul.

As imagens de satélite também permitem avaliar tendências de longo prazo. Por exemplo, na Figura 9, pode-se observar um segmento de rio e as transformações sofridas em suas margens em um década. Em 1989, observam-se pequenas propriedades ocupando as margens do rio e a planície de inundação. Em 1998, o número de propriedades e área ocupada por elas aumentou.

Observa-se que em 1989 o lago que ocupa o canto inferior esquerdo da imagem quase não tem ocupação em suas margens. Na imagem de 1998, essa ocupação já ocorre de

modo intenso. Este aumento da ocupação implica na remoção da cobertura vegetal natural, no aumento da descarga de esgoto e fertilizantes no corpo d'água, entre outros efeitos.



**Fig. 8 – Composição Colorida de Imagens multitemporais do RADARSAT**

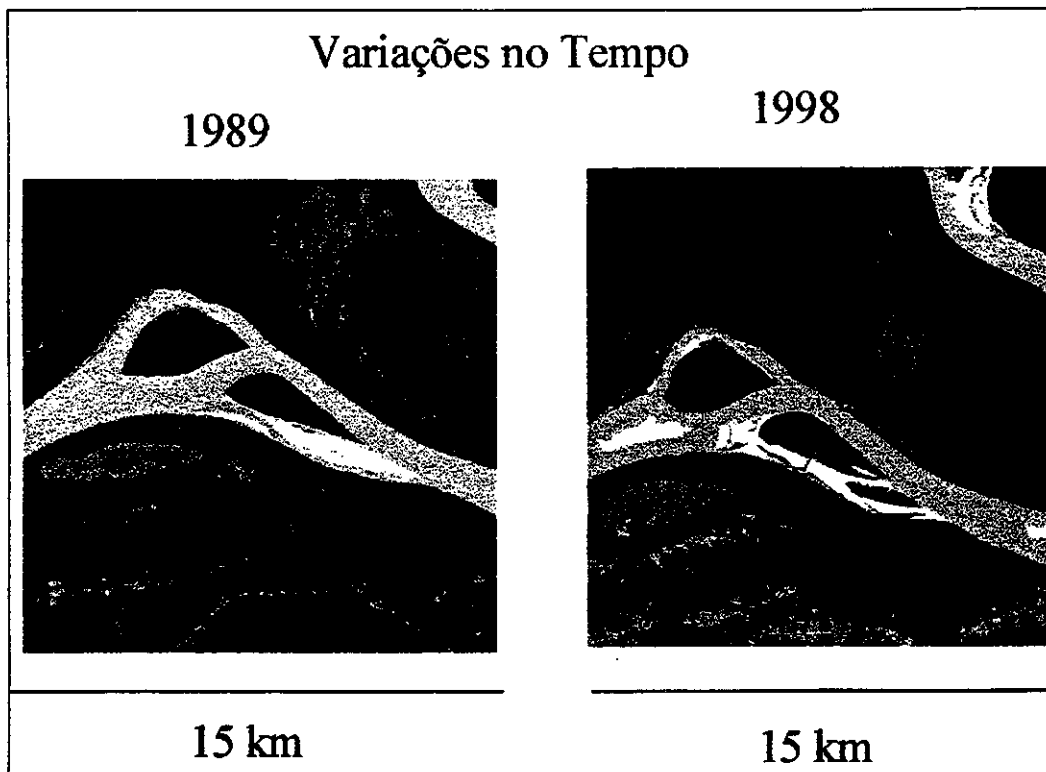


Fig. 9 – Evolução da ocupação das margens do rio entre 1989 e 1998.

## **5. ÁGUA, RECURSO RENOVÁVEL**

Face as informações que você recebeu, você pode decidir se podemos considerar a água um recurso renovável e infinitamente disponível para uso humano, ou se a água é um recurso escasso e que deve ser tratado com o mesmo cuidado com que tratamos, por exemplo, o petróleo. O homem viveu e se desenvolveu tecnologicamente por muitos milênios na superfície do planeta Terra, sem ter conhecimento do que fazer com um barril de petróleo. Mas o homem e toda a forma de vida como a conhecemos desapareceria da face da terra se água se esgotasse.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [on-line]. <http://www.aneel.gov.br>  
Abr. 2000.

Barth, F. T.; Pompeu, C. T. Fundamentos para a gestão de recursos hídricos. In : Barth, F. T. et al. ed. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo : Nobel/ABRH, 1987.

Esteves, F. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro : Interciencia/FINEP. 1988. 575 p.

World Resources Institute (WRI). **World resources : a guide to the global environment. The Urban Environment (1996-1997)**. Oxford University Press, 1998. <http://www.waterweb.org>

Wetzel. R. G. **Limnology** . Toronto: W.B. Saunders Company, 1975.



## **CAPÍTULO 13**

# **IMAGENS PARA MAPEAMENTO GEOLÓGICO E LEVANTAMENTO DE RECURSOS MINERAIS: RESUMO PARA USO DOS CENTROS DE ATENDIMENTO A USUÁRIOS- ATUS DO INPE**

**Paulo Roberto Martini\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [martini@ltid.inpe.br](mailto:martini@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>13-5</b>
<b>1. USOS CORRENTES .....</b>	<b>13-7</b>
<b>2. APRESENTAÇÃO DE PRODUTOS .....</b>	<b>13-9</b>
<b>3. CONTEÚDO DE INFORMAÇÃO .....</b>	<b>13-10</b>
3.1 BANDAS : ATRIBUTOS ESPECTRAIS .....	13-10
3.2 ESCALAS E RESOLUÇÃO: ATRIBUTOS ESPACIAIS .....	13-13
3.3 ATRIBUTOS TEMPORAIS .....	13-14
<b>4. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>13-15</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>1 – PRODUTOS LANDSAT E SPOT SUGERIDOS PARA APLICAÇÕES EM GEOLOGIA .....</b>	<b>13-9</b>
--	-------------

## **1. USOS CORRENTES**

Imagens de satélites, principalmente aquelas de perfis tecnológicos semelhantes ao LANDSAT, são ferramentas efetivas para estudos geológicos. Objetivamente pode-se identificar 6 campos principais, onde as imagens tem apresentado significativas contribuições. Nestes campos as imagens são ferramentas cotidianas.

1. Mapeamento de litologias ou de rochas;
2. Mapeamento de estruturas geológicas tipo dobras, falhas, fraturas;
3. Levantamento hidrogeológico (água subterrânea);
4. Prospecção de óleo e de gas (petróleo);
5. Prospecção de bens minerais (ouro, cobre, ferro);
6. Impactos ambientais: garimpos, erosão, escorregamentos.

## **2. APRESENTAÇÃO DE PRODUTOS**

Os produtos usualmente utilizados para estas aplicações levam em conta primeiramente o conteúdo de informações da imagem. Este conteúdo temático depende dos atributos espectrais, temporais e espaciais que trataremos posteriormente. Além disto, os produtos para os campos anteriormente mencionados podem ser apresentados como imagens em papel (analógicos) ou em meio digital (Tabela 1). Neste contexto sempre que a fotointerpretação tenha um papel preponderante sobre a integração de dados de diferentes fontes, existe uma preferência pela imagem em papel preto e branco, ou seja monoespectral.

Mapeamentos litológicos/estruturais e os levantamentos para hidrogeologia se valem preferencialmente de imagens em papel preto e branco. As escalas variam de 1:250.000 para levantamentos regionais, a 100.000 para trabalhos de semidetalhe e 1:50.000 para mapas de detalhe.

Estudos de prospeção para petróleo e bens minerais se valem completamente de produtos digitais uma vez que a integração de dados multifontes através do uso de sistemas de informações georeferenciadas (GIS) é um procedimento comum.

A avaliação de impactos ambientais sobre o meio ambiente físico pode ser feita por produtos em papel colorido, uma vez que a vegetação e a água são importantes indicadores. Estudos sobre impactos ambientais de projetos tipo represas ou unidades industriais, chamados RIMAS ou EIA-RIMAS, como envolvem também dados de outras fontes, devem ser preferencialmente sustentados por produtos apresentados em mídia ótica (CD ROM) ou magnética (dat ou exabyte).

**TABELA 1 – PRODUTOS LANDSAT E SPOT SUGERIDOS PARA APLICAÇÕES EM GEOLOGIA**

BANDAS	LANDSAT - 7 (ETM+)							SPOT - 4 HRV				LANDSAT - 5 MSS								
	1	2	3	4	5	6	7	P	C	1	2	3	4	P	C	4	5	6	7	C
MAPEAMENTO LITOLÓGICO	N		A	A	A			AP47	A	A	A			A234		A		A		A457
	F							A345	A					A134				A		A467
MAPEAMENTO ESTRUTURAL				A						A								A		
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS				A						A								A		
PROSPECÇÃO MINERAL								DP47						DP34						D467
ÓLEO E GÁS (PETROLEO)								DP47						DP34						D467
AMBIENTES IMPACTADOS	N							A124						A123						A457
	F							A345						A234						A457
EIA - RIMAS	N							D124						D123						D457
	F							D345						D345						D457

## ACROGRAMAS

A: ANALÓGICO/PRODUTO FOTOGRÁFICO  
C: COMBINAÇÃO DE BANDAS  
D: DIGITAL/PRODUTO DIGITAL  
EIA: ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS  
F: FLORESTA/ COBERTURA FLORESTAL DENSE-AMAZÔNIA  
HRV : VISIVEL DE ALTA RESOLUÇÃO/SENSOR DO SPOT-4  
MSS : VARREDOR MULTI-ESPECTRAL  
ETM+: MAPEADOR TEMÁTICO EXPANDIDO/SENSOR DO LANDSAT-7  
N: NÃO FLORESTA/ ÁREA FORA DO DOMÍNIO AMAZÔNICO  
RIMA: RELATÓRIO DE IMPACTO SOBRE O MEIO AMBIENTE  
P: MODO PANCROMÁTICO/SPOT-4 E LANDSAT-7  
TM : MAPEADOR TEMÁTICO<sup>1</sup>

### 3. CONTEÚDO DE INFORMAÇÃO

Para que um produto possa conter o maior conteúdo de informação temática é necessário que se agregue a ele os melhores atributos possíveis para uma cena gravada segundo a organização alvo, sensor, sol e data. Assim, se um alvo na superfície da Terra reflete seletivamente a radiação solar, precisamos selecionar as bandas que registrem melhor esta refletividade (atributo espectral) bem como o período sazonal onde ela se apresenta mais detectável (atributo temporal). A partir do conhecimento que se tem dos alvos estudados, pode-se prever se ele tem expressão na escala e na resolução da imagem ou seja, seus atributos espaciais.

Situações mais típicas para seleção de imagens com maior conteúdo de informações para aplicações geológicas são apresentadas a seguir. O objetivo sempre é o de agregar às imagens o melhor dos atributos espectrais, espaciais e temporais.

#### 3.1 BANDAS: ATRIBUTOS ESPECTRAIS

As rochas no Brasil estão constantemente associadas aos solos e a vegetação. O comportamento das rochas nas imagens é portanto uma combinação das respostas dos elementos rocha/solo/vegetação.

---

<sup>1</sup> Exceto para a banda Pancromática todas as sete (7) bandas do ETM+ são idênticas ao TM, o usuário deverá trocar a banda Pancromática pela banda 3 em domínio Amazônico e banda 2 fora dele.

No caso de solos não transportados, cobertos por vegetação nativa, o comportamento das rochas se torna mais típico na banda do infravermelho próximo. Esta banda corresponde ao ETM+/4, SPOT XS/4 e MSS/7. Diz-se que quanto mais básica for uma rocha (maior conteúdo de elementos tipo Fe e Mg) mais escura ela aparece no infravermelho próximo.

Na faixa visível correspondente a banda do vermelho tanto as rochas ácidas quanto as básicas mostram assinaturas claras sempre que a vegetação não seja alta e densa tipo a mata amazônica. Esta banda é a ETM+/3 ou XS/2 ou MSS/5. A banda PAN do SPOT/4 poderia também ser recomendada. Na faixa do visível e em domínio amazônico pode-se esperar uma contribuição melhor da banda correspondente ao verde ou seja ETM+/2, XS/1 e MSS/4.

Trabalhos geológicos que envolvam, portanto, mapeamentos de rochas (litologias), de estruturas ou com objetivo de estudar água subterrânea, serão bem atendidos por imagens da banda correspondente ao infravermelho próximo, se possível com o apoio de uma banda do visível, preferencialmente a centrada na faixa do verde.

Trabalhos geológicos que envolvam agora prospeção de bens minerais como cobre, chumbo, zinco, ouro, óleo ou gás, envolvem procedimentos de processamento digital e integração de dados. Nestas situações torna-se necessário explorar com mais profundidade os atributos espectrais das imagens. Assim o recomendável seria que o usuário utilizasse todo o acervo de bandas dos sensores, tanto na faixa visível quanto no infravermelho: 8 bandas ETM+ ou 5 bandas SPOT/4 ou 5 bandas MSS.

A questão é que o usuário normalmente pede por um produto mais barato com o mínimo conjunto de bandas. No caso de se tornar necessária a seleção de 3 bandas para objetivos de prospeção, deve-se buscar ao máximo bandas que cubram todo o espectro ótico, ou seja: visível, infravermelho próximo e o de ondas curtas (short wave infrared). Assim, além das bandas do verde e do infravermelho próximo, recomenda-se também a banda ETM+/7 ou XS/4. A banda ETM+/7 na verdade foi definida a pedido da própria



comunidade geológica americana uma vez que tem correlação com a presença de hidroxilas em argilas. Argilas hidroxiladas são indicadoras de possíveis ocorrências de rochas ricas em cobre, chumbo e zinco. Deve ser entretanto, ressaltado que os melhores desempenhos da ETM-7 foram observados em condições de baixa densidade de cobertura vegetal. No ambiente de florestas densas como nos remanescentes de mata atlântica ou na Amazônia, os desempenhos das bandas ETM/5 e TM/7 para Geologia são semelhantes, trazendo informações sobre o dossel da vegetação e não sobre os solos ou rochas.

Uma última opção interessante, porém não muito econômica é o produto composto pelas bandas XS/3 e 4 do SPOT/4 junto com o canal pancromático.

Os produtos recomendados para prospeção em Geologia são os digitais. Se analógicos devem ser sempre coloridos.

Estudos sobre áreas onde o meio ambiente físico tenha sido impactado devem ser suportados por uma combinação de bandas que mostrem a situação das águas, da cobertura vegetal e do conjunto rocha/solo. Assim, para domínios de floresta densa a composição ETM+/345 ou XS/234 atendem a maior parte dos objetivos. Terrenos de baixa densidade vegetal (não amazônicos) serão melhor atendidos por composições “falsa-cor normais”, ou seja, ETM+/234 ou XS/123, ou mesmo MSS/457.

Estudos sobre impactos ambientais, os RIMAS ou EIA-RIMAS, seguem aquilo que foi descrito para as áreas impactadas apenas que neste caso, os produtos devem ser apresentados em mídia digital. Recomenda-se também o uso das bandas pancromáticas (PAN) em áreas urbanas. O estudo de áreas já impactadas, pelas análises de campo podem recomendar a geração de produtos fotográficos coloridos.

### 3.2. ESCALAS E RESOLUÇÃO: ATRIBUTOS ESPACIAIS

Os principais atributos espaciais ou geométricos das imagens de satélites para a área de Geologia dizem respeito à relação entre o tamanho da cena e o quadro sinótico da área imageada (escala) e a dimensão do elemento de resolução da cena (pixel) no terreno.

Um pixel menor permite uma escala maior mas sempre com restrições quanto a dimensão da área coberta pela imagem. Assim, para um pixel de 30 metros como aquele do Mapeador Temático Expandido, pode-se chegar a uma escala de 1:50.000, mas a área coberta pela imagem será a menor, ou seja, 45 quilômetros de lado. Se o interesse do usuário for por uma área grande, equivalente ao de uma cena LANDSAT completa, serão necessárias 16 imagens na escala 1:50.000, ou apenas 1 imagem em escala 1:250.000 ou menor. Se o usuário estiver interessado em levantamentos geológicos regionais a imagem 250.000 terá naturalmente melhor relação custo/benefício do que a de 50.000, embora mostrando menos detalhes. O pixel de 15 metros da banda pancromática do ETM+ permite ampliações em escalas de até 1:25.000.

O pixel PAN do SPOT tem possibilidade de suportar ampliações fotográficas de escala 1:25.000 ou maiores sem perder o contexto de cena que define claramente as bordas dos diversos alvos. Ampliações 1:25.000 a partir de um pixel de 30 metros como aquele do TM fazem com que as bordas dos alvos apareçam serradas perdendo-se o entendimento do contexto da cena.

O processamento digital sobre dados SPOT ou LANDSAT permite que realces de borda ou de contraste melhorem bastante as escalas máximas de ampliação. Assim, imagens TM melhoradas por processamento em computador podem ser ampliadas até 1:25.000 sem perder seu conteúdo de informação geológica. Imagens SPOT-PAN registradas com canais XS podem chegar a escala de 1:15.000 mantendo ainda atributos em boas condições para estudos geológicos.

### 3.3 ATRIBUTOS TEMPORAIS

O contexto temporal das imagens para Geologia não tem naturalmente a importância necessária para uma aplicação em Agricultura. Geralmente, busca-se para Geologia a imagem livre de nuvens, com maiores índices de visibilidade e de conteúdo/qualidade da informação gravada. Existe, entretanto, um efeito temporal nas imagens que influencia fortemente o conteúdo de informação geológica nas imagens: trata-se do sombreamento.

O sombreamento é o efeito observado nas imagens no qual as faces das vertentes voltadas para o sol ficam mais claras do que as faces opostas à iluminação da cena que ficam mais escuras. Este efeito provoca um realce para as feições do relevo como cristas, vales, drenagens, alinhamentos de uma forma geral. Este efeito é mais intenso quanto mais baixo for o ângulo de elevação solar na gravação da cena. No caso do hemisfério sul os ângulos mais baixos de elevação do sol ocorrem entre os meses de junho e agosto.

O sombreamento em situações extremas pode subverter até resoluções geométricas. Observa-se que imagens com resolução mais grosseira gravadas com baixo ângulo solar mostram com maior detalhe os atributos de relevo do que cenas com resolução mais fina gravadas com o sol mais alto. Exemplos conhecidos mostram que imagens MSS gravadas com ângulos em torno de 33 graus mostram feições geológicas e geomorfológicas mais nitidamente do que imagens TM de mesma latitude coletadas com elevação de sol acima de 50 graus.

Mapeamentos geológicos e mesmo estudos de prospecção mineral, onde a estrutura geológica exerça o principal controle, a seleção de cena deve contemplar também a busca por imagens com baixos ângulos de elevação solar.

Deve ser mencionado também que em situações extremamente especiais, onde os alinhamentos de relevo ou de drenagem se estendem na direção exata do azimute solar, não existirão condições de iluminação para gerar os realces acima descritos.

#### **4. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR**

Balheiro, M. G.; Martini, P. R. Exemplos de Análise Geológica Comparativa entre dados SIR-A, LANDSAT, SLAR e SKYLAB (resumo). IV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, vol.1, pg.78. Gramado, RS. Agosto 10-15, 1986.

Rodrigues, J. E.; Liu, C. C. A Geometria de Iluminação Solar e sua Influência na Observação de Estruturas Geológicas em Imagens Orbitais. V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, vol.2, pg.294-302. Natal, RN. Outubro 11-15, 1988

## **CAPÍTULO 14**

# **SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À GEOGRAFIA**

**Teresa Galloti Florenzano\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

---

\* e.mail: [teresa@ltid.inpe.br](mailto:teresa@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14-5</b>
<b>2. O USO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO RECURSO DIDÁTICO MULTI E INTERDISCIPLINAR .....</b>	<b>14-6</b>
<b>3. CONCLUSÃO .....</b>	<b>14-9</b>
<b>4. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>14-10</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto, como fonte de dados sobre a superfície terrestre tem uma grande aplicação na cartografia e nas ciências da Terra e ambientais, entre elas destaca-se a Geografia. Atualmente, vários cursos de graduação ligados a estas ciências e outras como a engenharia civil e ambiental e a arquitetura tem uma disciplina de sensoriamento remoto no seu currículo. Fotografias aéreas e imagens de satélites são utilizadas em estudos e elaboração de mapas: geológico, geomorfológico, de uso do solo e cobertura vegetal e dos recursos hídricos.

Esses estudos e mapeamentos são muito importantes no subsídio ao planejamento do uso e ocupação racional do solo. Dessa forma, além das universidades e instituições de pesquisa, órgãos governamentais, não governamentais e empresas vem utilizando cada vez mais os dados de sensoriamento remoto.

Por proporcionar uma visão sinóptica (de conjunto) do meio ambiente ou da paisagem, as imagens de satélites possibilitam estudos regionais e integrados, envolvendo esses vários Campos do conhecimento.

A repetitividade dos dados de sensoriamento remoto permitem estudos multitemporais ou de acompanhamento de fenômenos naturais, como o monitoramento de inundações e erosão do solo (na maioria das vezes agravados pela intervenção do homem) e antrópicos, como os desmatamentos, as queimadas, a expansão urbana, ou outras alterações do uso e da ocupação do solo e ambientais.

A característica multitemporal das imagens de satélites constitui-se também em um recurso importante para a atualização de material cartográfico (cartas e mapas). Isto, principalmente em um país como o Brasil de grande extensão territorial onde o material cartográfico, quando disponível, é, em geral, desatualizado.

Muitas são as aplicações do sensoriamento remoto na Geografia, ciência que estuda os ambientes naturais e aqueles transformados pela ação do homem. Entretanto, considerando os objetivos deste seminário, optou-se por destacar neste texto o uso do sensoriamento remoto no ensino da Geografia e de outras disciplinas vinculadas ao estudo do meio ambiente.

## **2. O USO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO RECURSO DIDÁTICO MULTI E INTERDISCIPLINAR**

O que distingue o sensoriamento remoto da grande maioria dos instrumentos educacionais é a possibilidade de se extrair informações **multidisciplinares**, uma vez que os dados contidos em uma única imagem podem ser utilizados para **multifinalidades**, embora o potencial do sensoriamento remoto seja maior para disciplinas como a **Geografia** e as ciências, vinculadas ao contexto ambiental, pois a relação delas com este contexto é mais direto e evidente.

A partir da análise e interpretação de imagens de sensoriamento remoto, os **conceitos geográficos** de lugar, localização, interação homem/meio, região e movimento (dinâmica) podem ser articulados. As imagens são um recurso que permite determinar configurações que vão da visão do Planeta Terra, como um todo, a de um Estado, região ou localidade. Quanto aos aspectos físicos, nelas pode-se observar a repartição entre terras e oceanos, a distribuição de grandes unidades estruturais, como cadeias de montanhas, localização de cursos d'água e feições relacionadas à estes (meandros, deltas, etc.) e ao relevo continental (escarpas, cristas, morros, colinas, etc.), e litorâneo (falésias, dunas, praias, ilhas, golfos, baías, etc.), evolução da cobertura vegetal; a configuração, organização e expansão das grandes cidades, o fenômeno da conurbação, bem como as características e a evolução das áreas agropecuárias.

Como tempo e espaço são dimensões essenciais para a compreensão dos problemas ambientais ou para o estudo do meio, a contribuição da **Geografia** e da **História** é indispensável no estudo do processo de ocupação e transformação do espaço, das



mudanças e inovações tecnológicas ocorridas ao longo do tempo e do modelo de desenvolvimento adotado. Imagens de diferentes períodos são um recurso que auxiliam na compreensão do processo de organização e transformação do espaço. Dessa maneira, a partir da interpretação de imagens de diferentes datas, referentes à uma mesma região, é possível, em conjunto com dados provenientes de outras fontes, fazer uma reconstituição do processo de ocupação e desenvolvimento desta região.

Em estudos multitemporais, na falta de imagens e fotografias aéreas mais antigas, podem ser utilizados mapas antigos, cartões postais (que geralmente são fotografias tiradas do terreno, ou mesmo fotografias aéreas), bem como, através de pesquisa bibliográfica em livros, revistas, jornais e documentos e de pesquisa de campo, podem ser construídos **mapas mentais** que permitam retratar uma outra época e reconstruir a paisagem de um determinado período, a qual pode ser comparada com a atual através de imagens de sensoriamento remoto recentes.

A **História** pode também explorar o estudo da evolução da tecnologia do sensoriamento remoto e de como o homem vem se apropriando dela ao longo do tempo. A primeira fotografia aérea foi tirada de um balão em 1855, mas a obtenção de fotografias obtidas de aeronaves tiveram um grande desenvolvimento somente a partir da primeira guerra mundial. Por outro lado, embora esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida para fins militares, atualmente a sua utilização para fins civis tem trazido grandes benefícios para o homem no estudo e monitoramento do meio ambiente.

As **Ciências** de modo geral, mas mais especificamente a **Física** podem explorar os princípios físicos do sensoriamento remoto, que, envolvem o estudo da energia eletromagnética, interação desta energia com as propriedades físico-químicas dos componentes da superfície terrestre; de como são obtidas as imagens e o processo de formação das cores. Desta forma, ao mesmo tempo que o aluno está apreendendo conceitos de física ele estará mais capacitado para explorar melhor os dados de sensoriamento remoto.

Os dados de sensoriamento remoto podem contribuir no estudo dos problemas de saúde pública, relacionados com a contaminação das águas, como a cólera e a leptospirose, e a poluição atmosférica, como as doenças respiratórias. A partir da interpretação desses dados e com o auxílio da **Biologia, Química, Geografia e História**, é possível relacionar a distribuição dessas doenças e das condições que as favorecem com as características ambientais, econômicas e sociais da área de estudo.

Através da **Química** e dos dados de sensoriamento remoto, pode-se explorar, por exemplo, a correlação existente entre a qualidade de um corpo d'água (rio, lago, represa ou oceano), representada em uma imagem por diferentes tonalidades ou cor, e os componentes químicos e orgânicos dessa água, determinados através de análises químicas de laboratório.

Com a ajuda da **Matemática** e dos dados de sensoriamento remoto é possível calcular ângulos, distâncias, proporções (escalas), áreas (urbanas, agrícolas, queimadas, etc.), taxas ou índices (o índice de área verde de uma cidade, que é um índice relacionado com a qualidade de vida; taxas de crescimento urbano, de desmatamento, etc.). Assim, por exemplo, um índice de área verde pode ser facilmente calculado através de imagens de satélites e de fotografias aéreas com a ajuda da matemática. Para isto, é necessário conhecer ou calcular, inicialmente, a escala das imagens e interpretá-las, isto é identificar e delimitar as áreas verdes.

A **Educação artística** ensina a elaborar mapas, maquetes, e outros produtos cartográficos de expressão artística, através da interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélites, destacando acidentes geográficos como ilhas, lagos, rios, represas, serras e planícies e as formas de ocupação e uso do solo, além de possibilitar outros tipos de expressão, a partir das percepções propiciadas pela leitura das imagens relacionadas a um determinado ambiente.

Na interpretação e produção de textos relacionados tanto com a técnica do sensoriamento remoto como com os temas ambientais, é fundamental a contribuição da

**Língua Portuguesa.** Neste sentido, pode ser explorado também o interesse dos alunos com as **Línguas Estrangeiras**, inglês, francês, espanhol, etc., no aprendizado de termos técnicos relacionados tanto com o sensoriamento remoto, como com o meio ambiente.

Com relação ao tema transversal **Meio Ambiente** e aos projetos de **Educação ambiental**, geralmente abordados de forma **interdisciplinar**, é óbvia a utilidade das imagens de sensoriamento remoto neste tipo de estudo e de abordagem, uma vez que elas se constituem em fonte de dados sobre o meio ambiente.

Se o estudo do meio ambiente, que envolve todas as áreas do conhecimento, for realizado de forma integrada, isto é, **interdisciplinar**, resultados muito mais consistentes serão obtidos. Por outro lado, os dados de sensoriamento remoto, se analisados de forma integrada, serão melhor explorados e aproveitados.

### **3. CONCLUSÃO**

O sensoriamento remoto pode ser usado como recurso didático não só com relação aos conteúdos curriculares das diferentes disciplinas, uso **multidisciplinar**, mas também nos estudos **interdisciplinares** que integram todas as disciplinas em torno da análise do meio ambiente, como nos estudos do meio ou projetos de educação ambiental.

No estudo do meio, que visa conhecer de perto a realidade e os problemas da área de interesse, geralmente seleciona-se um tema, por exemplo, a água (recursos hídricos) ou a urbanização, como eixo prioritário, ou fio condutor da pesquisa ou projeto. Os recursos hídricos, a urbanização e o uso do solo em geral são temas bastante propícios para a utilização de imagens de sensoriamento remoto no estudo do meio. Isto porque, ao lado do relevo e da cobertura vegetal, as áreas construídas ou ocupadas pelo homem e os corpos d'água (rios, lagos, represas, mares e oceanos), são os componentes da paisagem mais visíveis em fotografias e imagens.

A maior ou menor contribuição do sensoriamento remoto no ensino das disciplinas específicas, dos temas transversais, como **Meio Ambiente**, ou em atividades e projetos interdisciplinares, vai depender da motivação e criatividade dos professores e alunos envolvidos, das características da área de estudo, da disponibilidade de dados e do tema utilizado como fio condutor do estudo.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

Pereira, M.N.; Vasconcellos, R. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Sua Aplicação no Ensino da Geografia de 1º e 2º Graus**. São José dos Campos, INPE, 1996 (INPE-5976-PUD/026).

Pontuska, N.N. org. **Um projeto...tantas visões – Educação ambiental na escola pública**, São Paulo, LAPECH-FEUSP, 1996.

Santos, V.M.N. dos. O uso escolar das imagens de satélite: socialização da ciência e tecnologia espacial in: Penteadó, H. D. org. **Pedagogia da Comunicação – teorias e práticas**, São Paulo, Cortez Editora, 1998.

## **CAPÍTULO 15**

# **SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À AGRICULTURA**

**Maurício Alves Moreira<sup>1</sup>**

**Bernardo F. T. Rudorff<sup>2</sup>**

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

<sup>1</sup> mauricio@ltid.inpe.br

<sup>2</sup> bernardo@ltid.inpe.br

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>15-5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15-7</b>
<b>2. PRINCIPAIS CULTURAS ESTUDADAS .....</b>	<b>15-14</b>
2.1 CANA-DE-AÇÚCAR .....	15-14
2.2 CULTURA DO TRIGO .....	15-15
2.3 CULTURA DO ARROZ IRRIGADO .....	15-15
2.4 ESTIMATIVA DE ÁREAS PREPARADAS PARA PLANTIO .....	15-16
2.5 SISTEMA DE AMOSTRAGEM PARA ESTIMATIVA DE ÁREAS AGRÍCOLAS .....	15-17
<b>3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>15-20</b>

## LISTA DE FIGURAS

1. VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO REFLETIDA PELAS CULTURAS DE SOJA E DO MILHO NAS BANDAS TM3 E TM4 DO LANDSAT-5 ..... 15-8
2. RADIAÇÃO REFLETIDA PELA CULTURA DO CAFÉ DURANTE OS ANOS DE 1984 E 1985 ..... 15-9
3. REFLECTÂNCIA DE ÁREAS CAFEEIRAS NOS ANOS DE 1986 E 1987 NOS ANOS DE 1986 E 1987, APÓS OCORRÊNCIA DA GEADA EM 1985, NO MUNICÍPIO DE TRÊS PONTAS ..... 15-10
4. COMPOSIÇÃO COLORIDA DAS BANDAS TM3 (AZUL), TM4 (VERDE) E TM5 (VERMELHO) MOSTRANDO DIFERENTES OCUPAÇÕES DO SOLO ..... 15-11
5. ÁREAS IRRIGADA PELO SISTEMA DE PIVÔ CENTRAL ..... 15-12
6. IMAGEM NDVI DO ESTADO DE MATO GROSSO MOSTRANDO A EVOLUÇÃO DO DESFLORESTAMENTO OCORRIDA ENTRE OS ANOS DE 1989 A 1993 ..... 15-13
7. IMAGEM DO LANDSAT-TM MOSTRANDO ÁREAS DE ARROZ IRRIGADO NO MUNICÍPIO DE SANTA VITÓRIA DO PALMAR – RS ..... 15-16
8. ESQUEMA DE CONSTRUÇÃO DO PAINEL DE AMOSTRA DO PROJETO SIAG ..... 15-17
9. IMAGEM EM COMPOSIÇÃO COLORIDA ADQUIRIDA PELO SENSOR TM A BORDO DO SATÉLITE LANDSAT DA REGIÃO DE ALFERES – MG, MOSTRANDO ÁREAS DE CAFÉ, CITRUS, PASTAGEM E REFLORESTAMENTO ..... 15-18

- 10. IMAGEM LANDSAT – TM DA REGIÃO DE BEBEDOURO – SP,  
MOSTRANDO ÁREAS DESTINADAS À CITRICULTURA ..... 15-19**
- 11. IMAGEM LANDSAT – TM BANDA 5 (INFRAVERMELHO PRÓXIMO)  
MOSTRANDO A EXPANSÃO DA FRONTEIRA ..... 15-19**



## 1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de sensoriamento apresenta um grande potencial para ser utilizada na agricultura. Através desta técnica, é possível obter informações sobre: estimativa de área plantada, produção agrícola, vigor vegetativo das culturas, além de fornecer subsídios para o manejo agrícola a nível de país, estado, município ou ainda a nível de microbacia hidrográfica ou fazenda.

Os sistemas sensores a bordo dos satélites de recursos naturais coletam informações sobre a radiação refletida e/ou emitida pelos alvos agrícolas de forma multiespectral<sup>3</sup> e, devido a repetitividade da passagem dos satélites, esses sensores podem coletar as informações em diferentes datas, ao longo do ciclo da cultura, possibilitando criar um banco de dados com informações multitemporais<sup>4</sup>.

A radiação refletida que é coletada pelos sistemas sensores registram informações sobre os alvos da superfície terrestre como por exemplo, culturas agrícolas. Estas informações podem estar relacionadas com o tipo de cultura plantada ou mesmo com as condições fenológicas ou nutricionais da cultura e, conseqüentemente com a produtividade, podendo, assim, estimar a produção da cultura agrícola. Nas Figuras 1 a 4 são apresentadas imagens do sensor TM a bordo do satélite Landsat, visando enfatizar o aspecto multiespectral (Figura 1) e multitemporal (Figuras 2, 3 e 4) em regiões de intensa prática agrícola.

---

<sup>3</sup> Imagens multiespectrais são obtidas em varias faixas, regiões ou bandas do espectro eletromagnético, como por exemplo dentro da faixa do visível do espectro é possível registrar a energia refletida das bandas TM1, TM2 e TM3 do satélite Landsat. Quanto maior a resolução espectral de um sensor maior é o número de imagens obtidas numa dada região espectral.

<sup>4</sup> Um satélite de sensoriamento remoto passa sobre uma mesma área na superfície terrestre segundo um período definido. Por exemplo, o satélite Landsat leva 16 dias para fazer o recobrimento da Terra e, portanto, a cada 16 dias volta a passar sobre uma mesma área.

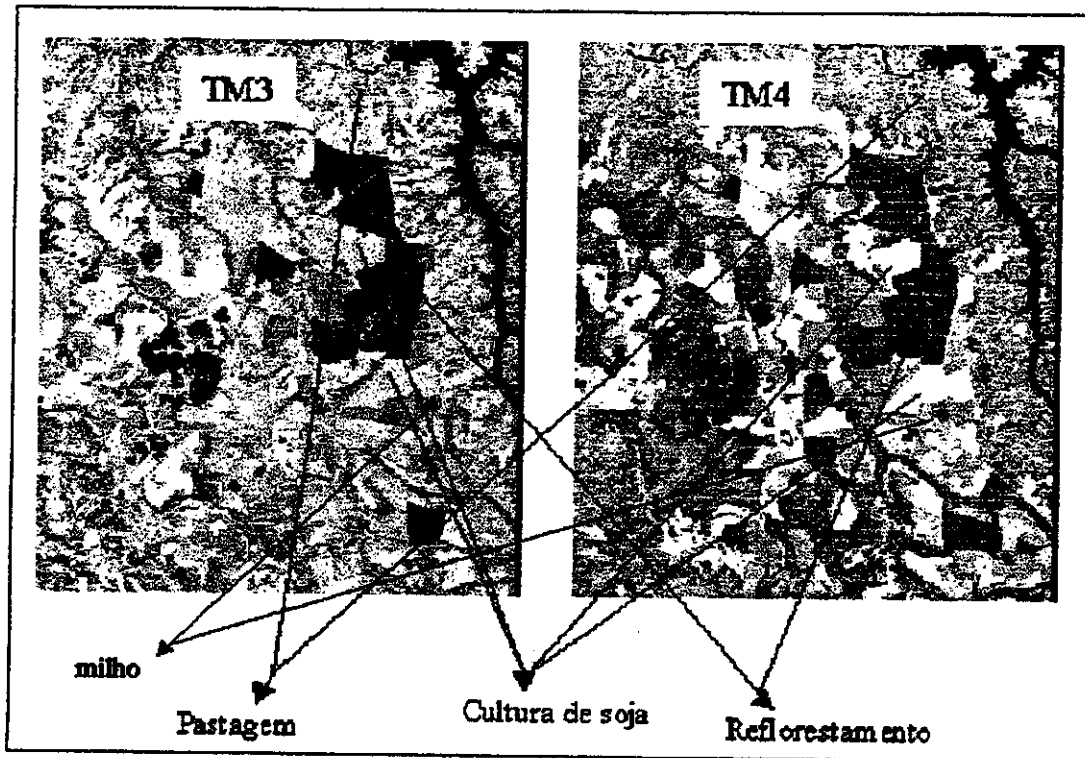


Fig. 1 – Variação da radiação refletida pelas culturas da soja e do milho nas bandas TM3 e TM4 do Landsat-5.

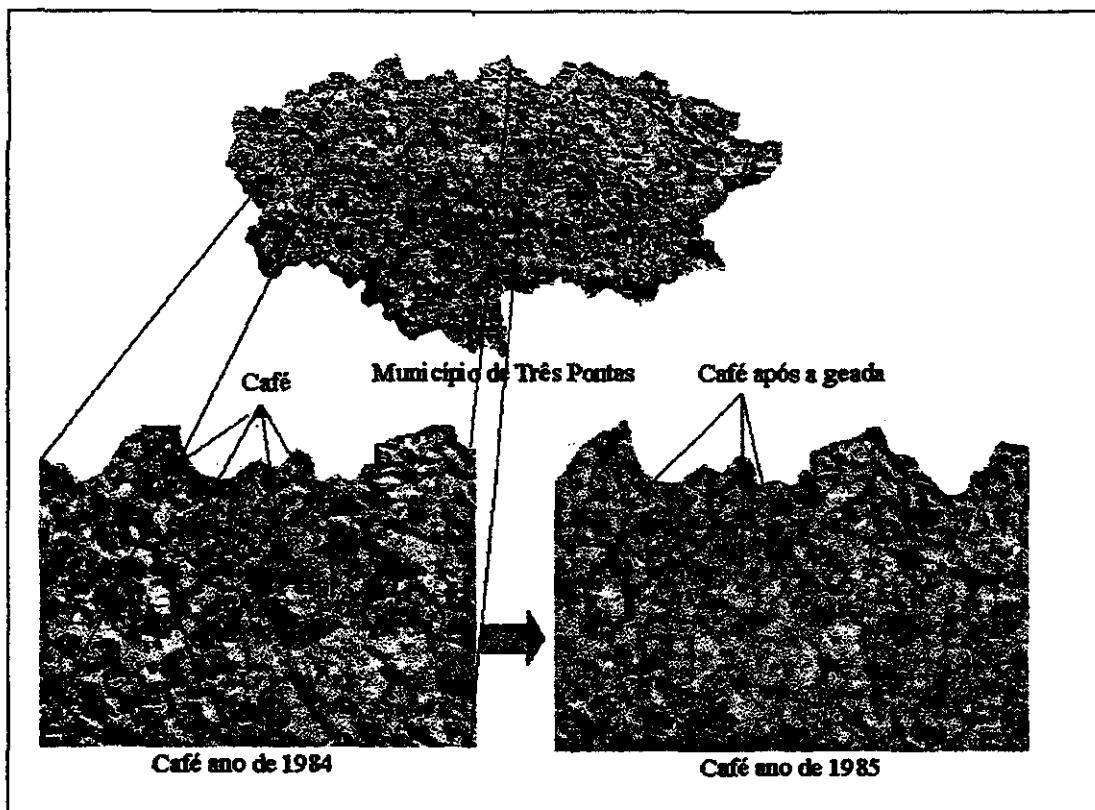


Fig. 2 – Radiação refletida pela cultura do café durante os anos de 1984 e 1985.

Na Figura 1 (TM3) observa-se que as áreas de soja e milho apresentam tonalidade cinza escuro devido à absorção da energia solar pelas plantas, para realizar a fotossíntese. Na banda TM4 (infravermelho próximo) observa-se que estas mesmas áreas de soja e milho apresentam tonalidade cinza claro, denotando assim, alta reflectância da energia incidente, nesta região espectral, muito embora a soja se apresente em tonalidade bem mais clara do que o milho. Isto se deve principalmente à arquitetura diferenciada destas duas culturas fazendo com que a soja reflita muita radiação solar na região do infravermelho próximo devido a suas folhas planiformes. As folhas mais eretas do milho permitem que uma maior quantidade de radiação penetre na cultura e conseqüentemente uma menor quantidade é refletida. Devido a esta característica é relativamente fácil discriminar estas duas culturas nas imagens de sensoriamento remoto.

Para explicar o comportamento espectral do café observado na Figura 2, é necessário esclarecer que no ano de 1985 ocorreu uma forte geada no Sul de Minas Gerais acarretando uma queima fisiológica muito grande nas áreas de café da região. Na imagem falsa cor de 1984 a cultura do café se apresenta em coloração magenta (intensa vegetação) e bem distinta dos demais alvos de ocupação do solo. Na imagem de 1985 as áreas de café se apresentam em coloração verde (folhas queimadas e muito solo exposto).

Na Figuras 3 pode-se observar que as áreas atingidas pela geada recuperaram o seu vigor vegetativo somente no ano de 1987, apresentando-se novamente em coloração magenta, tal como na imagem de 1984. Esta série temporal de imagens mostra como se pode identificar e avaliar o impacto de uma variável ambiental, como a geada, sobre a produção agrícola. Evidentemente, esta informação se complementa com uma série de outras variáveis que também exercem influência sobre a produção e não estão expressas na variação espectral da cultura.

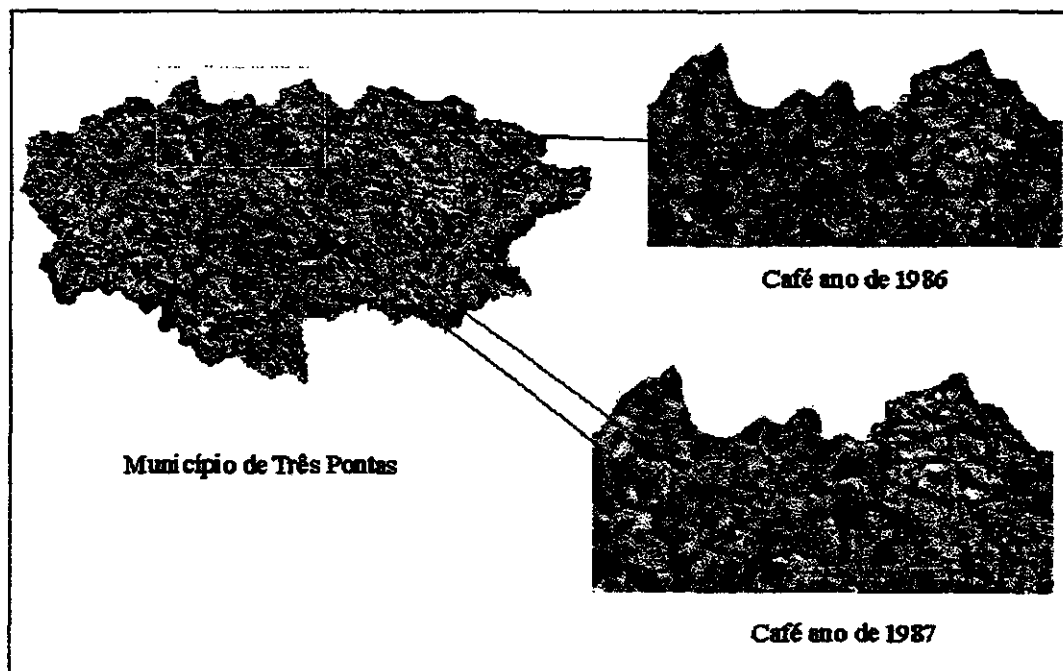


Fig. 3- Reflectância de áreas cafeeiras nos anos de 1986 e 1987, após ocorrência da geada em 1985, no município de Três Pontas.

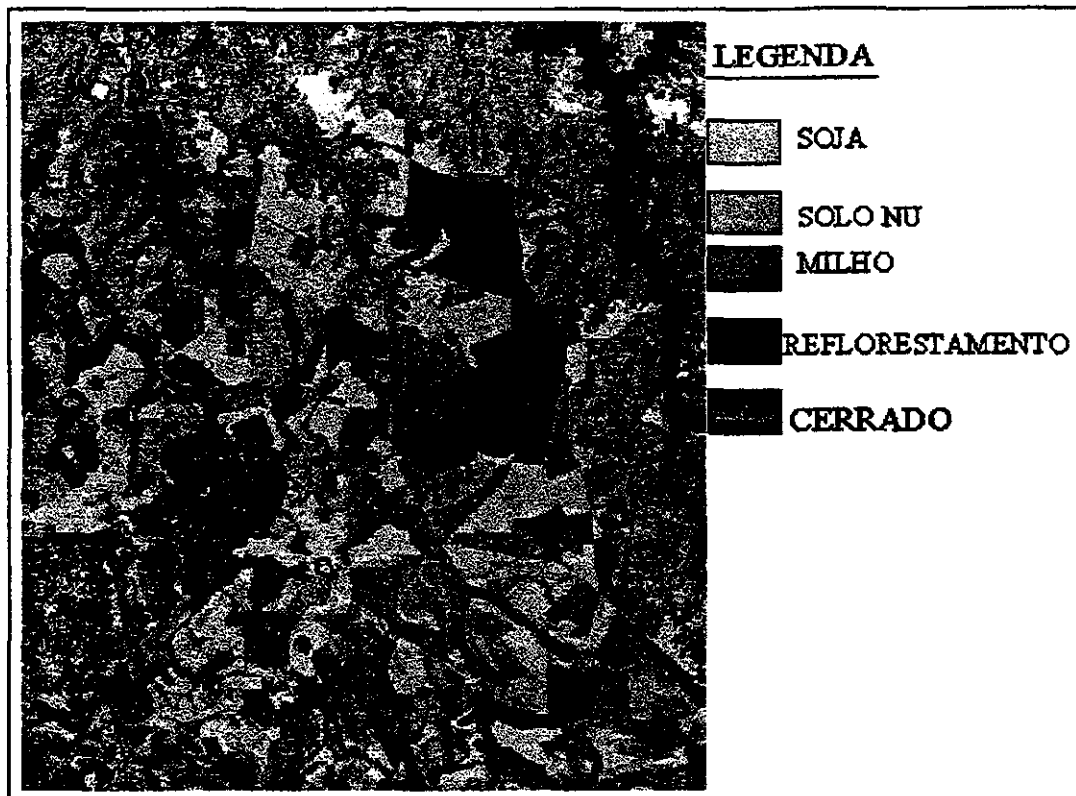


Fig. 4- Composição colorida das bandas TM3(azul), TM4(verde) e TM5(vermelho) mostrando diferentes ocupações do solo.

É bom ressaltar que além das características multispectrais e multitemporais das imagens do satélite, o especialista em sensoriamento remoto utiliza também elementos da fotointerpretação tais como: forma, sombreamento e textura. Por exemplo, para distinguir áreas irrigadas por sistema de pivô central de outros métodos de irrigação o analista baseia-se na forma, como é mostrado na Figura 5.

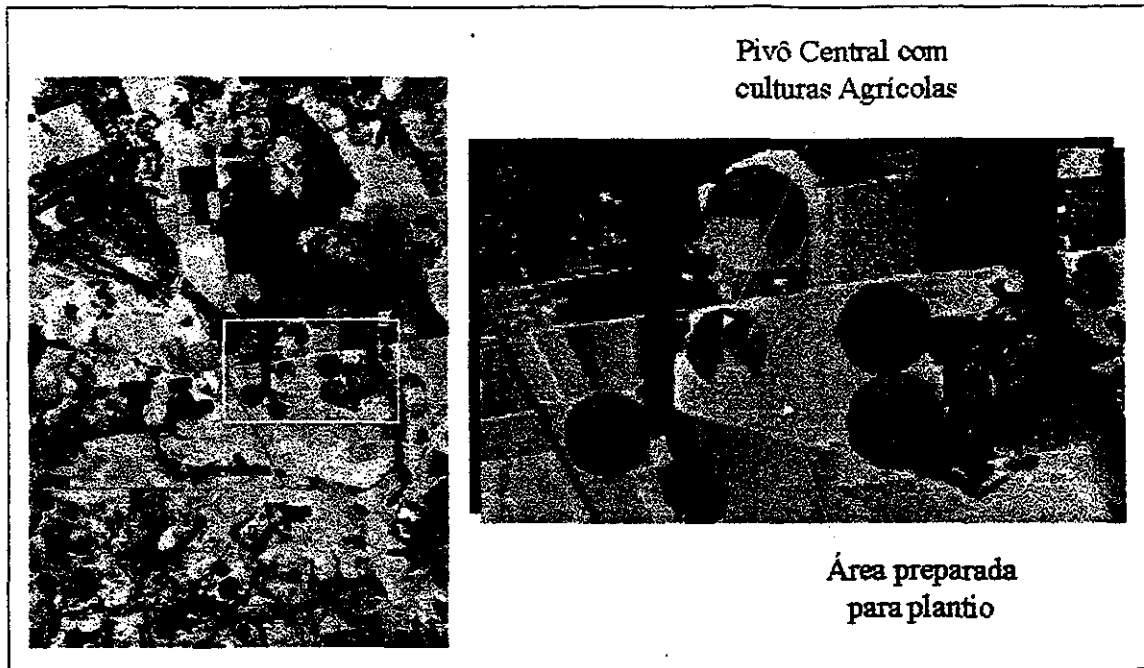


Fig. 5- Áreas irrigadas pelo sistema de pivô central.

Diante do que foi apresentado até aqui parece ser bastante simples a utilização de imagens para estimar a produção das safras agrícolas. Isto seria uma realidade se dispuséssemos de um número suficiente de imagens que permitissem identificar a cultura e diagnosticar o seu potencial produtivo. Isto permitiria inclusive realizar previsões de estimativas de safras, de forma objetiva e confiável. Entretanto, o grande impedimento para se obter imagens de satélite, durante o período da safra, é a presença de nuvens. Elas impedem que a energia refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre chegue até o sensor a bordo do satélite. A freqüente cobertura de nuvens impede a obtenção de imagens livres de nuvens e impõe sérias limitações ao uso operacional das técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de safras. Para contornar este problema existem alternativas relacionadas tanto com os sistemas sensores quanto com o sistema de coleta das informações.

Quanto aos sistemas sensores, uma alternativa seria colocar em órbita uma constelação de satélites com características similares que permitiriam obter imagens com freqüência diária. A título de exemplo, para o Landsat necessitaríamos de 15 satélites para obter imagens diariamente. Outra alternativa é a utilização de imagens de um satélite com alta

resolução temporal (diária). A grande limitação destes tipos de imagens, como por exemplo as imagens AVHRR, é a baixa resolução espacial (1,1 x 1,1 km). Com este tipo de imagem não é possível estimar a área plantada. Contudo, estas imagens podem ser utilizadas para um sistema de vigilância sobre efeitos episódicos ou mesmo na avaliação da expansão de áreas agrícolas, conforme é apresentado na Figura 6.

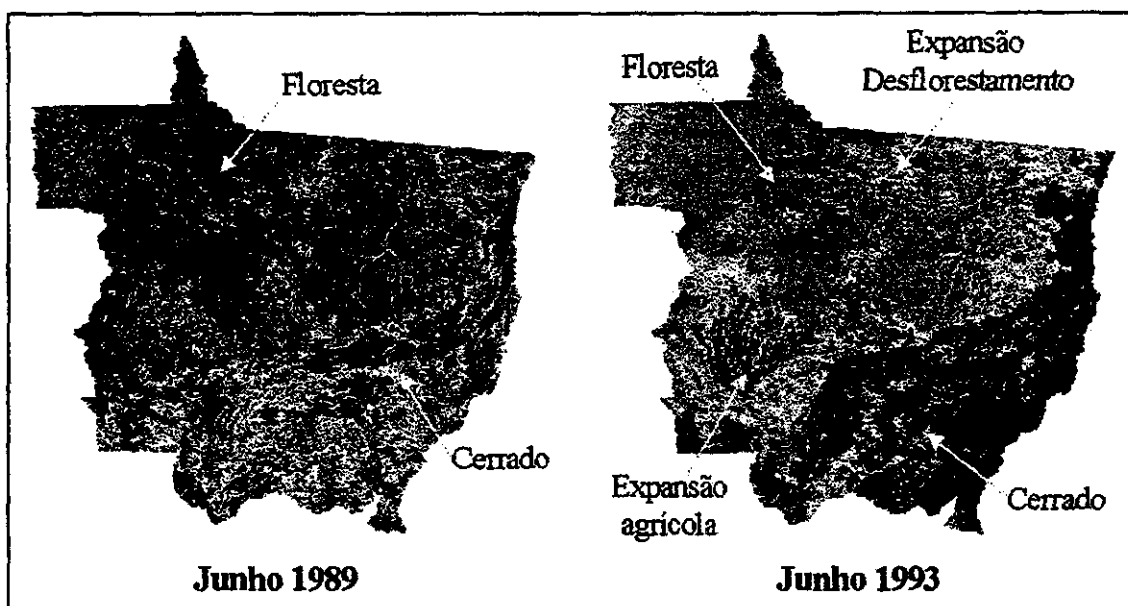


Fig. 6 - Imagem NDVI (Índice de Vegetação com Diferença Normalizada/  $NDVI = \frac{R_{iv} - R_v}{R_{iv} + R_v}$ , onde  $R_{iv}$  = reflectância na região do infravermelho próximo e  $R_v$  = reflectância na região do vermelho do espectro eletromagnético) do Estado do Mato Grosso mostrando a evolução do desflorestamento ocorrida entre os anos de 1989 a 1993.

Fonte: Adaptado de Shimabukuro et al.(1999, p. )

No caso da figura acima foram utilizadas várias imagens do mês de junho parcialmente cobertas com nuvens. Estas imagens foram compostas ou mosaicadas para se obter uma imagem livre de nuvens sobre todo o estado do Mato Grosso. Finalmente, uma outra alternativa seria estabelecer um sistema de amostragem para estimar a área das principais culturas, utilizando como referência, imagens de satélites ou fotografias aéreas de arquivo recentes. Este procedimento será descrito mais adiante.

Por limitações tecnológicas é difícil obter imagens com alta resolução temporal e espacial. Em geral, quanto maior for a resolução espacial de uma imagem maior será o tempo que o satélite leva para retornar a uma mesma área em função da estreita órbita de imageamento.

Há mais de 25 anos o INPE vem realizando pesquisas relacionadas com a identificação e o mapeamento de áreas agrícolas, destacando-se as seguintes pesquisas: a) seleção das culturas agrícolas passíveis de serem mapeadas através de imagens de satélites; b) definição da área mínima, no terreno, possível de ser identificada nas imagens de satélites; c) comportamento espectral de culturas agrícolas; d) estabelecimento dos períodos adequados para aquisição de imagens visando a identificação de culturas agrícolas; e) métodos de estimativa da precisão e exatidão dos mapas temáticos; e f) utilização de algoritmos de classificação para mapear áreas agrícolas.

## **2. PRINCIPAIS CULTURAS ESTUDADAS**

### **2.1 CANA-DE-AÇÚCAR**

O primeiro grande projeto de mapeamento de área de cana-de-açúcar no estado de São Paulo ocorreu no ano safra 1979/80 (Mendonça et al.,1981). Este projeto foi realizado através de interpretação visual de imagens Landsat-MSS (Multispectral Scanner System) na escala 1:250.000, nas bandas MSS5 (vermelho) e MSS7 (infravermelho próximo). Foram utilizadas 44 imagens de 185x185 km obtendo-se uma estimativa de área plantada de 801.950 ha, para todo Brasil. Posteriormente, foram realizados estudos que visaram estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar através de imagens do Landsat e de um modelo agrometeorológico desta (Rudorff e Batista, 1990).



## 2.2 CULTURA DO TRIGO

Diversos estudos para estimar a área plantada com a cultura do trigo foram realizados, principalmente, no estado do Rio Grande do Sul. O trigo é cultivado durante a entre safra e neste período existe uma maior probabilidade de se obter imagens livres de cobertura de nuvens favorecendo o uso de imagens de sensoriamento remoto na estimativa de área plantada. Moreira (1983) desenvolveu uma metodologia de estimativa de área de trigo, com base em sistema de amostragem, que reduziu em mais de 80% o tempo gasto na interpretação visual. Estudos pioneiros foram realizados também com a cultura do trigo na região de Assis, SP, para fins de fiscalização do crédito agrícola, em nível de propriedade rural, utilizando imagens do satélite Landsat-TM.

## 2.3 CULTURA DO ARROZ IRRIGADO

Os estudos com a cultura do arroz irrigado tiveram seus inícios no ano de 1980, quando então foi assinado um convênio entre o INPE e o Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA). Na época foram selecionados quatro municípios como área teste: Santa Vitória do Palmar, Itaqui, Dom Pedrito e Cachoeira do Sul. O estudo foi realizado empregando imagens na escala 1:250.000 do sensor MSS nas bandas 5 e 7. Através deste estudo foi constatado que a presença da lâmina de água é um fator preponderante para separar áreas irrigadas por inundação de outros tipos de irrigação. Por exemplo, as áreas ocupadas com arroz irrigado apresentam tons de cinza muito escuro na região do infravermelho próximo (banda TM4) contrastando com outras culturas não irrigadas, conforme é mostrado na Figura 7.



Fig. 7 – Imagem do Landsat-TM mostrando áreas de arroz irrigado no município de Santa Vitória do Palmar – RS.

#### 2.4 ESTIMATIVA DE ÁREAS PREPARADA PARA PLANTIO

A identificação e o mapeamento de áreas de solo exposto e preparado para plantio, visa contornar o problema da indisponibilidade de imagens livres de nuvens durante a estação chuvosa (janeiro a fevereiro). Com base na área potencialmente destinada para o plantio das lavouras pode-se, em conjunto com informações de intenção de plantio, estimar a área destinada para as diferentes culturas. Este estudo foi inicialmente realizado por Assunção e Duarte (1982) e foi recentemente retomado por Ippoliti-Ramilo (1999).

## 2.5 SISTEMA DE AMOSTRAGEM PARA ESTIMATIVA DE ÁREAS AGRÍCOLAS

O INPE e o IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística desenvolveram um projeto, denominado SIAG - Sistema de Informação Agropecuária que visa obter estatísticas agrícolas com base num painel amostral. Inicialmente o projeto foi implementado no estado do Paraná e, posteriormente, expandido para os estados de Santa Catarina e São Paulo e o Distrito Federal. No SIAG as imagens do Landsat-TM foram utilizadas na construção do painel de amostra, isto é, na estratificação da área de estudo, em função da intensidade de uso agrícola, e também para dividir os estratos em unidades menores, denominadas UPAs (Unidades Primárias de Amostragem) que contém segmentos amostrais a serem visitados no campo pelos entrevistadores (Moreira et al. 1989). A Figura 8, ilustra a seqüência de construção do painel de amostra.

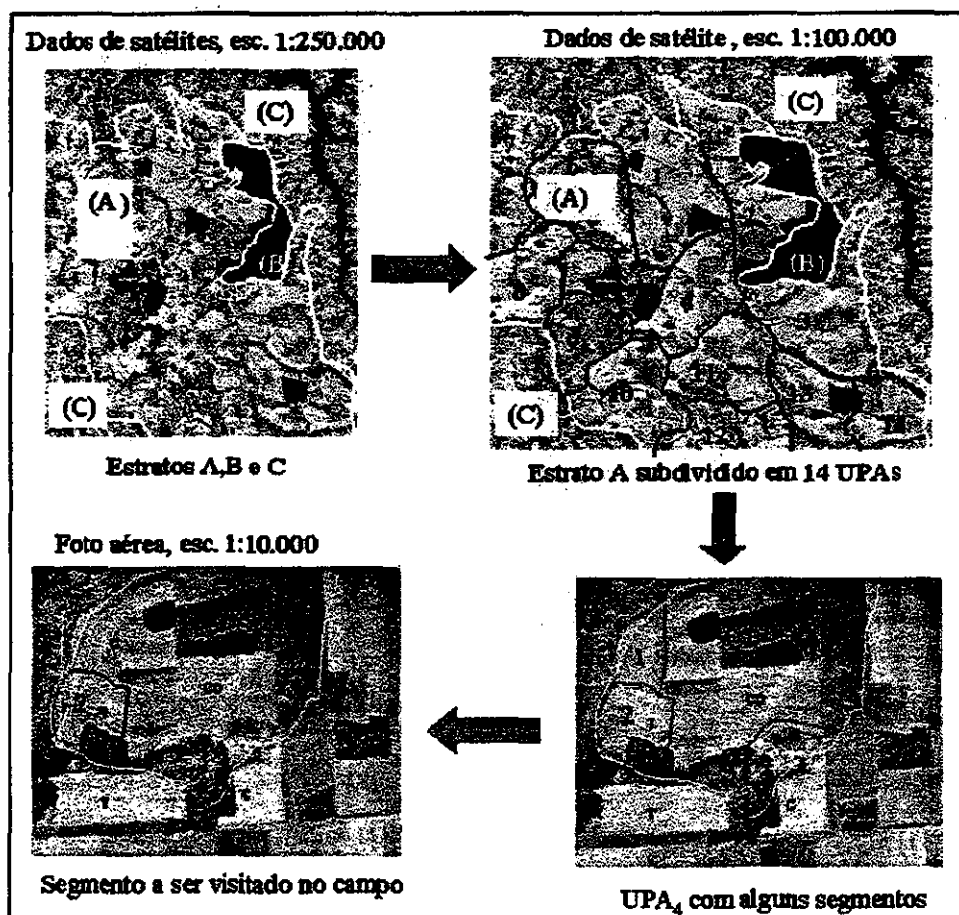


Fig. 8 – Esquema de construção do painel de amostra do Projeto SIAG.

As vantagens da abordagem metodológica do SIAG são:

- 1) permite estimar a área das culturas agrícolas dentro de uma confiabilidade pré-estabelecida;
- 2) permite estimar a área das culturas agrícolas mesmo não se dispondo de dados de satélites da safra corrente pois neste caso se utiliza o estimador de expansão direta;
- 3) reduz o tempo e custo no levantamento das informações a campo, por exemplo, no Paraná são levantadas informações em apenas 450 segmentos com tamanho que varia de 1 a 5 km<sup>2</sup>;
- 4) a metodologia do SIAG pode ser aplicada para áreas grandes (estado) ou pequenas (município), bastando para isso, adequar o painel de amostra.

As Figuras a seguir mostram exemplos de aplicações das imagens de sensoriamento remoto na agricultura.

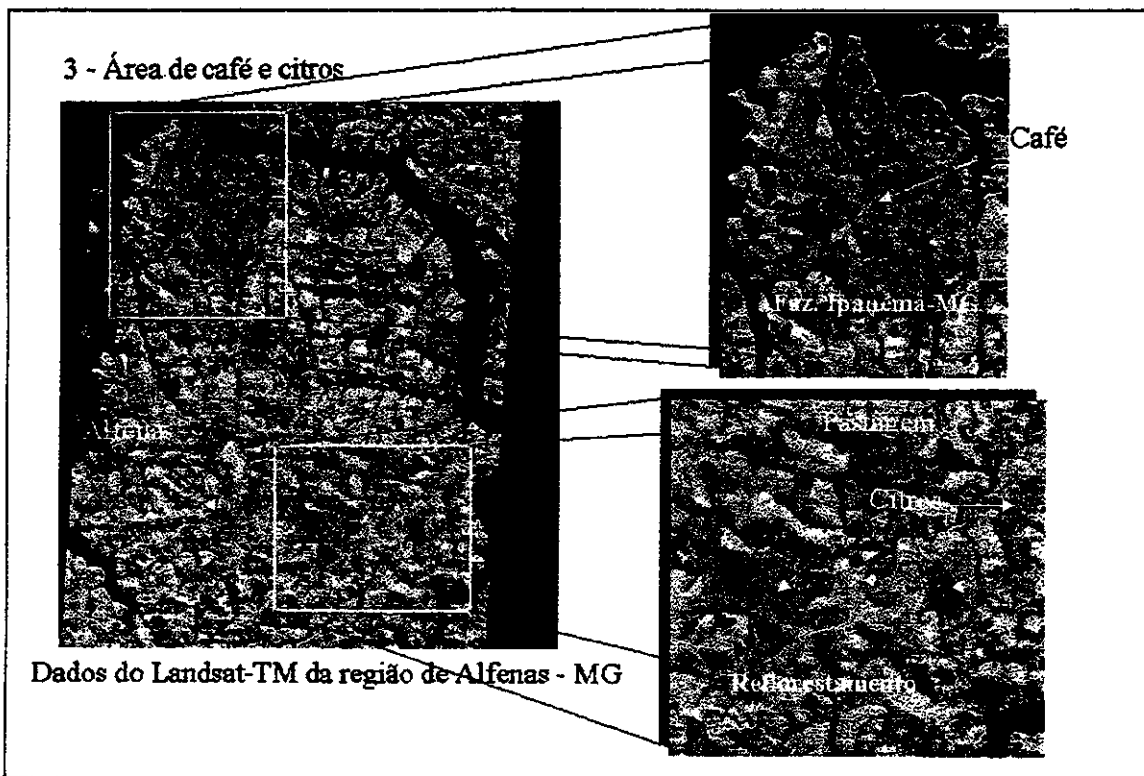


Fig. 9 - Imagem em composição colorida adquirida pelo sensor TM a bordo do satélite Landsat da região de Alfenas - MG, mostrando áreas de café, citrus, pastagem e reflorestamento.

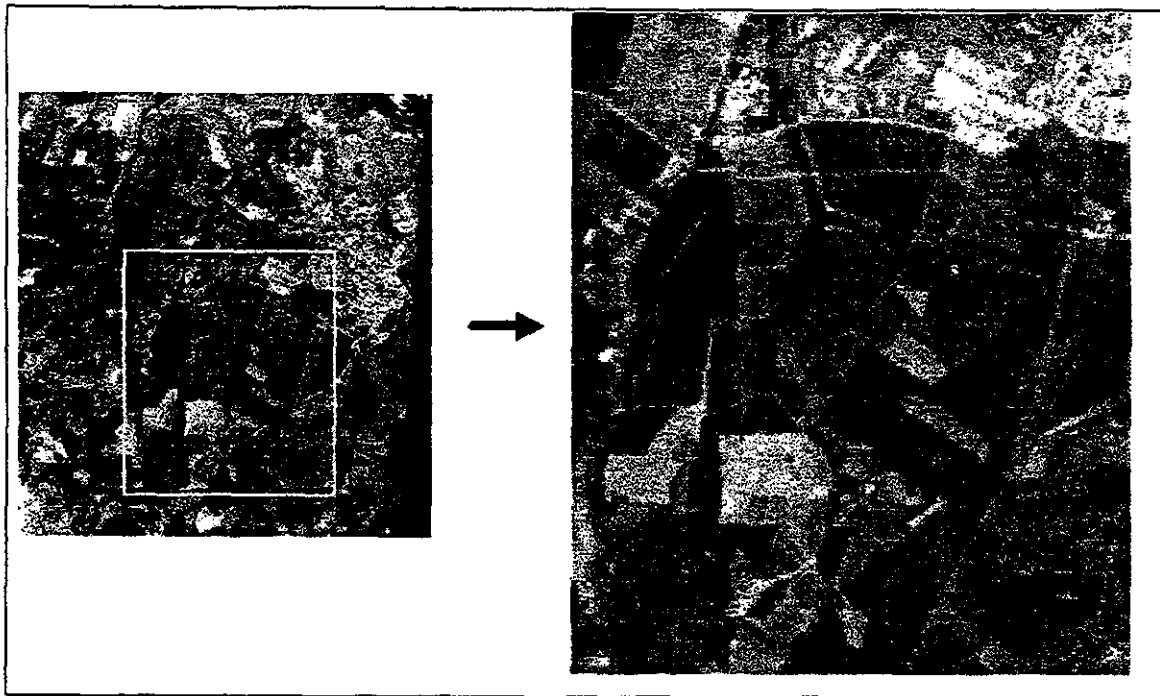


Fig. 10 – Imagem Landsat-TM da região de Bebedouro – SP, mostrando áreas destinadas à citricultura.

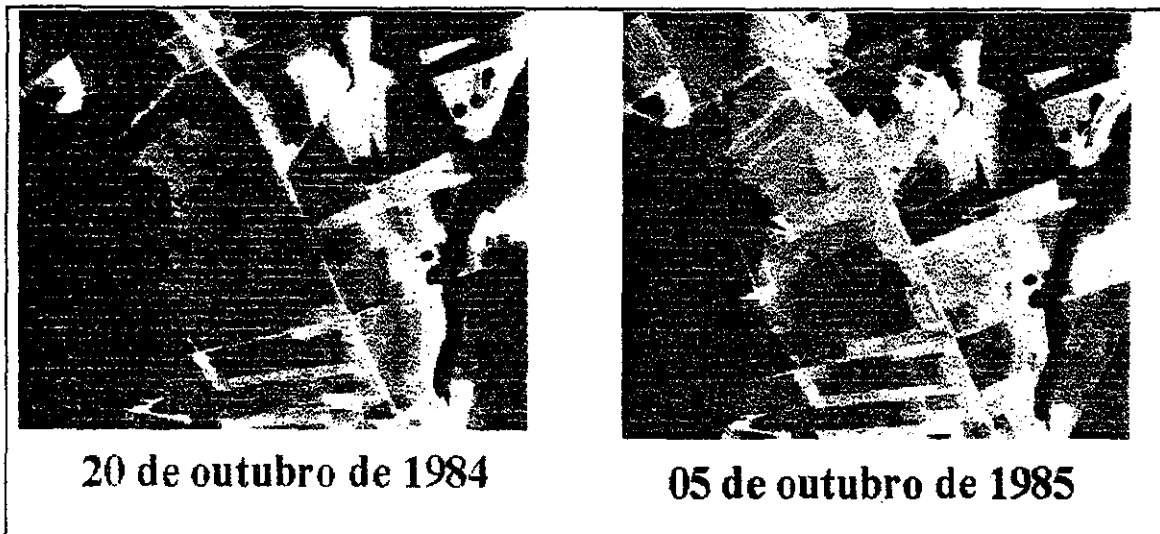


Fig. 11 – Imagem Landsat-TM banda 5 (infravermelho próximo) mostrando a expansão da fronteira agrícola na região norte do estado do Mato Grosso.

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assunção, G.V.; Duarte, V. **Avaliação de áreas preparadas para plantio (SOLONU) utilizando-se dados do satélite Landsat.** São José dos Campos. 75 p. (INPE- 2637-TDL/113). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1982.
- Ipoliti-Ramilo, G.A. **Imagens TM/Landsat-5 da época de pré-plantio para a previsão da área de culturas de verão.** São José dos Campos. 183p. (INPE-7116-TDI/688). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Mendonça, F. J.; Lee, D.C.L.; Tardin, A.T.; Shimabukuro, Y.E.; Chen, S.C.; Lucht, L.A.M.; Moreira, M.A.; Lima, A.M.; Maia, F.C.S. **Levantamento da área canavieira do Estado de São Paulo utilizando dados do Landsat ano safra 1979/80.** São José dos Campos:INPE, mar. 1981. (INPE-2021-RPE/288).
- Moreira, M.A. **Sistema de amostragem para estimar a área da cultura do trigo (*Triticum aestivum*, L) através de dados do Landsat.** (Mestrado- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE). 1983 (INPE-3015-TDL/150).
- Moreira, M.A.; Villalobo, A.G.; Assunção, G.V. de, Duarte, V.; Silva, G.; Biffi, J.A.S. **Utilização de dados do Landsat-TM para estimar área de soja (*Glycine max*, (L) Merrill) através da expansão direta.** In: **IV Simpósio Latinoamericano de Percepção Remota**, Bariloche, AG, 19-24 de nov. de 1989.
- Shimabukuro, Y. E.; Yi, J.L.R.; Duarte, V. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso através de imagens NOAA-AVHRR.** São José dos Campos:INPE. 1999. (INPE-7234-RPQ/698).
- Rudorff, B.F.T., G.T. Batista (1990), Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, 33:183-192.

# **CAPÍTULO 16**

▮

## **SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL**

**Lênio Soares Galvão\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : lenio@ltid.inpe.br

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>16-5</b>
<b>1. SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL .....</b>	<b>16-7</b>
<b>2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>16-11</b>



## LISTA DE FIGURAS

- 1 - FAIXA DO ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO MAIS UTILIZADA PELOS SENSORES ÓPTICOS. O POSICIONAMENTO DAS BANDAS DE ALGUNS SENSORES ESTÁ INDICADO ..... 16-7**
- 2 - IMAGENS AVIRIS DE UMA ÁREA SITUADA NA CHAPADA DOS VEADAIROS (GO) OBTIDAS NOS CANAIS 58 (900 NM) (a), 137 (1650 NM) (b) E 193 (2200 NM) (c). A RESPOSTA ESPECTRAL DAS ÁREAS INDICADAS É MOSTRADA NA FIGURA 3 ..... 16-9**
- 3 - RESPOSTA ESPECTRAL DOS ALVOS INDICADOS NA FIGURA 2. AS BARRAS NO TOPO DA FIGURA INDICAM A POSIÇÃO DOS CANAIS 58, 137 E 193 NM ..... 16-10**

## 1. SENSORIAMENTO REMOTO HIPERESPECTRAL

Imagens convencionais obtidas por sensores remotos que operam na faixa óptica nada mais são do que o resultado do processo de interação da energia radiante do Sol com a superfície terrestre. A compreensão dessa interação é fundamental, porque pode otimizar a extração de informação das imagens. A Figura 1 mostra o intervalo do espectro eletromagnético em que os canais dos sensores ópticos estão normalmente posicionados. O intervalo espectral de sensibilidade da visão humana situa-se entre 400 e 700 nm (ou entre 0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ ), sendo denominado faixa do visível. Os comprimentos de onda do azul, verde e vermelho, que fazem parte da faixa do visível, são indicados nessa figura. Entre 700 e 2500 nm, ocorre a faixa do infravermelho próximo.

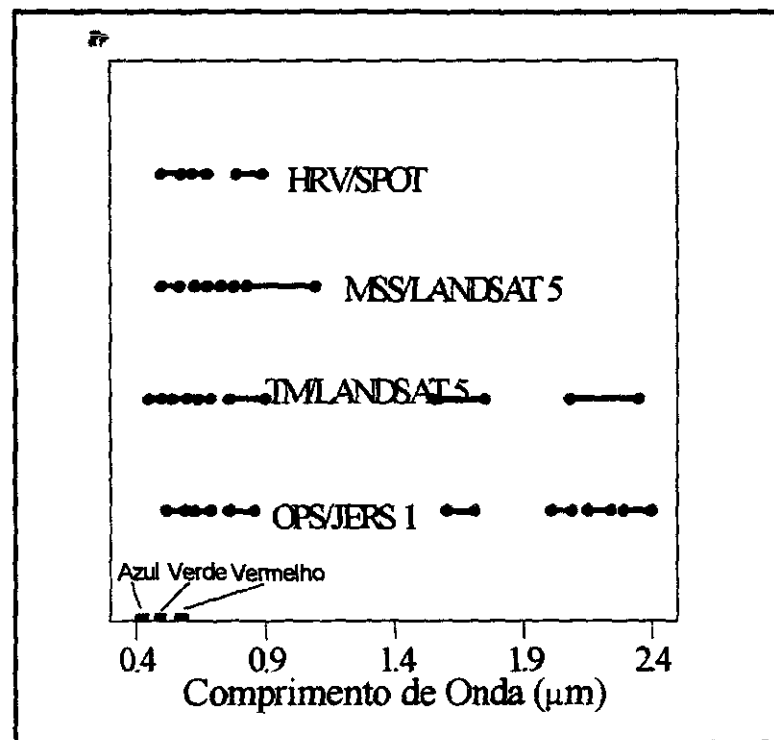


Fig. 1 – Faixa do espectro electromagnético mais utilizada pelos sensores ópticos. O posicionamento das bandas de alguns sensores está indicado.

De certa forma, o sensoriamento remoto pode ser considerado como um processo de amostragem do espectro eletromagnético, o qual pode ser feito com um número diferente de canais posicionados em intervalos espectrais distintos e com larguras variadas, conforme observado na Figura 1. Quanto maior o número de canais e menor sua largura, melhor será a caracterização espectral dos alvos.

Neste contexto, o estado-da-arte do sensoriamento remoto é caracterizado por uma nova etapa de aquisição de dados denominada "Espectroscopia de Imageamento" ou "Sensoriamento Remoto Hiperespectral" (Green et al., 1998). Em resumo, ela compreende a aquisição simultânea de imagens de uma determinada área em centenas de canais nos intervalos espectrais do visível e do infravermelho próximo (400-2500 nm). Consequentemente, feições de absorção espectral presentes nos espectros dos pixels podem ser reconstituídas em um nível de resolução espectral mais próximo do existente em condições de laboratório. Tais feições, que não podem ser caracterizadas por sensores multiespectrais como o TM/Landsat 5 (6 canais) ou o HRV/Spot 3 (3 canais), podem propiciar não apenas a discriminação de materiais na cena, como também a sua identificação. Sensores hiperespectrais, com operação prevista em nível orbital para o corrente ano, poderão ser utilizados para as mais variadas aplicações no campo das geociências, incluindo o monitoramento do comportamento dinâmico da vegetação, dos impactos ambientais causados por atividades de mineração e da identificação de materiais com propriedades espectrais bem definidas na cena. Resultante do seu potencial de aplicações, Espectroscopia de Imageamento tem sido considerada o sensoriamento remoto do próximo século.

Em função dos alvos (rocha, solo, vegetação, água) refletirem a energia proveniente do Sol com intensidade variada em diferentes comprimentos de onda, a diferenciação entre os mesmos dependerá do canal em que se está observando a imagem. Para exemplificar esse fato, a Figura 2 mostra imagens de uma mesma área obtidas em três comprimentos de onda ou canais distintos pelo sensor hiperespectral AVIRIS (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer com 224 canais), que coletou dados no Brasil a partir de uma aeronave da NASA (Galvão et al., 1999). Nestas imagens, exemplos de áreas com predominância de solo, vegetação e queimada são indicados.



Fig. 2 – Imagens AVIRIS de uma área situada na Chapada dos Veadeiros (GO) obtidas nos canais 58 (900 nm) (a), 137 (1650 nm) (b) e 193 (2200 nm) (c).  
A resposta espectral das áreas indicadas é mostrada na Figura 3.

Na Figura 2, a vegetação verde que ocorre ao longo da rede de drenagem aparece com níveis de cinza claros no canal 58 (900 nm) (Fig. 2a), mas com níveis de cinza mais escuros nos dois outros canais (Figs. 2b e 2c). O solo tende a aparecer esbranquiçado nos três canais, enquanto a área queimada aparece escura nos canais 58 (900 nm) e 137 (1650 nm) e um pouco mais clara no canal 193 (2200 nm). A razão dessas diferenças é ilustrada na Figura 3 que mostra a resposta espectral dessas áreas. A vegetação reflete muito no início do infravermelho (canal 58 em 900 nm) em função de sua estrutura celular, mas responde com menor intensidade nos comprimentos de onda equivalentes aos canais 137 (1650 nm) e 193 (2200 nm), devido ao efeito da umidade das plantas que tende a absorver a energia radiante. Para o solo, a reflectância é aproximadamente igual nos três comprimentos de onda em função de suas características mineralógicas, embora outros tipos de solo possam apresentar comportamento distinto. Para a área queimada a resposta espectral é baixa, mas é crescente na direção do canal 193.

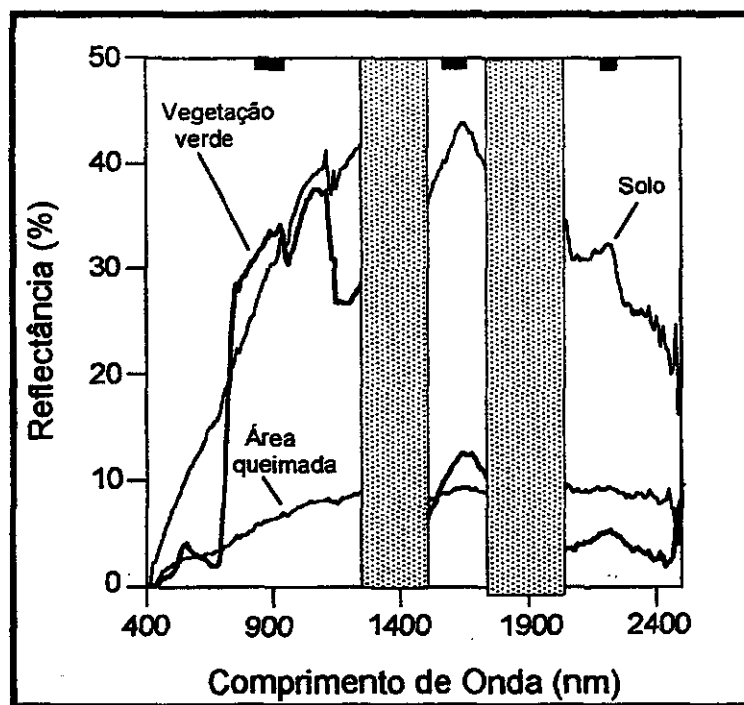


Fig. 3 – Resposta espectral dos alvos indicados na Figura 2. As barras no topo da figura indicam a posição dos canais 58, 137 e 193 nm.

Para melhor representar essas variações espectrais, pode-se atribuir cores aos canais cujas imagens foram mostradas na Figura 2 e verificar os diferentes tipos de alvos existentes na cena. Na verdade, o olho humano é muito mais sensível a presença de cores. Na composição colorida que será mostrada durante a palestra, foram atribuídas as cores vermelho, verde e azul aos canais 58 (900 nm), 137 (1650 nm) e 193 (2200 nm), respectivamente. Em termos de análise dessa nova imagem, como exemplo, observe que a vegetação que ocorre ao longo da drenagem aparecerá em cor vermelha por possuir um valor alto de reflectância em 900 nm (canal 58) e valores mais baixos em 1650 (canal 137) e 2200 nm (canal 193), conforme indicado na Figura 3. Raciocínio similar poderá ser utilizado para os demais alvos.

Entretanto, o aspecto mais importante não é a obtenção em si das imagens, mas sim a compreensão ou identificação dos fatores responsáveis pelas variações de seus níveis de cinza ou cores. Além disso, imagens de satélites podem ser analisadas de forma

integrada com outros tipos de dados (p. ex., geofísicos, geoquímicos) para otimizar o mapeamento dos recursos naturais de um determinado ambiente.

## **2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Green, R. O.; et al. O. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 227-248, 1998.

Galvão, L. S.; Vitorello, I.; Almeida Filho, R. Effects of band positioning and bandwidth on NDVI measurements of tropical savannas. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, n. 2, p. 181-193, 1999.

## **CAPÍTULO 17**

# **PANAMAZÔNIA: O DOMÍNIO DA FLORESTA AMAZÔNICA NA AMÉRICA DO SUL**

**Paulo Roberto Martini\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS-INPE**

---

\* e.mail : [martini@ltid.inpe.br](mailto:martini@ltid.inpe.br)

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>17-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>17-7</b>
<b>1. APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>17-9</b>
<b>2. FLORESTAS .....</b>	<b>17-12</b>
<b>3. RIOS .....</b>	<b>17-15</b>
<b>4. SOLOS E AGRICULTURA .....</b>	<b>17-17</b>
<b>5. RECURSOS MINERAIS .....</b>	<b>17-18</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>17-20</b>



## LISTA DE FIGURAS

- 1 - FRONTEIRAS PANAMAZÔNICAS TRAÇADAS SOBRE AS BORDAS DOS PAÍSES NUM CONJUNTO DE 345 CENAS DO SATÉLITE LANDSAT COBRINDO TODO O EXTENSO DOMÍNIO ..... 17-10**

## LISTA DE TABELAS

- 1 – DESFLORESTAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL EM AGOSTO/1996 17-11**
- 2 – DESFLORESTAMENTO NOS DOMÍNIOS PANAMAZÔNICOS EM 1990**  
..... **17-13**

## **1. APRESENTAÇÃO**

Alguns meses antes da Conferência das Nações Unidas para Desenvolvimento e Meio Ambiente, UNCED-92, o INPE propôs um projeto de cooperação para os países amazônicos da América do Sul. Este projeto contemplava o uso de Sensoriamento Remoto orbital para monitorar a floresta tropical da megaregião. O nome Panamazônia como ficou denominado o projeto, serviu e serve atualmente para designar a grande região compreendida pela floresta no Brasil e no conjunto dos países amazônicos.

A Tabela 1 mostra a distribuição do domínio florestal amazônico não brasileiro em relação a área total dos respectivos países. O tamanho final da área panamazônica incluindo aquela do Brasil ( $5.082.539 \text{ km}^2$ ) é  $7.702.264 \text{ km}^2$ . Este número define a distribuição ambiental da floresta amazônica na América do Sul, ou seja, o Domínio Panamazônico. Este número foi o primeiro e talvez o principal resultado obtido pelo projeto de cooperação. Principal porque mostra que pelo menos 58% da área total dos países panamazônicos se encontram dentro do contexto ambiental de florestas tropicais. Somos todos predominantemente amazônicos como mostra a Figura 1 onde as fronteiras panamazônicas estão traçadas sobre as bordas dos países e o conjunto de 345 cenas LANDSAT que cobrem todo o extenso domínio.

Neste resumo estendido serão descritos alguns elementos marcantes da paisagem nativa e antrópica da Panamazônia, principalmente aqueles possíveis de serem observados e analisados em imagens do Satélite LANDSAT.

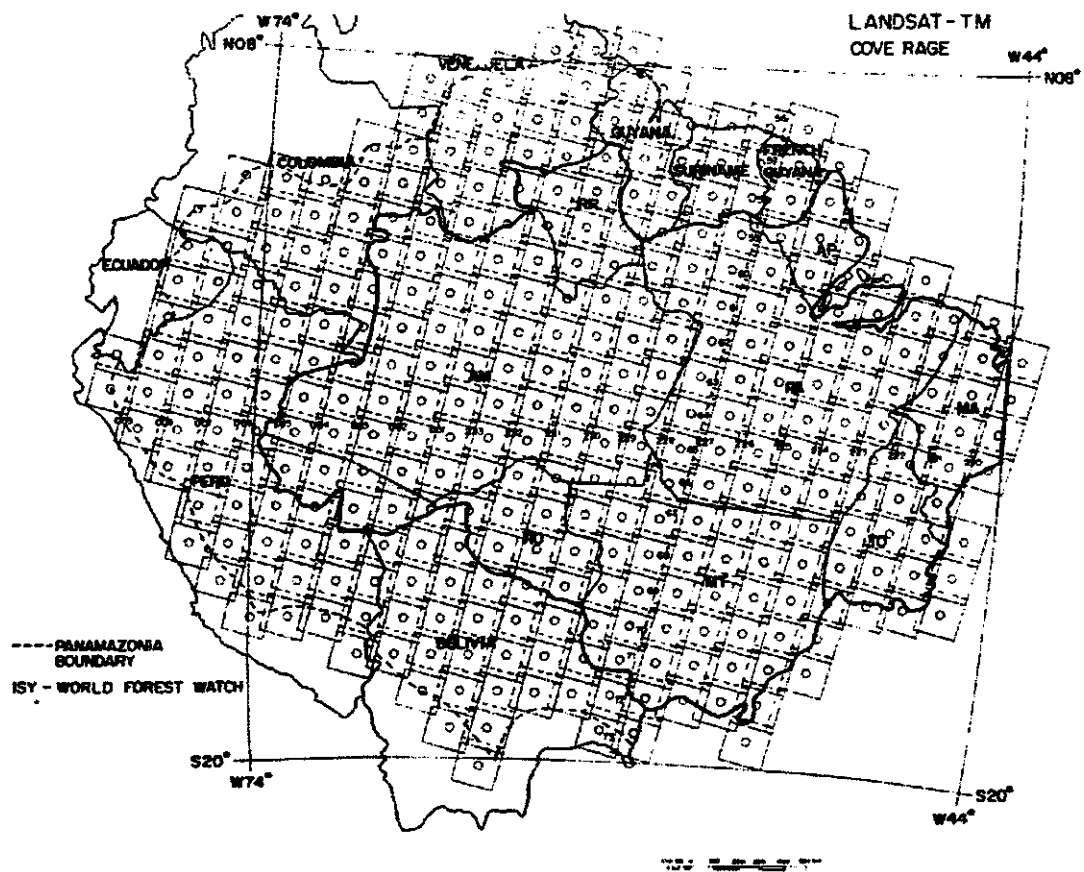


Fig. 1 - Fronteiras Panamazônicas traçadas sobre as bordas dos países num conjunto de 345 cenas do satélite Landsat cobrindo todo o extenso domínio.

Fonte : Martini (1993, pg 8)

**TABELA 1 : DESFLORESTAMENTO NA AMAZÔNIA LEGAL EM AGOSTO/1996**

ESTADO	ÁREA = A km <sup>2</sup>	DEFLOREST. (D) km <sup>2</sup>	%	TAXA (T) MÉDIA Km <sup>2</sup> /ano	$\frac{A-D}{T}$
ACRE	153.698	3.742	8,94	433	323
AMAPÁ	142.359	1.782	1,25	9	15.619
AMAZONAS	1.567.954	27.434	1,74	1.023	1.505
# MARANHÃO	329.556	99.338	30,14	1.061	217
MATO GROSSO	901.421	19.141	13,21	6.543	119
PARÁ	1.246.833	176.138	14,12	6.135	174
RONDÔNIA	238.379	48.648	20,40	2.432	78
RORAIMA	225.017	5.361	2,38	214	1.026
TOCANTINS	277.322	5.483	9,18	320	787
AMAZÔNIA	5.082.539	517.069	10,17	18.161	251

Fonte: INPE (1997, p. 10)

# Área total do Estado.

## 2. FLORESTAS

A Panamazônia é conhecida pela sua cobertura florestal densa. Verdadeiramente a floresta densa (ombrófila-densa) é uma parte importante dos tipos de coberturas ali instaladas a partir da última glaciação há 12.000 anos antes do presente. Outros tipos importantes são as florestas abertas (ombrófila aberta) e as savanas ou cerrados com uma extensa zona de transição entre elas. Os degraus andinos dão berço a florestas também tropicais que são denominadas selvas altas ou selvas de piemonte. A distribuição dos tipos de florestas da Amazônia Legal brasileira se encontram no anexo Amazônia Desflorestamento 95-97 (INPE,1997).

Este condomínio de feições florestais de expressão planetária vem sendo submetido nos últimos quarenta anos a um severo processo de ocupação. Os números mais recentes sobre a expansão da ação antrópica no Brasil, com detalhes, está apresentado também no anexo acima mencionado, enquanto que informações gerais sobre os demais países são apresentadas em INRENA-Peru (1996), CUMAT-Bolívia (1992), IGAC-Colômbia (1993), SAGECAN-Venezuela (1993), ENGREF-Guiana Francesa (1994) e ENRIC (1994) para os demais países. **Informações muito didáticas são apresentadas no anexo da revista Veja.**

O número do desflorestamento na Amazônia brasileira para agosto de 1996 era de 517.069 km<sup>2</sup> ou 51.706.900 hectares. Ao se relacionar estes números com a área aqui adotada para Amazônia Legal, (5.082.539 km<sup>2</sup>, incluindo todo o Maranhão), chega-se ao valor de 10,17% de desflorestamento. Os estados que mais contribuíram para este percentual são os estados de Mato Grosso e Pará. A Tabela 1 mostra a distribuição dos desflorestamento no período 95/96 e as áreas dos estados amazônicos brasileiros. A tabela também mostra a taxa de desflorestamento encontrada durante o período 77-96 e de acordo com esta taxa, o possível prazo de existência das florestas nos respectivos estados.

**TABELA 2 - DESFLORESTAMENTO NOS DOMÍNIOS PANAMAZÔNICOS EM 1990**

	Desflorestamento (km <sup>2</sup> )	Domínio (km <sup>2</sup> )	%
BOLÍVIA	23.974	567.303	4,22
BRASIL	415.200	5.082.539	8,16
*COLOMBIA	129.700	# 1.138.891	11,38
*EQUADOR	67.630	#270.670	24,98
GUIANA	5.190	214.960	2,41
GUIANA FRANCESA	1.017	91.000	1,11
PERU	69.482	755.605	9,20
SURINAME	3.200	142.800	2,24
*VENEZUELA	194.530	#912.050	21,32
	909.923	9.175.818	9,91

Fontes: INPE (1994, p. )

\* Inclui bosques tropicais fora do domínio amazônico.

# Inclui terrenos fora do domínio amazônico.

Os números do desflorestamento para os outros países sul americanos foram buscados pelo Projeto Panamazônia gerenciado pelo INPE. No decorrer do projeto a partir de 1992, foram criados e treinados grupos de trabalho nos diversos países, sendo-lhes transferidas imagens gravadas pela Estação de Cuiabá. Resultados finais sobre o desflorestamento foram obtidos para três países: Bolívia, Peru e Guiana Francesa.

O Peru através do Instituto Nacional de Recursos Naturais – INRENA, reportou que o índice de desflorestamento de suas florestas tropicais até 1990 foi de 9.20% da cobertura original, representando um total de 69.482,37 km<sup>2</sup> ou 6.948.237 hectares.

Na Guiana Francesa o ENGREF - Kourou apresentou em seu relatório de 1994 que 10.43% de florestas em sua área costeira haviam sido desmatadas até 1990. Este índice aponta para um número em torno de 1.000 km<sup>2</sup> de desflorestamento ou 1,10% da cobertura original daquele território francês.

A Bolívia através do Centro de Investigação do Uso Maior da Terra - CUMAT , avaliou que os bosques tropicais desmatados até 1990 somavam 23.974, 99 km<sup>2</sup> ou 4.22% da área original de florestas.

Os demais países reportaram apenas parcialmente seus resultados ao Projeto Panamazônia. Para estes países preferiu-se buscar figuras publicadas por ENRIC (1994).

A Tabela 2 sintetiza a distribuição do desflorestamento nos domínios amazônicos da América do Sul até o ano de 1990. No caso dos países como Colômbia, Venezuela e Equador preferiu-se manter as áreas totais dos países ao invés de usar os valores apenas dos domínios amazônicos da tabela 1, isto porque os números obtidos do Projeto Panamazônia eram incompatíveis com aqueles apresentados por ENRIC (1994).



### 3. RIOS

Os rios panamazônicos estão quase em sua totalidade na rede tributária do Amazonas. Separaram-se dele as bacias do Alto Orinoco na Venezuela, o Rio Essequibo na Guiana, o Rio Courantyne na fronteira Guiana-Suriname e o Rio Maroni da fronteira Suriname-Guiana Francesa. No Brasil, deve ser mencionado bacias pequenas que drenam para o Atlântico. Estas incluem os rios Oiapoque e Araguari no Amapá, o Rio Gurupi no Pará e o Rio Mearim no Maranhão.

Os tributários e o próprio Rio Amazonas apresentam águas de cores diferenciadas bem características nas imagens de satélite. Assim os rios de águas turvas como o Amazonas e todos os outros afluentes com nascentes andinas aparecem nas imagens em cores ou tons mais claros. Os rios de águas cristalinas ou negras aparecem em cores ou tons escuros.

De tons claros são os dois principais formadores do Rio Amazonas no Peru: os rios Ucayali e Marañon. O primeiro acomoda a origem do Amazonas junto ao Nevado Queuhisha, um pico de 5.000 metros localizado nos Andes Ocidentais, próximo de Arequipa, Peru. Neste local um riacho de nome Apacheta acomoda as primeiras águas perenes do Rio Amazonas. (Palkiewicz e Goicochea, 1996; Martini e Garcia, 1996).

De águas turvas, também outros grandes tributários andinos como o Napo, o Putumayo e o Caquetá. Os formadores do Rio Madeira como o Madre de Dios, Beni, Grande e Mamoré imprimem a ele também a assinatura de águas turvas.

Rios negros estão localizados principalmente na calha norte do Amazonas e tem suas cabeceiras nas serras divisoras Amazonas-Orinoco, ao longo das fronteiras do Brasil com as guianas e a Venezuela. Dentre estes devem ser mencionados o próprio Rio Negro, além do Uatumã, Trombetas, Paru e Jari.

Rios cristalinos são aqueles com as cabeceiras instaladas no Planalto Central: o Tapajós com seus formadores Juruena e Teles Pires, o Xingu com seus formadores principais Iriri e Coluene, e o conjunto Araguaia-Tocantins, não tributários diretos, mas parte da embocadura do Amazonas.

Os rios cristalinos principalmente o Tapajós e o Xingu vem sendo seriamente impactados por atividade de garimpo. O rejeito síltico-argiloso destes garimpos tem transformado as águas límpidas destes rios em águas turvas (Martini, 1988).

Na Bacia do Rio Tapajós existem duas grandes fontes de turbidez por garimpos. A primeira está no Vale do Rio Teles Pires, a jusante das cidades de Peixoto de Azevedo e Alta Floresta, ambas no Estado do Mato Grosso. A segunda entre os rios Crepori e Jamanxim no sudoeste do Estado do Pará. Na Bacia do Xingu os garimpos são mais extensos nas cabeceiras do Rio Fresco, para sul da cidade de Tucumã, também no sul do Estado do Pará.

Os rios amazônicos mostram um potencial hidrelétrico invejável e alguns sítios acomodam grandes represas que produzem uma energia importante, porque não são poluente e nem tão pouco impactante. As usinas atualmente em operação são: Samuel em Porto Velho (RO), Curuauna em Santarém (PA), Tucuruí no baixo Tocantins e Balbina no baixo Uatumã. Estas últimas representam exemplos opostos de planejamento. Tucuruí é a maior hidrelétrica brasileira enquanto Balbina com um lago de dimensões semelhantes não produz energia suficiente para suprir a cidade de Manaus.

A usina de Procopondo no Rio homônimo do Suriname é a única unidade hidrelétrica grande estabelecida fora do Brasil em terrenos amazônicos.

#### 4. SOLOS E AGRICULTURA

Os padrões de agricultura nas imagens do Landsat, indicam que o manejo tradicionalmente observado na região sul do Brasil foi aplicado apenas localmente na Amazônia Legal. Dois fatores são prontamente identificados como inibidores daquele procedimento: a pequena distribuição de solos ricos e produtivos (e.g. latossolos vermelho-escuros) e a falta de condições geomórficas adequadas para agricultura ostensiva e mecanizada. As exceções são as extensas áreas com soja da Chapada dos Parecis no Mato Grosso e as agrovilas instaladas sobre solos muito nobres ao longo da Rodovia Transamazônica próximo a Altamira no Pará.

A instalação de culturas perenes, adequadas ao ambiente amazônico, tem crescido constantemente mostrando que além de boa produtividade, elas ajudam a inibir a erosão acelerada dos solos provocada pelos altos índices pluviométricos. Culturas de chá, pimenta, cacau e outras, vem se expandindo principalmente nos estados do Amazonas e de Rondônia.

A pecuária, entretanto continua sendo o padrão mais densamente distribuído nas áreas desflorestadas da Amazônia. A pecuária continua firmemente se expandindo principalmente em Mato Grosso (região nordeste), sul de Rondônia, Pará e mais recentemente no Acre. A experiência tem demonstrado que a pecuária, além de mostrar uma produtividade cerca de 4 vezes inferior a outras regiões produtoras tipo Goiás e Triângulo Mineiro, ela provoca pelo pisoteio do gado e pela erosão uma degradação acelerada dos solos. Esta degradação aparece pela lateritização intensa e rápida das áreas desmatadas.

Alternativas para usos sustentáveis da terra são ainda muito discretas e se resumem a questões acadêmicas junto a instituições de pesquisa que atuam na região. Nesta linha de sustentabilidade deve ser ressaltada a convivência harmônica dos seringueiros com a mata nativa no Estado do Acre. Famílias de seringueiros por décadas vem explorando a

mata nativa sem destruí-la, enquanto que pecuaristas em meses movem imensas matas semelhantes para pastagens.

Nos demais países panamazônicos aparecem com destaque as culturas de arroz e cana-de-açúcar da região costeira da Guiana e do Suriname, e os imensos campos de coca da Bolívia, do Peru e da Colômbia.

As áreas de arroz e de cana-de-açúcar têm crescido intensamente na Guiana principalmente ao redor das cidades de Georgetown e de Nova Amsterdam. Os campos de coca vem crescendo rapidamente nas regiões de Cochabamba e de Santa Cruz na Bolívia, bem como no médio Ucayalli, ao redor da cidade de Pucallpa no Peru. As imagens mostram também que os campos colombianos não se expandiram tanto como nos países mencionados. A pouca expansão da coca na Colômbia pode ser compensada pela presença de grandes campos do alto Rio Napo na região dominada pela cidade de Tena no Equador. Esta área mostra a entrada rápida e intensa da cultura a partir do final dos anos 80.

## **5. RECURSOS MINERAIS**

Nos limites da Amazônia brasileira se encontram três das maiores minas para exploração mineral, atualmente em operações no planeta. Tratam-se das minas de Carajás, do Rio Trombetas e do Rio Pitinga.

A chamada Província Mineral de Carajás, localizada no Estado do Pará, contém como principal jazimento mineral 17.8 gigatoneladas de minério de ferro (hematita). Secundariamente contém 1.1 gigatoneladas de minério de cobre, além de ouro, prata e molibdênio em quantidades menores, porém consideradas também como jazimentos.

Os platôs próximos do baixo Rio Trombetas no município de Oriximiná abrigam uma jazida de 600 megatoneladas de bauxita, minério de alumínio.

O alto vale do Rio Pitinga, formador do Uatumã no Estado do Amazonas, acomoda um grande jazimento de cassiterita contendo 270.000 toneladas de estanho.

Outros jazimentos expressivos em atividade ou em reserva são: Serra do Navio (AP) com manganês, Morro dos Sete Lagos (AM) com nióbio e terras raras, Serra Pelada (PA) com ouro e Paragominas (PA) com alumínio.

O farto conjunto de jazimentos minerais conhecidos na Amazônia não se repete nos demais países panamazônicos. Este fato deve-se certamente a falta de conhecimento e de trabalhos sistemáticos de mapeamento como aqueles iniciados pelo Projeto RADAMBRASIL em meados da década de 60.

Nas imagens as grandes minas citadas anteriormente não provocam impactos tão significativos à paisagem e ao meio ambiente físico quanto aqueles descritos anteriormente para os garimpos. Observa-se que os recursos hídricos envolvidos na mineração não carregam rejeitos e quando existem ficam decantando em lagos isolados. Verdadeiramente, as bordas das províncias minerais como no Projeto Carajás se transformaram em escudos contra a expansão do desflorestamento.

Petróleo e gás são outros bens minerais intensamente explorados no domínio panamazônico. A chamada amazônia peruana (Peruvian Amazon), por exemplo, contém reservas suficientes a ponto de instalar um imenso oleoduto que sai do Rio Tigre na fronteira com o Equador e do baixo Rio Maroñon para o porto de Bayovar no Pacífico. O oleoduto mede mais que 1.300 quilômetros, cerca da metade em domínio de floresta tropical. O Brasil, também contém reservas importantes de gás descobertos no alto Rio Tefé, Estado do Amazonas. Os furos de sondagem ali são identificados nas imagens por um desflorestamento tipo pequenas asas deltas. Reservas de petróleo também são mencionadas na Amazônia venezuelana.

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- CUMAT (1992). Desbosque de la Amazonia Boliviana. Centro Investigaciones de la Capacidad de Uso Mayor de la Tierra. La Paz, Bolivia.
- Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, 1995.
- ENGREF (1994). Projet Panamazonia Première Phase. Ecole Nationale de Genie Rural des Eaux et des Forets, Centre de Kourou, Guiane Française. Setembro.
- ENRIC (1994) A Source Book on Tropical Forest Mapping and Monitoring through Satellite Imagery: The Status of Current International Efforts. Environmental and Natural Resources Information Center. Arlington, VA. June.
- Fioravante, C. O rio Amazonas que não está no mapa. **Revista Nova Escola**, São Paulo : Abril, v. 10, n. 86, p. , ago. 1995.
- IGAC (1993). Relatório sobre el Estado Actual del Proyecto IGAC-INPE. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (1994). Technical Cooperation and Training within the Panamazonia Project: a Proposal to UNEP. Brazilian National Institute of Space Research, São José dos Campos SP. October.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (1997). Amazônia: Desflorestamento 1995-1997. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-Instituto Brasileiro do Meio Ambiente. MCT-MMA. São José dos Campos SP. (INPE – 6680/RPQ – 680)
- INRENA (1996). Monitoreo de la Deforestación en la Amazonia Peruana. Instituto Nacional de Recursos Naturales. INR-48-DAGMAR. Lima, Peru.

- Martini, P.R. O declínio de um grande rio brasileiro detectado por imagens LANDSAT. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., vol.1. Natal, 1988. **Anais. Natal: SBSR**, out
- Martini, P.R. (1993). Panamazonia Project to Monitor South America Tropical Forest. VI Latin America Remote Sensing Symposium. SELPER-Society of Latin America Remote Sensing Specialists. Cartagena de Indias, Colombia. October.
- Martini, P.R; Garcia, J.W. Depicting the Headwaters of the Amazon River through the Use of Remote Sensing Data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, vol. 31,n. B7, p. .1996.
- Palkiewicz, J.; Goicochea, Z.N. (1996). Resumen de Actividades de la Expedicion Cientifica Internacional para Establecer de Manera Geograficamente Valida el Verdadero Origen del Rio Amazonas. Sociedad Geografica de Lima, Peru. Julio.
- SAGECAN (1993). Deforestacion em el Bosque Lluvioso Tropical: uma Perspectiva Multitemporal. Proyecto Panamazonia-Caso Venezuela. ServicioAutonomo de Geografia y de Cartografia Nacional. Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables. Caracas, Venezuela.
- VEJA (1997). Amazônia. Anexo do número 1527. Ano 30 n.5. Dezembro, 24.

## **CAPÍTULO 18**

# **CONCEITOS GERAIS DO CLIMA E DO EFEITO ESTUFA NA MUDANÇA CLIMÁTICA (PARTE I E II)**

**José Antonio Marengo\***

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE**

---

\* e.mail : [marengo@cptec.inpe.br](mailto:marengo@cptec.inpe.br)



## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>18-5</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>18-7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18-9</b>
<b>2. A PREVISÃO DA MUDANÇA CLIMÁTICA .....</b>	<b>18-12</b>
<b>3. MUDANÇAS CLIMÁTICAS : LICÕES DO PASSADO .....</b>	<b>18-13</b>
<b>4. AS PRIMEIRAS MANIFESTAÇÕES DO EFEITO ESTUFA ANTROPOGÊNICO JÁ SÃO EVIDENTES .....</b>	<b>18-18</b>
<b>5. O CICLO DO CARBONO .....</b>	<b>18-20</b>
<b>6. RETROALIMENTAÇÕES E INCERTEZA NA PREVISÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....</b>	<b>18-25</b>
6.1 VAPOR D'ÁGUA .....	18-26
6.2 GELO E NEVE .....	18-26
6.3 NUVENS .....	18-27
6.4 QUÍMICA TROPOSFÉRICA .....	18-27
6.5 AEROSSÓIS .....	18-28
6.6 TEMPERATURA OCEÂNICA .....	18-29
6.7 CIRCULAÇÃO OCEÂNICA .....	18-30
6.8 PADRÕES EÓLICOS E TAXAS DE TROCA DE GASES OCEÂNICOS .....	18-31
6.9 MODIFICAÇÃO DO CICLO BIOGEOQUÍMICO OCEÂNICO .....	18-31

6.10 FERTILIZAÇÃO POR DIÓXIDO DE CARBONO .....	18-32
6.11 EUTROFICAÇÃO E TOXIFICAÇÃO .....	18-33
6.12 TEMPERATURA E RESPIRAÇÃO DA VEGETAÇÃO TERRESTRE .....	18-33
6.13 UMIDADE DO SOLO .....	18-34
6.14 DISTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO .....	18-34
6.15 ALBEDO .....	18-35
6.16 EFEITOS SOBRE O FITOPLÂNCTON .....	18-35
6.17 EFEITOS SOBRE A BIOTA TERRESTRE .....	18-35
6.18 FONTES TROPICAIS DE METANO .....	18-36
6.18.1 ARROZAIIS .....	18-36
6.18.2 PÂNTANOS .....	18-36
6.18.3 METANO NO GELO PERMANENTE .....	18-36
6.18.4 MATÉRIA ORGÂNICA NO GELO PERMANENTE .....	18-37
6.18.5 HIDRATOS DE METANO NO GELO PERMANENTE .....	18-37
6.18.6 HIDRATOS DE METANO NAS ÁGUAS LITORÂNEAS .....	18-38
<b>7. OS EFEITOS DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES-ESTUFA .....</b>	<b>18-39</b>
<b>8. MATERIAL COMPLEMENTAR .....</b>	<b>18-39</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>18-40</b>
<b>APÊNDICE I - FIGURAS RELACIONADAS COM O TEMA .....</b>	<b>18-41</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>1 – COMO ATUA O EFEITO ESTUFA .....</b>	<b>18-9</b>
<b>2a – TEMPERATURAS MÉDIAS GLOBAIS GENERALIZADAS DURANTE E IMEDIATAMENTE ANTES DA HISTÓRIA DA CIVILIZAÇÃO HUMANA. OS ÚLTIMOS 20 MIL ANOS .....</b>	<b>18-17</b>
<b>2b – TEMPERATURAS MÉDIAS GLOBAIS GENERALIZADAS DURANTE E IMEDIATAMENTE ANTES DA HISTÓRIA DA CIVILIZAÇÃO HUMANA. OS ÚLTIMOS MIL ANOS .....</b>	<b>18-17</b>
<b>3 – REPRESENTAÇÃO GENERALIZADA DO CICLO DO CARBONO, MOSTRANDO OS PRINCIPAIS W-05 E FLUXOS. AS QUANTIDADES PROVÊM DE IPCC, SCIENTIFIC ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE, FIGURA 1.1 E REFERÊNCIAS .....</b>	<b>18-20</b>
<b>4 – CONCENTRAÇÕES ATMOSFÉRICAS DE CO<sub>2</sub> MEDIDAS EM MAUNA LOA, HAVAÍ, DESDE 1958 .....</b>	<b>18-23</b>
<b>5 – AUMENTO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DESDE A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL .....</b>	<b>18-24</b>

## LISTA DE TABELAS

- 1- GASES ESTUFA COMUNS SUAS ORIGENS, TAXAS DE ACUMULAÇÃO NA ATMOSFERA E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA O AQUECIMENTO GLOBAL NOS ANOS 80 ..... 18-10**
- 2 – ALGUMAS QUANTIDADES DE CARBONO NO SISTEMA CLIMÁTICO EM BILHÕES DE TONELADAS (GT DE CARBONO) ..... 18-23**

## 1. INTRODUÇÃO

Gases-estufa são aqueles que provocam a retenção da radiação infravermelha na atmosfera, aquecendo assim a superfície da Terra e a camada inferior da atmosfera (Figura 1). Traços desses gases têm estado presentes na atmosfera durante a maior parte da história da Terra. O vapor d'água, por sua abundância, é de longe o mais importante gás natural causador do efeito estufa. O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o segundo gás-estufa em importância, é lançado na atmosfera de maneira tanto natural quanto não-natural. Vêm sendo lançado de maneira natural pelos vulcões ao longo da história da Terra, percorrendo os vários ciclos que o carbono segue na natureza. Se não fosse a presença do  $\text{CO}_2$ , a temperatura na superfície terrestre seria cerca de  $33\text{ }^\circ\text{C}$  mais baixa do que é hoje, o que é nocivo à vida. Mas o  $\text{CO}_2$  também entra na atmosfera de forma não-natural em decorrência de atividades humanas habituais, principalmente a queima de combustíveis fósseis e a destruição (atual) das florestas pluviais (a derrubada de florestas temperadas contribuiu significativamente no passado).

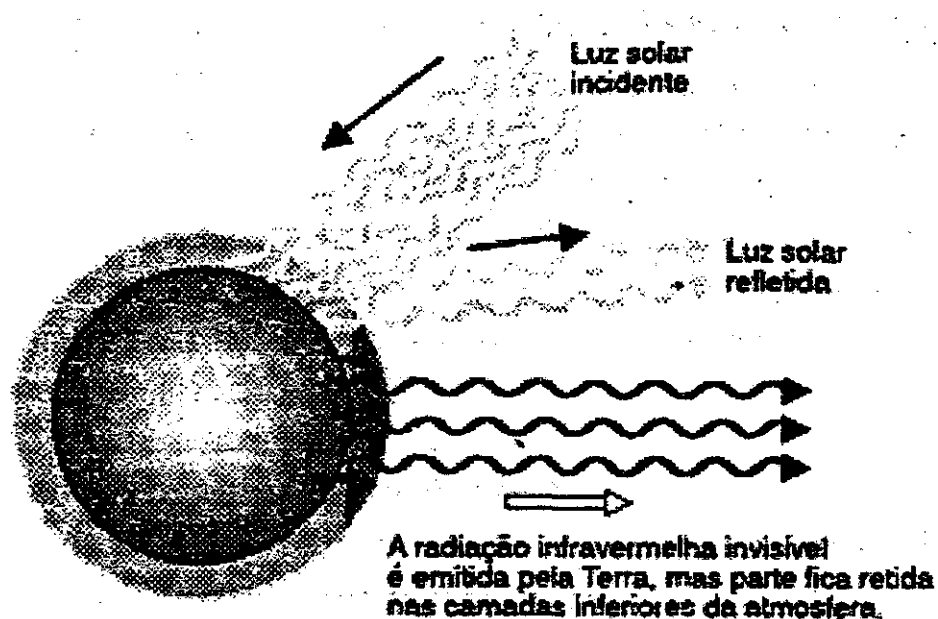


Fig.1 - Como atua o efeito estufa.

É necessário, distinguir entre efeito estufa natural e efeito estufa *acentuado* pela ação do homem (ou antropogênico). O autor usa ora a expressão "efeito estufa", ora a expressão "aquecimento global" para descrever o efeito estufa acentuado.

Todos os que acompanham com regularidade o noticiário internacional conhecem bem os gases-estufa são bem conhecidos. Os gases do efeito estufa estão relacionados na Tabela 1, juntamente com suas fontes comuns, seus índices de aumento na atmosfera e sua atual contribuição para o aquecimento global.

**TABELA 1 - GASES-ESTUFA COMUNS, SUAS ORIGENS, TAXAS DE ACUMULAÇÃO NA ATMOSFERA E SUAS CONTRIBUIÇÕES PARA O AQUECIMENTO GLOBAL NOS ANOS 80.**

GÁS	FONTES PRINCIPAIS	TAXA ANUAL DE CRESCIMENTO	CONTRIBUIÇÃO PARA O AQUECIMENTO GLOBAL (%)
CO <sub>2</sub>	Queima de combustíveis fósseis (73%) e desmatamento (23%)	0,5 %	55%
CFC, HFC, e HCFC	Diversos usos industriais (refrigeração, produtos de espuma solventes)	4%	24%
CH <sub>4</sub>	Arrozais, escapamento de gás e fermentação entérica	0,9%	15%
N <sub>2</sub> O	Queima de biomassa, uso de fertilizantes, e queima de combustíveis fósseis	0,6%	6%

O clima da Terra envolve muito mais do que a atmosfera. O clima é produto de interações complexas da atmosfera, oceanos, calotas glaciais, seres vivos e até mesmo rochas e sedimentos. Quando os pesquisadores falam em "sistema climático" referem-se a todas as

categorias do ambiente natural que interagem na produção do clima. O sistema climático tem cinco componentes básicos: atmosfera, oceanos, criosfera, biosfera e geosfera.

Quando o sistema climático está em equilíbrio, como estava antes da Revolução Industrial e do grande aumento subsequente as emissões de gases-estufa antropogênicos, a radiação solar absorvida encontra-se em equilíbrio perfeito em relação à radiação emitida para o espaço pela Terra e a atmosfera. Qualquer fator que altere esse equilíbrio, e dessa forma mude o clima, é conhecido como um agente de coerção radiativo. Entre esses agentes estão os gases radiativamente ativos, que denominamos gases-estufa, assim como a radiação solar, os aerossóis e o albedo dos objetos terrestres.

O processo físico pelo qual os gases-estufa elevam as temperaturas do ar é conhecido desde o fim do século passado. Todavia, muitos pesquisadores até recentemente viam poucos motivos para se preocuparem com as quantidades de gases-estufa emitidas pelo seres humanos, o que se deve em parte à sabida variabilidade natural do clima nestes últimos milhões de anos. Análises recentes de núcleos de sedimentos intocados do fundo do mar e de gelo antártico confirmaram a antiga noção de que o mundo passou alternadamente de épocas glaciais a períodos interglaciais, em ritmo controlado pelas rotações da Terra em torno do Sol. Os interglaciais anteriores (períodos entre as épocas glaciais) duraram cerca de 10 mil anos e o atual período interglacial já dura quase 10 mil anos, por isso muitos pesquisadores presumiram que a Terra estava em vias de entrar em outra época glacial. Porém, ao que parece, este período interglacial está sendo mais lento, talvez devido às emissões de gases-estufa antropogênicas não curso natural.

Nos anos 80, pesquisadores envolvidos na construção de modelos de futuras mudanças climáticas, com base nos índices de emissão de gases-estufa no presente e no passado recente, chegaram ao consenso de que a Terra marcha para um aumento nas temperaturas médias globais sem precedente na história da humanidade, caso não haja um esforço no sentido de reduzir as emissões de gases-estufa.

Este capítulo constitui uma introdução aos principais resultados a que chegou o relatório dos pesquisadores do PIMC: as incertezas científicas a que estão sujeitas as previsões do aquecimento global; e as retroalimentações existentes no sistema climático. As retroalimentações são essenciais para se avaliar os riscos associados ao aquecimento global. Trata-se de fenômenos físicos que podem ser desencadeados pela atmosfera e pelos oceanos em aquecimento, e que atuam de forma a amenizar o aquecimento (retroalimentações negativas ou de "resfriamento") ou acentuá-lo (retroalimentações positivas ou de "aquecimento").

## **2. A PREVISÃO DA MUDANÇA CLIMÁTICA**

Não chegam a 10 os grandes centros de climatologia que trabalham com modelos do clima futuro, em grande escala, feitos em computador. Esses modelos, denominados Modelos de Circulação Global ou MCG, utilizam enorme capacidade de computação na tentativa de levar em conta os muitos aspectos da natureza que se interrelacionam para produzir o clima futuro.

Atualmente os MCG prevêem uma elevação da temperatura média global de 1,5 a 4,5 °C para que ocorra efetiva duplicação do dióxido de carbono em relação aos seus níveis pré-industriais. "Duplicação efetiva" é a duplicação do efeito estufa total dos níveis pré-industriais de dióxido de carbono, ou seja, um aumento de dióxido de carbono que, somado ao efeito do aumento de outros gases-estufa, equivale à duplicação apenas dos níveis pré-industriais de dióxido de carbono. Se continuarmos a emitir gases-estufa aos índices atuais essa efetiva duplicação acontecerá por volta de 2030.

Em vista da inércia térmica dos oceanos (a lentidão com que se aquecem), os climatólogos distinguem entre aquecimento "efetivo" e aquecimento "de equilíbrio".

O aquecimento efetivo previsto é de 3°C antes do final do próximo século. Aquecimento de equilíbrio é aquele atingido depois de ocorrer o aquecimento adicional estipulado. Hoje, por exemplo, as temperaturas médias mundiais são cerca de 0,3 a 0,6°C mais elevadas do que eram na era pré-industrial, o que se pode ou não atribuir ao aquecimento



de estufa devido à variabilidade inata do clima. O aquecimento estipulado decorrente das emissões de gases-estufa, o aquecimento que nos levaria ao estado de equilíbrio com relação às emissões de gases-estufa entre 1880 e 1989, implicará num dado momento do futuro em uma elevação adicional de 0,5 a 1,5°C. Os pesquisadores do PIMC concluem, com base em seus melhores modelos climáticos, que, se a coerção radiativa aumentar regularmente, a temperatura efetiva em qualquer momento dado é cerca de 60 a 80% da temperatura estipulada. Os pesquisadores não são capazes de dizer se a lenta elevação da temperatura levaria décadas ou séculos até chegar a um equilíbrio, que ocorreria no caso (improvável) de a coerção se manter apenas constante. Para simplificar é melhor referir-se ao aquecimento em termos de temperaturas efetivas.

### **3. MUDANÇAS CLIMÁTICAS: LIÇÕES DO PASSADO**

Para compreender os efeitos das mudanças de temperatura no meio ambiente natural previstas pelo PIMC, é bom ter conhecimento do registro climático do passado geológico. Nos últimos anos, os pesquisadores aprimoraram nossa capacidade de avaliar mudanças climáticas passadas, recorrendo a estudos de núcleos de gelo e sedimentos. No gelo, medições de isótopos de oxigênio e de hidrogênio permitem calcular a temperatura do ar na época em que o gelo se formou. Perfurações na Antártida permitiram um registro contínuo de gelo que remonta a 160 mil anos. Em sedimentos oceânicos e lacustres, conchas de organismos planctônicos minúsculos também fornecem essa informação isotópica. Nesse caso, os isótopos de oxigênio dão uma medida da temperatura da água em que a concha se formou. Usando gelo e sedimentos de diferentes eras, pode-se estabelecer tendências de temperatura. Muitos desses estudos foram concluídos nos últimos anos, o que permitiu aos pesquisadores fazer uma reconstituição de até dezenas de milhões de anos atrás cada vez mais detalhadas do clima e das correntes oceânicas (no caso de estudos de sedimentos oceânicos).

Uma grande vantagem de estudos dos núcleos de gelo é poder medir o teor de dióxido de carbono do ar em diferentes épocas, analisando os glóbulos minúsculos de ar encapsulados em diferentes camadas de gelo. Quando isso foi feito, os pesquisadores viram que o teor de dióxido de carbono do ar acompanha a temperatura bem de perto.

Nos períodos interglaciais este teor é alto, em média cerca de 280 partes por milhão (ppm) e nas épocas glaciais é baixo, em média 210 ppm, caindo para até 180 ppm. A concentração hoje totaliza 353 ppm, nível do qual jamais sequer se chegou desde a presença do homem no planeta. Por que ocorre tal padrão? Nos últimos anos, firmou-se um consenso entre os pesquisadores de que são as mudanças na maneira pela qual a Terra gira ao redor do Sol que fazem o planeta passar de um mundo glacial para um interglacial, e vice-versa. Contudo, tais mudanças nos parâmetros orbitais em si não seriam suficientemente poderosas para explicar a rapidez e a grandeza das alterações detectadas nos núcleos de gelo e sedimentos. As mudanças devem ter sido intensificadas por retroalimentações de diferentes tipos, e entre elas, sem dúvida, os gases-estufa tiveram seu papel.

A Figura 2 ilustra a tendência das temperaturas médias globais na superfície associada à transição glacial/interglacial mais recente, e mostra a elevação da temperatura prevista pelo PIMC em decorrência do efeito estufa causado pelo homem. A parte superior da ilustração é uma generalização das temperaturas médias globais, baseada nos dados totais fornecidos por estudos de núcleos de gelo, microfósseis de conchas e outros indicadores do clima passado, como resíduos fósseis de pólen e outros fragmentos de espécies vegetais que, por analogia com seus descendentes, eram sensíveis à temperatura. No decorrer de alguns poucos milênios ocorreu um aquecimento relativamente rápido, conduzindo o mundo para a moderna fase interglacial, na qual evoluiu a civilização.

No período interglacial atual, as temperaturas médias globais parecem não ter variado muito, seja para mais ou para menos da média global de 15°C. Por vezes, como na "Pequena Época Glacial" dos séculos XVI a XVIII, as temperaturas ficaram em média mais baixas. Em outras ocasiões, como no período medieval, as temperaturas ficaram em média mais altas, possibilitando que os vikings colonizassem a Groenlândia, dando-lhe o nome de "Terra Verde" provavelmente por causa da vegetação local. Parece que a média nunca foi mais alta do que cerca de 1°C em relação à atual, mas houve diferenças notáveis no clima nessas épocas. Por exemplo, em 1816 ( "O ano sem verão" ), embora a temperatura média global tivesse ficado menos de 1°C abaixo da atual, ocorreram geadas

em junho e quebras desastrosas de safras bem ao sul do HN, até a região da Nova Inglaterra.

A velocidade de elevação da temperatura média global prevista pelos pesquisadores do PIMC pode ser observada claramente na Figura 2. Nesta figura presume-se que as emissões de gases-estufa continuem a aumentar como agora, e verifica-se que a "melhor hipótese" de elevação da temperatura é de 1 °C acima da temperatura média de superfície atual até 2030, e cerca de 3°C antes do final do próximo século. Também é mostrado a estimativa mais alta das temperaturas efetivas previstas pelos modelos (mais de 5°C acima da atual em 2100). Esta figura não mostra nenhuma representação da trajetória que a temperatura seguiria se passassem a ser consideradas as retroalimentações positivas que hoje não figuram nos modelos climáticos conforme os pesquisadores do PIMC acham "provável".

Limitando-nos ao próximo século, e concentrando-nos em índices de mudança e não em temperaturas absolutas, é instrutivo comparar eventos ocorridos na transição glacial/interglacial há cerca de 10 mil anos com as previsões baseadas nos MCG referentes ao século XXI e mais além. Tirando a média pós-glacial de 5°C de elevação, a temperatura média global mudou a um índice de cerca de 10 °C a cada 500 anos mais ou menos (embora haja evidências no caso da Groenlândia de que as temperaturas talvez tenham mudado muito mais depressa do que isso por períodos de várias décadas de cada vez). Mesmo na "melhor hipótese" do PIMC, a elevação de temperatura efetiva será de cerca de 3 °C por volta de 2100.

Segundo o Internacional Geosphere Biosphere Program Report n.º.6, Global changes of the past, July 1988; e UK Department of the Environment. Global Climate Change, May 1990, modificados para incluir os resultados dos pesquisadores do PIMC.

A taxa de mudança é de aproximadamente 1 °C a cada 30 anos, mais ou menos, ou de 0,3°C por década. Considerando a faixa de estimativas dos MCG atuais, Stephen Schneider calcula que o ritmo de elevação da temperatura média global será cerca de 10 a

100 vezes mais rápido do que o verificado na transição glacial/interglacial há uns 10 mil anos.

O ponto mais importante evidenciado na Figura 2 e na exposição já feita, com ou sem retroalimentações positivas, se a grande maioria dos climatólogos estiver certa, num mundo sem alterações em que as emissões de gases-estufa permaneçam nos índices atuais, marchamos para índices de elevação de temperatura sem precedente na história da humanidade. O registro geológico nos lança um alerta de quão sem precedente elas são e de quão pressionado o meio ambiente é. Esta conclusão baseia-se apenas no modelo atual de previsões, e não nas amplificações naturais do aquecimento global que os climatólogos do mundo anunciam como "prováveis" caso se permita que as concentrações de gases-estufa continuem se acumulando na atmosfera (como explicado na Seção 5).

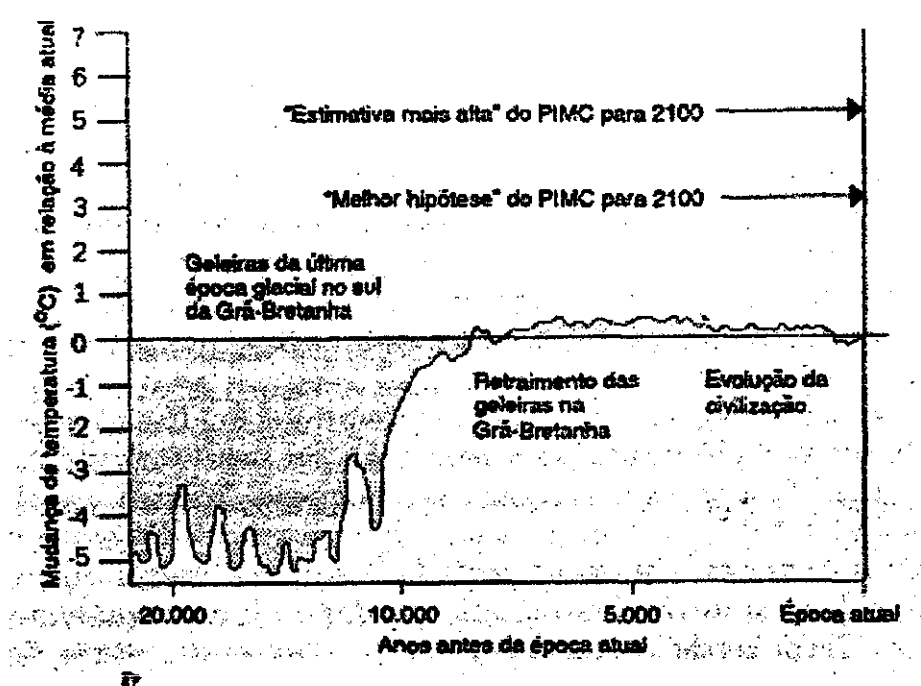


Fig. 2a - Temperaturas médias globais generalizadas durante e imediatamente antes da história da civilização humana. Os últimos 20 mil anos.

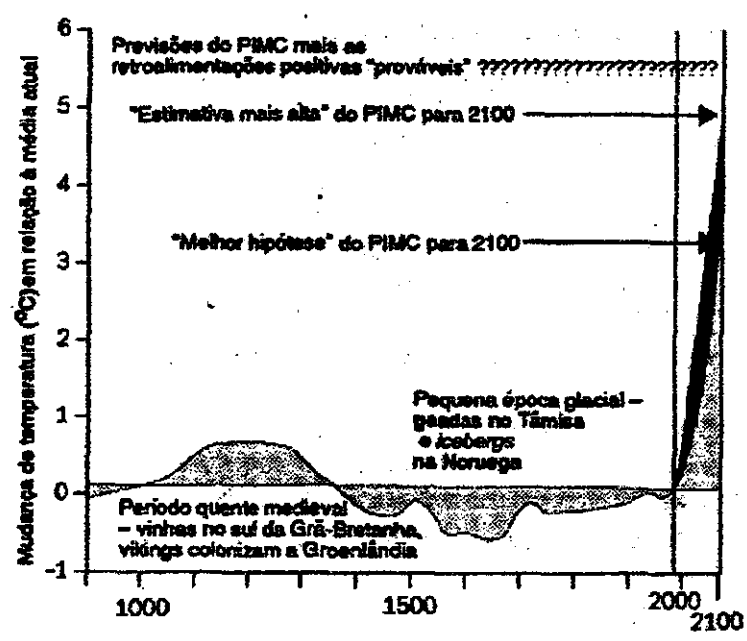


Fig. 2b - Temperaturas médias globais generalizadas durante e imediatamente antes da história da civilização humana. Os últimos mil anos.

As médias representam uma faixa de análises de núcleos de sedimentos e gelo. Observe-se como as temperaturas elevaram-se rapidamente pela última vez há mais ou menos 12 mil anos, quando o mundo emergia da última época glacial. As temperaturas médias globais subiram cerca de 5°C ao longo de vários milênios naquela época. A elevação média de temperatura prevista para além de 1990 pelos pesquisadores do PIMC é muitas vezes mais rápida. Em (2a), a elevação de temperatura se perderia na espessura da linha que forma a margem direita da figura. Em (2b), o pico cinzento é a "melhor hipótese" dos dentistas do PIMC. O pico negro é o extremo superior das estimativas dos modelos do PIMC. Conforme observam os pesquisadores do PIMC, todavia, a possibilidade de retroalimentações positivas—muitas não consideradas nos modelos climáticos —indica que a elevação real da temperatura no próximo século será "provavelmente" ainda mais alta que a prevista.

É importante considerar mais um ponto. O aumento de temperatura decorrente de emissões antropogênicas excessivas de gases-estufa é em princípio ilimitado. Os pesquisadores formulam suas previsões computadorizadas em termos dos próximos 50 anos, no máximo 100, apenas porque nesses casos as incertezas são menos desalentadoras. As temperaturas absolutas na Terra já foram muito mais elevadas. Os geólogos calculam que as temperaturas médias globais eram cerca de 10 a 15°C mais elevadas que hoje na era dos dinossauros, há 100 milhões de anos. Tomando-se por base reconstituições do clima feitas por paleontólogos, esse parece ter sido o máximo de calor que a atmosfera da Terra já experimentou nos 600 milhões de anos da história da vida animal superior. Se os gases-estufa continuarem a ser emitidos nos índices atuais, o aquecimento global resultante acabará por gerar temperaturas que ultrapassarão as experimentadas por qualquer animal que já tenha vivido em nosso planeta.

#### **4. AS PRIMEIRAS MANIFESTAÇÕES DO EFEITO ESTUFA ANTROPOGÊNICO JÁ SÃO EVIDENTES?**

Quando um dos mais renomados pesquisadores da NASA declarou perante o Congresso norte-americano durante a seca de 1988 que "com alto grau de segurança, podemos associar o aquecimento (de cerca de 0,5°C na temperatura média global neste século) com o efeito estufa", desencadeou uma tempestade de críticas. Desde então, outros

pesquisadores concordaram com ele em que manifestações físicas do efeito estufa antropogênico já são evidentes. Richard Houghton e George Woodwell afirmaram: "O calor e a seca que afligiram a América do Norte e outras regiões da Terra nos últimos anos corroboram as previsões de uma tendência de aquecimento global. Há outros indícios de aquecimento acelerado." Citam relatórios de aumento de profundidade do "gelo permanente" na região ártica do Alasca e do Canadá, de aumento na temperatura média de lagos canadenses, de redução na extensão anual máxima da camada de gelo que cobre o mar em torno da Antártida e do Ártico, e de diminuição das geleiras na Europa e em outros lugares. Nos últimos anos, ocorrências climáticas fora do comum, como o furacão Hugo, as inundações na África e na Índia, e os vendavais na Europa deram forças as especulações de que o "sinal" do efeito estufa acentuado "chegará".

Em setembro de 1989, anunciou-se que o gelo do Ártico estava afinando drasticamente. O Scott Polar Institute, do Reino Unido, divulgou um relatório baseado em medidas feitas por sonares a bordo de submarinos nucleares britânicos, revelando que o gelo numa área ao norte da Groenlândia tinha diminuído de espessura de 6,7 m, em média, em 1976 para 4,5m em 1987. Também foi divulgada uma diminuição incomum na camada de gelo de uma base britânica de pesquisa antártica, em consequência de um aumento de 1,1 °C na temperatura atmosférica média entre 1982 e 1986.

Tudo isso ainda pode ser descrito como circunstancial ou até "episódico", em vista da conhecida variabilidade natural do clima. Os pesquisadores do PIMC concluem que a magnitude do aquecimento no século XX é em geral coerente com as previsões dos modelos climáticos, mas também é da mesma grandeza da variabilidade natural do clima. A detecção inequívoca do efeito estufa acentuado a partir de observações só será provável daqui a um década ou mais". Todavia, como ressaltou Wallace Broecker, "o fato de não podermos provar que o aquecimento no último século foi causado por gases-estufa induzidos pelo homem não é o que interessa, e sim que, ao lançarmos na atmosfera gases que absorvem os raios infravermelhos, estamos de fato jogando roleta russa com *nosso* clima".

## 5. O CICLO DO CARBONO

Antes de tratarmos dos métodos de simulação do clima, é preciso considerar a atmosfera no contexto de sua relação com outros componentes do sistema climático. Vários processos naturais regem o modo pelo qual se processa a troca do carbono entre a atmosfera e as principais reservas de carbono do planeta: a biota, o solo e os oceanos. A Figura 3 é uma representação simplificada desses processos. As quantidades de carbono são expressas em bilhões de toneladas (gigatoneladas, ou Gt).

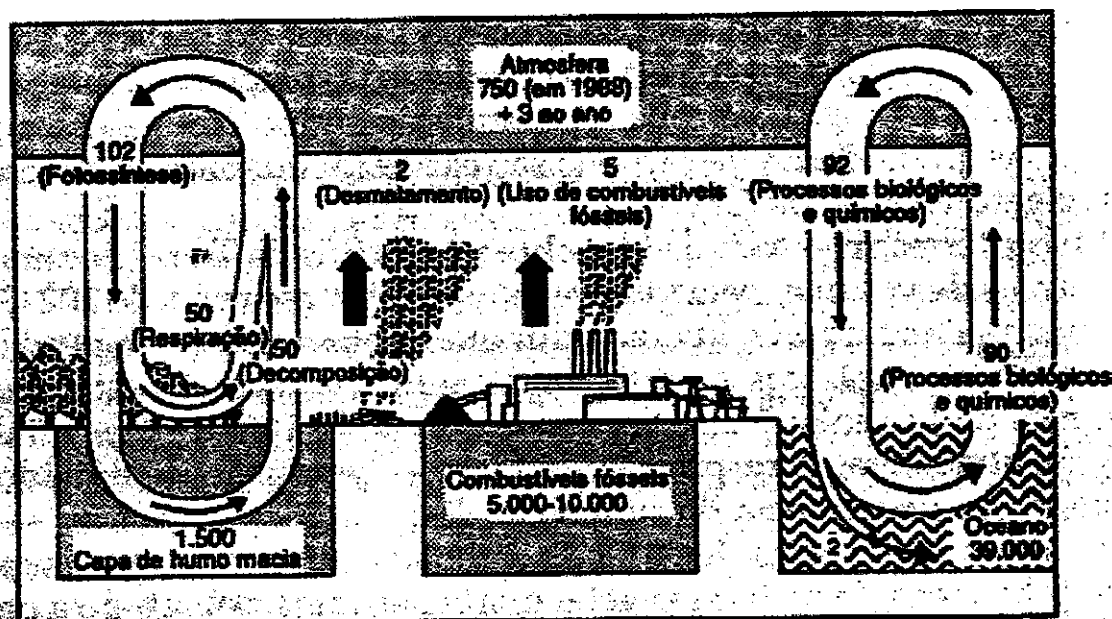


Fig. 3 - Representação generalizada do ciclo do carbono, mostrando os principais W-05 e fluxos. As quantidades de carbono são dadas em Gt (reservatórios) e Gt por ano (fluxos). As estimativas provêm de IPCC, Scientific Assessment of Climate Change, Figura 1.1 e referências.

Fonte : Adptado Schneider (1989).

A biota terrestre, que é composta de toda a vida sobre a superfície da Terra (dominada, em termos de volume, pela vida vegetal), absorve cerca de 102 Gt de carbono por ano do  $\text{CO}_2$  liberado durante a fotossíntese (a produção de moléculas orgânicas a partir do dióxido de carbono e da água na presença da luz solar). Isso representa cerca de 14% do teor total de  $\text{CO}_2$  da atmosfera. A respiração da biota, produção de dióxido de carbono em decorrência da utilização de moléculas orgânicas, devolve anualmente cerca de 50 Gt de



carbono para a atmosfera. A decomposição bacteriana de matéria vegetal morta nos solos, sobretudo a partir do humo, acrescenta aproximadamente mais 50 Gt de carbono ao CO<sub>2</sub> devolvido para a atmosfera. Há, portanto, certo equilíbrio no carbono trocado entre a biota terrestre e a atmosfera, sendo retidas por ano talvez 2 Gt de carbono na biota terrestre.

No âmbito dos oceanos, o CO<sub>2</sub> também é absorvido da atmosfera, em decorrência de processos tanto químicos como biológicos. O dióxido de carbono é recebido em solução sob a forma de íons de bicarbonato, enquanto vegetais monocelulares (fitoplâncton) são sorvedouros de dióxido de carbono em decorrência de sua fotossíntese. Um total de cerca de 92 Gt de carbono por ano é absorvido da atmosfera dessa maneira. Das águas superficiais, perto de 90 Gt de carbono são devolvidas à atmosfera a cada ano. Mais uma vez, isso se deve a processos tanto físicos como biológicos: liberação de dióxido de carbono diretamente das águas marinhas por difusão e em decorrência da respiração do fitoplâncton. O resultado líquido é que cerca de 2 Gt (0,5 para menos ou para mais) ficam retidas anualmente nos oceanos.

Não havendo interferência humana, a contabilidade do carbono da biota terrestre, dos oceanos e da atmosfera estaria equilibrada, ficando a absorção líquida de dióxido de carbono pela biota terrestre e os oceanos mais ou menos equilibrada ao longo do tempo por entradas na atmosfera do dióxido de carbono oriundo da atividade vulcânica. Entretanto, como vimos, a influência dos seres humanos sobre o ciclo do carbono vem aumentando desde o advento da sociedade industrial.

Os combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás, são constituídos de carbono oriundo da vida preexistente. O carvão é composto basicamente de restos vegetais compactados. O petróleo provém principalmente da maturação térmica (mudança química decorrente do soterramento) de matéria orgânica, sobretudo de sedimentos marinhos resultantes principalmente de fitoplânctons antigos. O gás provém basicamente da maturação térmica de matéria orgânica, numa grande variedade de sedimentos provenientes sobretudo de restos vegetais. Todo esse carbono, não considerando a parte

proveniente da mineração ou da queima por parte dos seres humanos, efetivamente é excluído do ciclo natural do carbono. Mas o homem vem queimando combustíveis fósseis a um ritmo que hoje lança mais 5,7 Gt (0,5 para menos ou para mais) de carbono na atmosfera ao ano. A essas concentrações ainda devem ser acrescentadas as aproximadamente 2 Gt de carbono provenientes da queima e derrubada de florestas. Portanto, quando essas são acrescentadas nas 2 Gt captadas nos oceanos e nas de 2 Gt retidas na biota terrestre, ocorre um aumento líquido de cerca de 3 Gt de carbono na atmosfera ao ano. Esse aumento líquido de CO<sub>2</sub> na atmosfera como fração da contribuição antropogênica total é chamado de fração aérea.

Até que ponto a aritmética do ciclo do carbono mudou desde que teve início a queima de combustíveis fósseis e desde os anos 50, quando começou o desmatamento sistemático nos trópicos? A Tabela 2 sintetiza os dados estatísticos mais importantes. Sabe-se, a partir de dados fornecidos pelos núcleos de gelo, que cerca de 280 ppm de dióxido de carbono é a quantidade encontrada numa atmosfera estável nos períodos interglaciais, ou seja, cerca de 575 Gt de carbono. Para fins de comparação, isso representa mais ou menos a mesma quantidade de carbono presente em todos os vegetais vivos.

O teor atual de dióxido de carbono na atmosfera, medido diretamente em lugares como o Havai, é de 353 ppm (Figura 4), o que equivale a 750 Gt de carbono. Em outras palavras, desde 1860 os seres humano lançaram cerca de 175 Gt de carbono na atmosfera. Em grande parte isso ocorreu claramente depois da II Guerra Mundial. A Figura 5 ilustra um dos principais motivos desse fato: a queima de combustíveis fósseis. Desde a II Guerra Mundial verificou-se um crescimento na demanda de combustíveis fósseis em média superior a 5% ao ano.

**TABELA 2 - ALGUMAS QUANTIDADES DE CARBONO NO SISTEMA CLIMÁTICO EM BILHÕES DE TONELADAS (GT DE CARBONO).**

CO <sub>2</sub> na atmosfera, atualmente	750
CO <sub>2</sub> na atmosfera pré-industrial	575
Liberação anual atual da queima de combustíveis fósseis	+ de 5
Liberação anual atual de desmatamento	± 2
Quantidade de carbono na fitomassa (todos os vegetais)	560
Carbono no carvão e petróleo recuperáveis	4000
Carbono em combustíveis fósseis potencialmente recuperáveis	5.000 -10.000

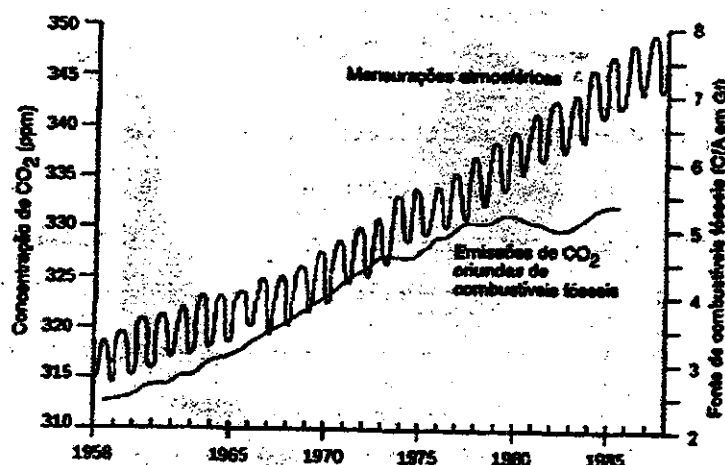


Fig. 4 - Concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> medidas em Mauna Loa, Havai, desde 1958.  
Fonte: Lashof e Tirpak (1989).

Aumentaram mais ou menos linearmente. Observe na Figura 4, como as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas de combustíveis fósseis aumentaram mais lentamente após a alta do preço do petróleo no começo dos anos 70, apesar de a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera continuar sua alta acentuada. Isso pode-se dever a uma escalada do desmatamento nos trópicos, ou a uma liberação de dióxido de carbono por solos aquecidos pela remoção da cobertura florestal, ou, possivelmente, a uma diminuição da capacidade dos oceanos para absorver

CO<sub>2</sub> da atmosfera, ou a uma combinação de fatores. Observe-se ainda a expressão anual nos dados de mudanças sazonais na fotossíntese e na respiração.

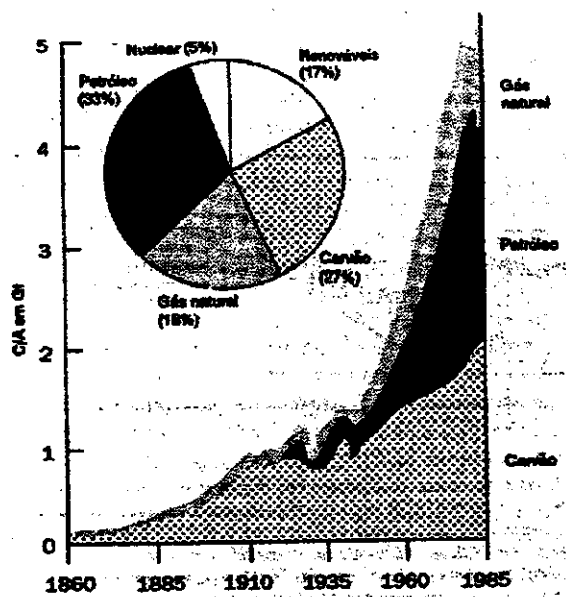


Fig. 5 - Aumento de consumo de combustíveis fósseis desde a Revolução Industrial.

Até onde vai a capacidade humana de desequilibrar o ciclo do carbono? Se continuarmos a aumentar o ritmo ao qual queimamos combustíveis fósseis, após cerca de 200 anos, a contar do início dessa queima sistemática no começo da era industrial, o homem poderá ter lançado mais carbono na atmosfera do que já existe atualmente na massa total de seres vivos do planeta (pois, em termos de carbono, todos os animais vivos representam apenas uma pequena fração da massa de carbono dos vegetais vivos). Não acaba aí nossa capacidade de influir no ciclo do carbono. As reservas de combustíveis fósseis contêm de 5.000 a 10.000 Gt de carbono. As reservas comprovadas de carvão e petróleo contêm 4.000 Gt de carbono, sendo que 730 delas encontram-se apenas na China. Nada impede que o homem as explore, e de fato os planos energéticos atuais de quase todos os países prevêem um aumento da queima. A China, por exemplo, pretende queimar carvão suficiente para lançar 3 Gt de carbono na atmosfera até 2025, que representa mais da metade do total global atual.

Presumindo a mesma relação fração aérea/carbono retido na biota e nos oceanos, a queima de todas as 4.000 Gt de reservas conhecidas de carbono e petróleo aumentaria o

teor de CO<sub>2</sub> da atmosfera em quase 2.000 Gt de carbono, ou seja, mais do triplo do existente na atmosfera atual. É impossível dizer em quanto exatamente isso elevaria as temperaturas da superfície da Terra, em vista das incertezas quanto as reações climáticas que encontra-se resumida na próxima seção deste capítulo. Como já se observou, as temperaturas na época dos dinossauros (no período Cretáceo, entre 140 e 66 milhões de anos atrás) eram até 10-15°C mais elevadas do que hoje. Segundo os geoquímicos calcularam, isso implicou um teor de CO<sub>2</sub> na atmosfera quatro a oito vezes maior do que o atual.

As reservas de combustíveis fósseis são o único meio de desestabilizar o ciclo do carbono? A resposta é não. É aí que entram as retroalimentações para o sistema climático.

## **6. RETROALIMENTAÇÕES E INCERTEZA NA PREVISÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Já foi realizada referência às muitas interações da física com a química e a dinâmica da atmosfera, bem como da biosfera com o restante do sistema climático. "Nenhum modelo atual leva em conta essas interações", escreveu um grupo norte-americano de construtores de modelos climáticos na edição de maio de 1989 de *Physics Today*, "e estamos provavelmente a décadas de criar um que o faça. Nesse ínterim, enfrentamos a tarefa nada invejável de julgar a gravidade do efeito antropogênico partindo de uma compreensão muito limitada do sistema climático. A questão, todavia, não é: 'O problema é sério?' mas, 'A que níveis de concentração os gases vestigiais irão deflagrar uma mudança climática sem precedente?' "Essa é uma maneira bem direta de expressar as preocupações perceptíveis em muitas das declarações feitas pelos pesquisadores do PIMC em seu relatório. "A complexidade do sistema indica que não há como descartar surpresas", escreveram eles no *Executive*, querendo referir-se às retroalimentações do sistema climático. Concluíram que "embora muitos desses processos de retroalimentação sejam pouco conhecidos, parece provável que, de modo geral, venham a atuar antes no sentido de aumentar do que de diminuir as concentrações de gases-estufa num mundo mais aquecido". Outra referência às incertezas por trás das previsões do tipo "melhor

hipótese" para a mudança climática do próximo século é a seguinte: "como as fontes e os meios de dissipação naturais dos gases-estufa são sensíveis a mudanças no clima, talvez modifiquem substancialmente as concentrações futuras. Por isso, a mudança climática deve ser maior do que as estimativas que fizemos."

Esse é um aspecto crucial do debate sobre as incertezas científicas acerca do aquecimento global. No restante deste capítulo, resumo sucintamente cada uma das retroalimentações descritas pelos pesquisadores do PIMC em seu relatório.

### 6.1 VAPOR D'ÁGUA

Uma atmosfera mais quente conterá mais vapor d'água, em decorrência de índices mais altos de evaporação. O vapor d'água, em si é um potente gás-estufa. Essa, portanto, é uma retroalimentação positiva, que foi recentemente comprovado mediante mensurações por satélite como parte do Earth Radiation Budget Experiment (ERBE). Com isto mostrou-se que no mundo de hoje a quantidade de radiação infravermelha retida na atmosfera aumenta significativamente com a temperatura da superfície do mar. Os formuladores de modelos simularam essa retroalimentação em MCG, e os dados empíricos obtidos por Raval e Ramanathan mostraram-se consistentes com a magnitude da retroalimentação prevista pelos MCG antes de se ter os dados do ERBE.

### 6.2 GELO E NEVE

Num mundo em aquecimento, o gelo e a neve que se acumulam nas montanhas e partes das regiões polares derreterão. Isso significa que, com uma cobertura de gelo menos brilhante do que a atual, a superfície do mundo em aquecimento será capaz de reemitir menos radiação solar para o espaço. A superfície "mais escura" absorve mais radiação: uma retroalimentação positiva. Os construtores de modelos climáticos consideraram isso em seus MCG. Embora esse seja um processo bem conhecido na modelagem climática, os pesquisadores do PIMC afirmam que a situação real "provavelmente é mais complexa" e que "há necessidade de diagnosticar mais a fundo a natureza interativa do mecanismo de retroalimentação".

### 6.3 NUVENS

As nuvens ocupam apenas cerca de um décimo do volume da troposfera, e do volume das nuvens apenas um milionésimo é ocupado por água condensada. Todavia, mudanças na camada de nuvens e suas conseqüências radiativas provavelmente constituem a maior incerteza na previsão da magnitude do aquecimento global. As nuvens, mediante alterações em características como quantidade, altitude e teor de água, podem atuar como retroalimentações tanto positivas como negativas para o aquecimento global. O Earth Radiation Budget Experiment revela que, no mundo atual, o efeito geral das nuvens é resfriar a Terra, mas essa situação não se manterá necessariamente num mundo em aquecimento. Por exemplo, se mais nuvens se formarem a altitudes maiores (e mais frias) do que agora, como prevêem alguns MCG, emitirão menos radiação e, portanto, atuarão como uma retroalimentação positiva para o efeito estufa. Incertezas semelhantes envolvem a previsão do sinal das retroalimentações produzidas por alterações na quantidade de nuvens e/ou em seu teor de água.

Os formuladores de modelos tentam simular essas retroalimentações das nuvens nos MCG. O fato das previsões dos modelos subirem ou caírem dentro da faixa de temperaturas de duplicação deve-se em grande parte a pequenas variações nas parametrizações das nuvens. Por exemplo, uma recente rodada do modelo do Instituto Britânico de Meteorologia apresentou como resultado a queda da temperatura prevista de duplicação de cerca de 5,5 para 1,9 °C, em decorrência de variações no modo de representar ("parametrizar") as nuvens nos modelos. Porém "apesar de o esquema de nuvens ser mais detalhado, não é necessariamente mais acurado que o esquema menos sofisticado". Embora essa previsão de temperatura média global após a duplicação do dióxido de carbono realizada através de MCG aponte para uma baixa, outras apontam para uma alta.

### 6.4 QUÍMICA TROPOSFÉRICA

A química da troposfera envolve uma rede complexa de retroalimentações químicas, mas as que mais preocupam são as reações que afetam o radical de hidroxila (OH). A

hidroxila é o "agente de limpeza" da atmosfera. É um depurador químico que oxida gases tão diferentes como o metano, o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, os hidrocarbonetos não-metano (NMHC), os HCFC e os HFC. Uma Terra mais quente terá umidade absoluta mais elevada e, por conseguinte, permitirá que se forme mais OH na atmosfera. Ao mesmo tempo, porém, haverá uma forte drenagem de hidroxila, em decorrência das crescentes emissões (num cenário sem alterações) dos gases que ela oxida. Que fator predominará? Os pesquisadores divergem de opinião, e os formuladores de modelos climáticos nem tentam o cálculo em seus modelos. Hameed e Cess, por exemplo, sustentam que o resultado será uma pequena retroalimentação negativa. Por sua vez Ramanathan et al. e Lashof acreditam numa retroalimentação positiva.

As incertezas nesse caso são imensas, e os riscos muito altos. A quantidade natural de hidroxila na atmosfera é mínima, e uma atmosfera em que a hidroxila tenha sido gravemente exaurida é uma atmosfera na qual estará aumentando a duração de gases-estufa cruciais, como por exemplo o metano, HCFC e HFC, e portanto o potencial de aquecimento global. Esta é uma atmosfera em que também o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio e os NMHC podem aumentar livremente, pois haverá menos OH disponível para oxidá-los. Esses gases, mediante reações químicas na presença da luz solar, provocam a produção de mais outro gás-estufa, ozônio troposférico.

## 6.5 AEROSSÓIS

As emissões de enxofre produzidas pelo homem, que aumentaram no Hemisfério Norte durante o último século em decorrência da queima de combustíveis fósseis, formam aerossóis que influem sobre as propriedades radiativas das nuvens de maneira a resfriar a Terra. Por conseguinte, é uma coerção negativa produzida pelo homem. Embora seja difícil ter certeza da magnitude da coerção, é de se supor que seja comparável à coerção do efeito estufa verificada até agora neste século (embora de "sinal" oposto). Em outras palavras, se não fossem as emissões de enxofre, a elevação observada na temperatura global neste século, de 0,3 a 0,6°C, poderia ter sido duas vezes maior.



No futuro os aerossóis podem propiciar retroalimentações naturais. Isso porque o fitoplâncton (algas microscópicas das águas oceânicas superficiais) geram dimetilsulfeto (DMS), gás que leva a formação de núcleos de condensação das nuvens. Concentrações maiores de fitoplâncton talvez gerem mais DMS, e portanto mais nuvens. Mas não há indicações nem do sinal nem da magnitude da retroalimentação de que se possa esperar num mundo em aquecimento.

A coerção negativa do clima decorrente das emissões de enxofre produzidas pelo homem não deveria ser considerada uma contribuição potencial à redução do aquecimento global, mas parte do problema. Isso porque as emissões de dióxido de enxofre que engendram os núcleos de condensação de nuvens que suscitam a retroalimentação também favorecem a acidificação na atmosfera. Dada a importância da biota terrestre, como área de dissipação do dióxido de carbono, os danos causados aos ecossistemas florestais pela acidificação põem de fato em perigo uma importante reserva natural no ciclo do carbono, de tal forma a poder aumentar o teor de dióxido de carbono na atmosfera por sua ausência.

## 6.6 TEMPERATURA OCEÂNICA

O fluxo total de dióxido de carbono entre a atmosfera e as águas superficiais dos oceanos é influenciado pelas diferenças na pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na superfície do mar. A medida que se eleva a temperatura da água do mar, diminui a solubilidade do  $\text{CO}_2$  e aumenta a pressão parcial do  $\text{CO}_2$  nas águas superficiais dos oceanos. Isso tem o efeito de diminuir a absorção total de  $\text{CO}_2$  pelos oceanos, ou seja, trata-se de uma retroalimentação positiva. Estima-se comumente que, das emissões antropogênicas totais de  $\text{CO}_2$  no mundo atual, cerca de um quarto parece ficar retido na biota terrestre (pela fotossíntese) e um quarto parece ser absorvido pelo oceano, tanto por processos químicos (difusão) como por processos biológicos (fotossíntese do fitoplâncton). Portanto, um importante meio de dissipação do principal gás-estufa se esgotará à medida que as temperaturas da superfície do mar se elevem.

De quanto será o aumento futuro de  $\text{CO}_2$  na atmosfera? Lashof calcula um aumento de 5%, porém as incertezas são grandes. O Conselho Britânico de Pesquisas do Meio

Ambiente Natural destinou recursos consideráveis à pesquisa desse problema, e também dos efeitos da temperatura sobre a produtividade biológica nos oceanos, como parte do seu Estudo Biogeoquímico do Fluxo Oceânico (BOFS). São grandes os riscos associados a essas incertezas: os oceanos são imensos reservatórios de  $\text{CO}_2$ , contêm 50 vezes mais  $\text{CO}_2$  do que a atmosfera e 20 vezes mais do que a biosfera e, como disse Taro Takahashi: "a característica exclusiva dos oceanos é que uma vasta massa de água profunda altamente supersaturada de  $\text{CO}_2$ , ou seja, incapaz de absorver mais  $\text{CO}_2$  do que já contém, é recoberta por uma fina camada de água quente e menos densa que impede a transferência rápida de dióxido de carbono do reservatório de água profunda para a atmosfera".

## 6.7 CIRCULAÇÃO OCEÂNICA

Além da temperatura e da capacidade imediata do  $\text{CO}_2$  dissolver-se na água do mar, dois outros fatores importantes regem a capacidade do oceano de reter  $\text{CO}_2$ . O primeiro é a existência de uma "bomba biológica", mediante a qual o  $\text{CO}_2$  é transportado das águas superficiais para as águas mais profundas, numa precipitação de detritos orgânicos, como microorganismos mortos, matéria fecal, etc. O segundo é o ritmo e o padrão da circulação das águas oceânicas.

A circulação das massas hídricas nos oceanos é complexa, sendo influenciada pelo sistema climático. Por isso, sempre que o clima muda, o provável é que a circulação oceânica acompanhe essa mudança. À medida que se elevam as temperaturas na superfície do mar, a termoclina (camada do oceano imediatamente abaixo da camada superficial permanentemente misturada) pode tornar-se mais estável e resistente à mistura vertical das águas. A absorção de  $\text{CO}_2$  depende dessa mistura: a produtividade do fitoplâncton é limitada pelo suprimento de águas profundas ricas em nutrientes. Segundo os pesquisadores do PIMC o efeito líquido é a absorção de  $\text{CO}_2$  antropogênico ser provavelmente desacelerada. Essa retroalimentação potencial é conhecida popularmente como o "multiplicador de plâncton".

Tais mudanças são difíceis, quase impossíveis, de ser quantificadas em estudos de modelagem, mas o registro geológico alerta que elas podem ser abruptas e marcantes. Estudos do ar encapsulado nos núcleos de gelo da Groenlândia revelam que, durante a transição da última época glacial para o atual período interglacial, há mais de 10 mil anos, mudanças muito significativas na concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera, da ordem de 50 ppmv ou 20% do teor total de CO<sub>2</sub> do ar, parecem ter ocorrido no espaço de menos de um século, paralelamente a mudanças de temperatura regionais da ordem de 50 °C. Os pesquisadores do PIMC e outros sustentam que elas provavelmente foram provocadas por mudanças de correntes de grande escala na região do Atlântico Norte.

#### 6.8 PADRÕES EÓLICOS E TAXAS DE TROCA DE GASES OCEÂNICOS

A magnitude da transferência de gases entre a superfície dos mares e a atmosfera, ou vice-versa, depende da turbulência na camada superficial do oceano e, portanto, da velocidade do vento acima dela. Num mundo em aquecimento, mudança nos padrões climáticos implica mudança nos padrões eólicos. Quanto maior a velocidade do vento, maior a velocidade de transferência de dióxido de carbono. Os pesquisadores do PIMC acreditam que a mistura vertical é mais importante do que a troca de gases, para determinar a absorção líquida de dióxido de carbono dos oceanos do mundo, e concluem que essa retroalimentação é provavelmente de pouca importância."

#### 6.9 MODIFICAÇÃO DO CICLO BIOGEOQUÍMICO OCEÂNICO

Os pesquisadores do PIMC expressam o temor de que o atual equilíbrio da "bomba biológica" dos oceanos possa ser abalado num oceano em aquecimento. Hoje, a precipitação de detritos orgânicos (nutrientes) provinda das águas superficiais é contrabalançada pela subida de carbono e nutrientes dissolvidos em áreas de águas ressurgentes. Tais áreas abrangem as regiões polares e outras ao longo das costas orientais das grandes bacias oceânicas. Segundo o Relatório do Grupo de Trabalho 1 do PIMC, "o equilíbrio poderia ser quebrado por variações na dinâmica dos oceanos a ponto de influenciar o dióxido de carbono da atmosfera". Contudo, "ainda não é possível prever a direção e a magnitude desses efeitos".

## 6.10 FERTILIZAÇÃO POR DIÓXIDO DE CARBONO

Um aspecto bem conhecido e muito citado do aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera é o fato de que experimentos de curto prazo, sob condições controladas em estufas, promovem taxas mais altas de fotossíntese e de crescimento na maioria dos vegetais. Caso isso se aplicasse aos ecossistemas naturais, à medida que os níveis de CO<sub>2</sub> se elevassem na atmosfera do futuro, o resultado seria uma retroalimentação negativa significativa para o aquecimento global. As florestas seriam especialmente importantes se aumentassem sua biomassa, pois cerca de dois terços de toda a fotossíntese são processados pelas florestas. Porém o mundo real difere de uma estufa. Lashof calcula que a duplicação do dióxido de carbono provocaria um aumento de mais de 15% na biomassa global, enquanto os pesquisadores do PIMC concluem que não está claro se os aumentos na fotossíntese e no crescimento persistirão por mais que alguns poucos períodos vegetativos, nem se eles chegarão a ocorrer em ecossistemas naturais, nem até que ponto resultarão num maior acúmulo de carbono nos ecossistemas terrestres".

Essas incertezas tornar-se-ão ainda mais preocupantes se o estudo recente de Takahashi, Tans et al. estiver correto. Como vimos, há uma acumulação líquida mensurada na atmosfera atual de cerca de 3 Gt de carbono oriunda de todo o CO<sub>2</sub> (combustíveis fósseis e desmatamento). A queima de combustíveis fósseis provoca a emissão de 5,7 (0,5 para mais ou menos) Gt de carbono. Takahashi et al. calculam que 2 a 3 Gt de carbono ao ano podem estar sendo retidas na biota do Hemisfério Norte. Em outras palavras, se estissem corretos, uma proporção considerável das emissões totais de dióxido de carbono oriundas da queima de combustíveis fósseis e do desmatamento estaria hoje sendo absorvida pelas florestas do Hemisfério Norte. Takahashi calcula que apenas cerca de 1,6 Gt de carbono ao ano chega aos reservatórios oceânicos. Essas florestas talvez já venham reagindo à fertilização com o carbono oriundo de emissões de dióxido de carbono desde a Revolução Industrial. O bem-estar futuro das florestas é, portanto, ainda mais crucial. Em vista da acidificação cada vez maior do mundo moderno, das pressões adicionais exercidas por outros poluentes do ar, e das mudanças imprevisíveis no solo e na água relacionadas com o aquecimento global, esse bem-estar futuro das florestas não é nada garantido.

## 6.11 EUTROFICAÇÃO E TOXIFICAÇÃO

O emprego de fertilizantes azotados na agricultura provoca a emissão do gás-estufa óxido nitroso, mas também contribui para uma retroalimentação negativa ao efeito estufa. Os nitratos oriundos do emprego de fertilizantes nos solos chegam até rios, lagos e mares, onde promovem a eutroficação, estagnação da água em decorrência do crescimento desordenado das algas. Por motivos ambientalistas, há muita preocupação quanto a esse problema, e inúmeros fenômenos fora do comum ligados a algas em lagos e mares estão sob os cuidados de pesquisadores. A eutroficação nos oceanos e na terra poderia estar gerando uma quantidade adicional de biomassa de até 1 Gt de carbono por ano.

Algumas áreas vêm propondo a título experimental, que se proceda a estimulação artificial do fitoplâncton em alto-mar, fornecendo os nutrientes que faltam a fim de promover a fotossíntese de modo a aumentar artificialmente a dissipação oceânica do dióxido de carbono. Mas esse "macete" técnico poria em risco a gênese das espécies de florações de algas tóxicas vistas em quantidades extraordinárias no mar do Norte, por exemplo, nos últimos anos.

## 6.12 TEMPERATURA E RESPIRAÇÃO DA VEGETAÇÃO TERRESTRE

A medida que a temperatura se eleva, também aumentam as taxas de fotossíntese e de respiração de plantas e micróbios. Mas a respiração aumenta em ritmo mais rápido que o da fotossíntese. Isso representará uma importante retroalimentação positiva num mundo em aquecimento, pois hoje os processos estão quase em equilíbrio. Estima-se que a fotossíntese forneça anualmente cerca de 102 Gt de carbono à biota terrestre, enquanto a biota respira cerca de 50 Gt e a decomposição de matéria orgânica nos solos responde por cerca de 50 Gt. Já houve quem estimasse que o fluxo adicional de carbono para a atmosfera poderia ser grande, dada essa retroalimentação. Woodwell o avaliou entre 3 a 10 Gt de carbono anuais, tendo em vista uma temperatura de duplicação de 4 °C. Lashof critica tal estimativa por esta não distinguir os componentes lábeis (de fácil decomposição) dos refratários (resistentes à decomposição) de carbono no solo, mas

mesmo assim obteve um fluxo de 0,5 Gt de carbono ao ano, quase 10% do fluxo anual proveniente da queima de combustíveis fósseis.

### 6.13 UMIDADE DO SOLO

Mudanças no teor de água do solo afetam evidente mente a fixação e o acúmulo de carbono pela biota terrestre. Uma umidade maior aumentar o acúmulo de carbono na turfa e estimularia o crescimento vegetal em áreas anteriormente secas. Contudo, o contrário também é verdadeiro, e como os MCG diferem bastante em suas previsões de variações na umidade do solo, os pesquisadores do PIMC concluem que "é impossível prever com segurança a distribuição geográfica das mudanças na umidade do solo, e o efeito líquido dessas mudanças nos fluxos e no acúmulo de carbono nos diferentes ecossistemas".

### 6.14 DISTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO

A saúde das florestas, áreas vitais de dissipação do dióxido de carbono, dependerá em grande parte da taxa de alteração da temperatura. Se elas puderem migrar e adaptar-se, talvez não haja nenhuma mudança líquida na área de dissipação. Se as taxas forem muito aceleradas para uma migração bem-sucedida, e/ou se barreiras urbanas cultivadas se revelarem insuperáveis, as florestas irão sofrer e a área líquida de dissipação diminuirá. O Relatório do PIMC nada diz a esse respeito, mas Brian Huntley e outros autores sustentam, com base na maneira pela qual a vegetação reagiu a uma elevação de temperatura de 5 °C no fim da época glacial, que as florestas sofrerão mesmo nas taxas de mudança da "melhor hipótese". Pesquisadores também afirmam que o aquecimento global provocará taxas mais altas de perturbações nas florestas (incêndios, tempestades e inundações costeiras), capazes de alterar significativamente a biomassa total e a reação (no tocante à composição) das florestas ao aquecimento, reduzindo assim a área de dissipação do carbono.

## 6.15 ALBEDO

Mudanças na biota terrestre também afetarão o albedo total do planeta. Pesquisadores acham que essa será "provavelmente a retroalimentação mais significativa produzida pela biosfera terrestre". O processo mais importante é a diminuição do albedo, uma retroalimentação positiva, em decorrência de um deslocamento, na direção dos pólos, dos limites entre a tundra e a floresta boreal. Tal mudança talvez tenha acentuado consideravelmente a mudança de temperatura no fim da última época glacial.

## 6.16 EFEITOS SOBRE O FITOPLÂNCTON

O aumento de intensidade da radiação UV-B na superfície da Terra é uma das conseqüências do esgotamento do ozônio da estratosfera. Segundo os pesquisadores "isso poderia ter efeitos negativos sobre a biota marinha, devido a uma diminuição na produtividade marinha, e, portanto, sobre a bomba biológica de carbono", o que aumentaria as concentrações de dióxido de carbono nas águas superficiais e, por conseguinte, na atmosfera. Outros estudos chamaram a atenção para esse problema, que não só é uma retroalimentação positiva, mas também uma ameaça potencialmente grave à segurança alimentar do mundo.

## 6.17 EFEITOS SOBRE A BIOTA TERRESTRE

Os mesmos comentários se aplicam à crescente exposição da biota terrestre à radiação UV-B. Estudos empíricos revelam que muitas culturas são afetadas negativamente por essa exposição. Os pesquisadores PIMC concluíam que o problema talvez afete a influência que a área de dissipação biosférica do dióxido de carbono exerce sobre a Terra. Cabe ressaltar que o Protocolo de Montreal, que visa limitar os CFCs e os gases halógenos, principais responsáveis pelo esgotamento do ozônio na estratosfera, não amenizará de modo significativo esse problema nas próximas décadas, em vista da permanência prolongada na atmosfera dos principais causadores da depressão do ozônio, e do fato do Protocolo, permitir a produção por mais 10 anos dessas substâncias e de seus "substitutos" (os HCFC), que também destroem o ozônio da estratosfera.

## 6.18 FONTES TROPICAIS DE METANO

### 6.18.1 ARROZAIAS

Os arrozais produzem cerca de 110 milhões de toneladas de metano por ano, aproximadamente 20% das emissões antropogênicas totais de metano. O metano tem um potencial de aquecimento global de 63 num período de 20 anos, ou seja, 1 kg de metano nesse período produzirá 63 vezes o aquecimento global de 1 kg de dióxido de carbono. Como a produção de metano dos arrozais depende em grande parte da temperatura e da umidade do solo, pois aumentos geram fluxos maiores. Os pesquisadores do PIMC nada dizem acerca de se os fluxos líquidos aumentam ou diminuem num mundo em aquecimento de 1 °C, mas Lashof calcula, com base nos dados disponíveis, que as emissões de metano dos arrozais aumentarão em mais de 30 milhões de toneladas por ano.

### 6.18.2 PÂNTANOS

Os pântanos do mundo emitem cerca de 115 milhões de toneladas de metano por ano. Os pesquisadores do PIMC acatam as estimativas recentes que invertem a importância relativa das fontes tropicais e de latitudes altas: estas mencionam 55 milhões de toneladas dos pântanos tropicais e 39 milhões de toneladas dos pântanos de latitudes altas. Não esclarecem como as mudanças na umidade do solo podem influenciar a retroalimentação oriunda dos pântanos tropicais. Segundo a análise de Lashof, os pântanos de latitudes baixas não representam tanto uma retroalimentação potencial para as emissões de metano quanto os arrozais, pois tendem a ter pouco.

### 6.18.3 METANO NO GELO PERMANENTE

Nas tundras planas, o nível do lençol de água é crucial para o controle da gênese do metano no solo. Uma variação de apenas alguns centímetros pode ser significativa, pois os solos alagados podem produzir 100 vezes mais metano do que os solos secos. Solos mais quentes e ranis úmidos, portanto, conduziriam ao aumento das emissões de metano; enquanto solos mais quentes e mais secos podem produzir menos emissões de metano. Lashof pondera que é de se esperar que a quantidade de emissões aumente nas latitudes



altas em razão do derretimento da tundra, pois a "estação das emissões" será mais longa no caso de solos que se mantêm congelados por menos tempo a cada ano. Nisbett, numa análise abrangente da produção de metano de fontes setentrionais, também sustenta com convicção que é positiva a retroalimentação dos pântanos.

#### 6.18.4 MATÉRIA ORGÂNICA NO GELO PERMANENTE

Outro fator dinâmico que favorece a retroalimentação positiva do metano em latitudes altas é a existência de abundantes matérias orgânicas congeladas que podem se decompor no gelo permanente. Nessas latitudes, como observam os pesquisadores do PIMC, "as emissões de metano são consideravelmente maiores em temperaturas mais altas, em decorrência da acelerada decomposição microbiológica da matéria orgânica". Deve-se ter em mente que mesmo as temperaturas de duplicação previstas pelos MCG implicarão elevações de até 15°C na temperatura do ar do Ártico. Se qualquer uma das outras retroalimentações positivas consideradas nesta obra começar a atuar, sem retroalimentações negativas compensadoras, a elevação da temperatura será ainda maior.

#### 6.18.5 HIDRATOS DE METANO NO GELO PERMANENTE

Os hidratos de metano, sólidos semelhantes ao gelo constituídos de uma rede de cristais de água e de gás metano retidos sob pressão no seu interior, encontram-se sob o gelo permanente e nos mares litorâneos do Ártico. O reservatório de metano nos hidratos é imenso e muito mal quantificado. No extremo inferior da faixa de estimativas publicadas, um valor citado com frequência é mais ou menos 10.000 Gt, dos quais 400 Gt podem estar sob o gelo permanente. Segundo estimativas, esse reservatório é, em si, mais do que uma ordem de grandeza maior que todo o carbono contido no dióxido de carbono atmosférico (750 Gt) e em toda a vida na Terra (cerca de 760 Gt). Mas as estimativas publicadas do tamanho do reservatório global de hidratos de metano variam para mais, a partir de 10.000 Gt, em até três ordens de grandeza.

Os poucos pesquisadores que estudaram essa retroalimentação potencialmente enorme para o efeito estufa divergem de opinião. Como a superfície da camada de hidrato está mais de 100 metros abaixo da superfície do gelo permanente, é provável que não ocorra

nenhuma liberação significativa por muitas décadas, porque a onda de temperatura vinda da superfície aquecida do Ártico só penetraria no solo lentamente. Keith Kvenvolden tem uma posição otimista: calcula que em um século o fluxo de metano oriundo da decomposição do hidrato não excederia a 100 milhões de toneladas ao ano. Contudo, se continuar as emissões de gases-estufa de fontes antropogênicas e/ou de fontes naturais, desencadeadas por retroalimentações positivas num prazo mais longo não haverá limite teórico para a desestabilização desses depósitos. Gordon MacDonald e Ewan Nisbett sustentam que a desestabilização em larga escala dos hidratos de metano dominaram o mecanismo que pôs fim às épocas glaciais. Nisbett supondo um cenário sem alterações no que tange às emissões de gases-estufa afirma que no futuro mundo em aquecimento "o risco de um descontrole térmico provocado pela liberação de metano do gelo permanente é mínimo, mas real e mesmo que haja apenas 1% de chance de ocorrerem tais eventos as consequências sociais são profundas". Seu temor está na possibilidade de a elevação da temperatura na superfície não atingir os hidratos por condução simples e lenta, mas por meio de um processo mais rápido de transferência convectiva de calor para o solo via fraturas, o que provocaria episódios de jorros de metano. Essas erupções de metano já se verificaram nas águas litorâneas do Ártico soviético.

#### 6.18.6 HIDRATOS DE METANO NAS ÁGUAS LITORÂNEAS

Os hidratos ocorrem no mundo inteiro em águas situadas entre 200 e 500 metros de profundidade, e como a pressão da água ajuda a manter a água dos hidratos em sua fase cristalina, estes se localizam mais perto da superfície do sedimento do que o fazem abaixo do gelo permanente. No oceano frio do Ártico e nessas profundidades o hidrato é estável no fundo do mar ou próximo dele. Como observa Nisbett, "qualquer pequeno aquecimento das águas no Ártico liberará hidrato do fundo do mar quase que imediatamente. Uma mudança de temperatura de uns poucos graus liberará metano do sedimento da camada superior do fundo do mar nessa profundidade em poucos anos".

Desconhece-se a quantidade de hidrato em risco devido a essa desestabilização. Embora represente apenas uma pequena fração do reservatório total mundial de hidratos de

metano, ainda assim é, sem dúvida, uma enorme quantidade. Também não se sabe até que ponto as águas do Ártico que se encontram nas profundidades perigosas se aquecerão. As incertezas nesse ponto são enormes, e os riscos provavelmente maiores do que em qualquer outra retroalimentação potencial.

## **7. OS EFEITOS DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES-ESTUFA**

Estudos de diversos cenários de misturas e quantidades de emissões de gás estufa na atmosfera nas próximas décadas estão sendo realizadas. Duas importantes conclusões se impõem. A primeira tem a ver com o fato de as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>, óxido nítrico e CFC se ajustarem muito lentamente com as mudanças nas emissões, em vista de sua permanência relativamente longa na atmosfera. Por causa desse ajuste lento nas concentrações atmosféricas, a continuação da emissão desses gases mesmo em níveis próximos dos atuais submeterá a atmosfera a concentrações crescentes por décadas ou séculos, com tudo o que isso implica em coerção radiativa elevada e conseqüente aquecimento global. Os pesquisadores do PIMC assinalam que temos como corolário: "quanto mais tempo as emissões continuarem a aumentar (às taxas atuais), tanto maiores as reduções terão de ser a fim de estabilizar (as concentrações) num dado nível. No caso de níveis críticos de concentração, que não devam ser excedidos, quanto mais cedo forem feitas as reduções das emissões tanto mais eficazes serão. Num estudo recente conduzido pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA foi calculado o que seria preciso para estabilizar as concentrações de gases-estufa de longa duração nos níveis atmosféricos atuais. A conclusão, no caso do CO<sub>2</sub>, é uma redução imediata de mais de 60% .

## **8. MATERIAL COMPLEMENTAR**

O Ministério da Ciência e Tecnologia apresenta na internet "O Brasil e a Convenção Quadro das Nações Unidas Sobre Mudanças Climáticas" e o programa de mudanças climáticas nacional, bem como o painel intergovernamental sobre mudanças climáticas, cujo o endereço é: <http://www.mct.gov.br/ciencia/Default.htm>

Em anexo são apresentados algumas figuras representativas de dados e episódios associados a mudanças climáticas e ao efeito estufa , bem como algumas ações antropogênicas que afetam o ecossistemas amazônicos.

São indicados os seguintes textos como complemento do estudo sobre mudanças climáticas:

Global Warming. NASA Facts, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NF-222, Agosto de 1998.

Tropical Deforestation. NASA Facts, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, FS-1998-11-120-GSFC, Novembro de 1998.

Volcanoes and Global Climate Change. NASA Facts, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, NF-220, Agosto de 1998.

## **9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Global Changes of The Past, Julho de 1988.

IPCC-89. Scientific Assessment of Climate Change, Dec. de1989.

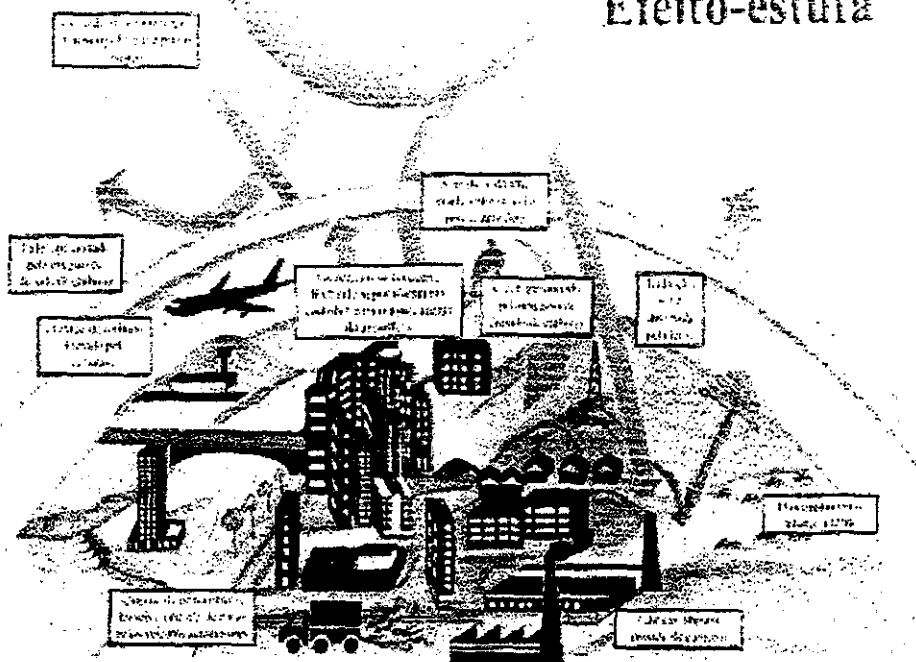
Legget, J. A natureza da ameaça do efeito estufa. Aquecimento Global. O Relatório de Greenpeace. Editora da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, RJ, 1992.  
pp.1-40

Lashof, D. A.& Tirpak, D.A., orgs. Policy options for stabilizing global climate. Us Enviromental Protection Agency, 1989.

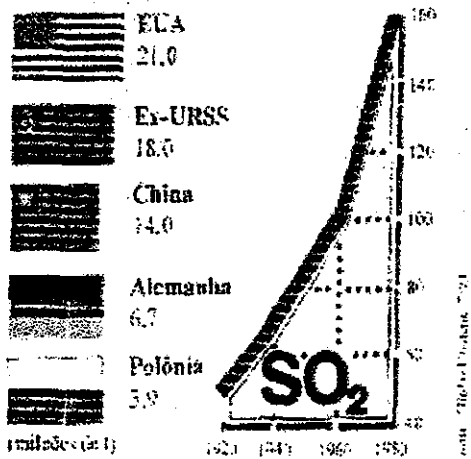
Schneider S. Scientific American, Dec. 1989.

## **APENDICE I – FIGURAS RELACIONADAS COM O TEMA**

# Efeito-estufa

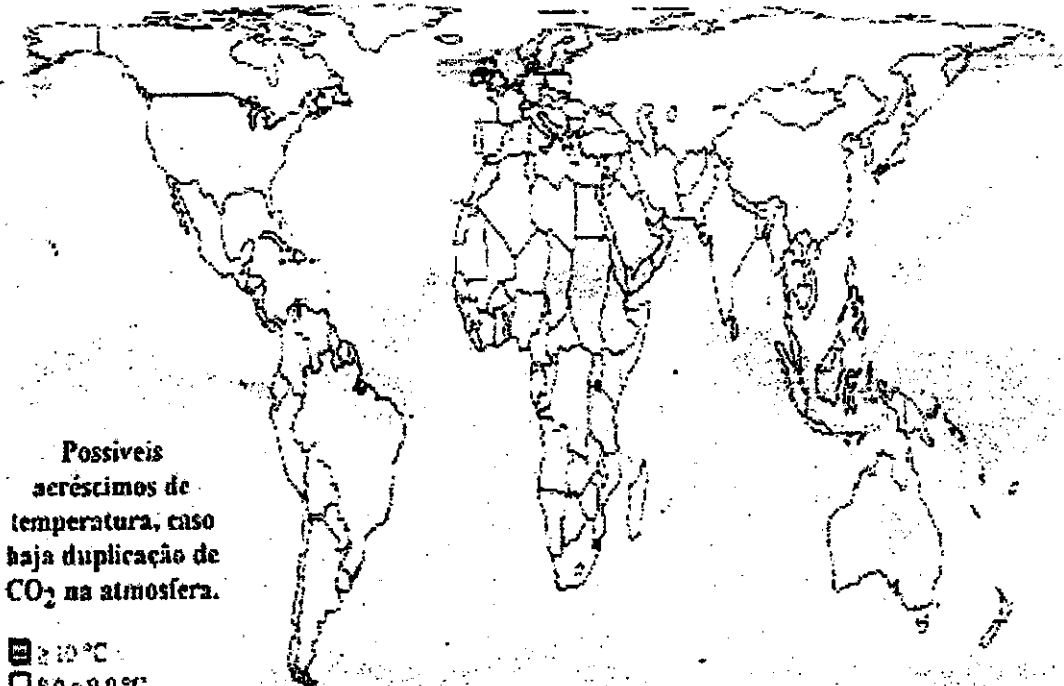


## Os maiores emissores de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)



## Emissão de gases poluidores que aquecem a atmosfera

Sector	Gás Carbônico	CFCl <sub>4</sub>	Metano	Óxido de Nitrogênio	Outros	TOTAL
Energia	31%	-	4%	4%	0%	39%
Transporte	10%	-	4%	-	-	14%
Industria	2%	-	4%	2%	-	8%
Participação no efeito estufa	50%	2%	16%	6%	8%	100%



Possíveis  
acréscimos de  
temperatura, caso  
haja duplicação de  
CO<sub>2</sub> na atmosfera.

- ≥ 10 °C
- 8,0 a 9,9 °C
- 6,0 a 7,9 °C
- 4,0 a 5,9 °C
- 2,0 a 3,9 °C
- abaixo de 2 °C

**Frota mundial de  
veículos**

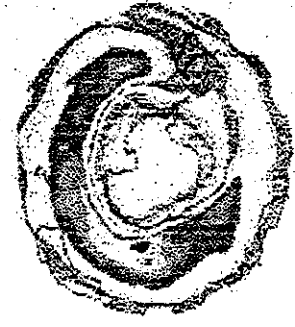
*(F = frota - P = população)*

	<b>EUA</b> F = 137,1 P = 248,8
	<b>Japão</b> F = 58,9 P = 123,1
	<b>Alemanha</b> F = 36,3 P = 78,7
	<b>França</b> F = 28,1 P = 56,2
	<b>Itália</b> F = 25,3 P = 57,5

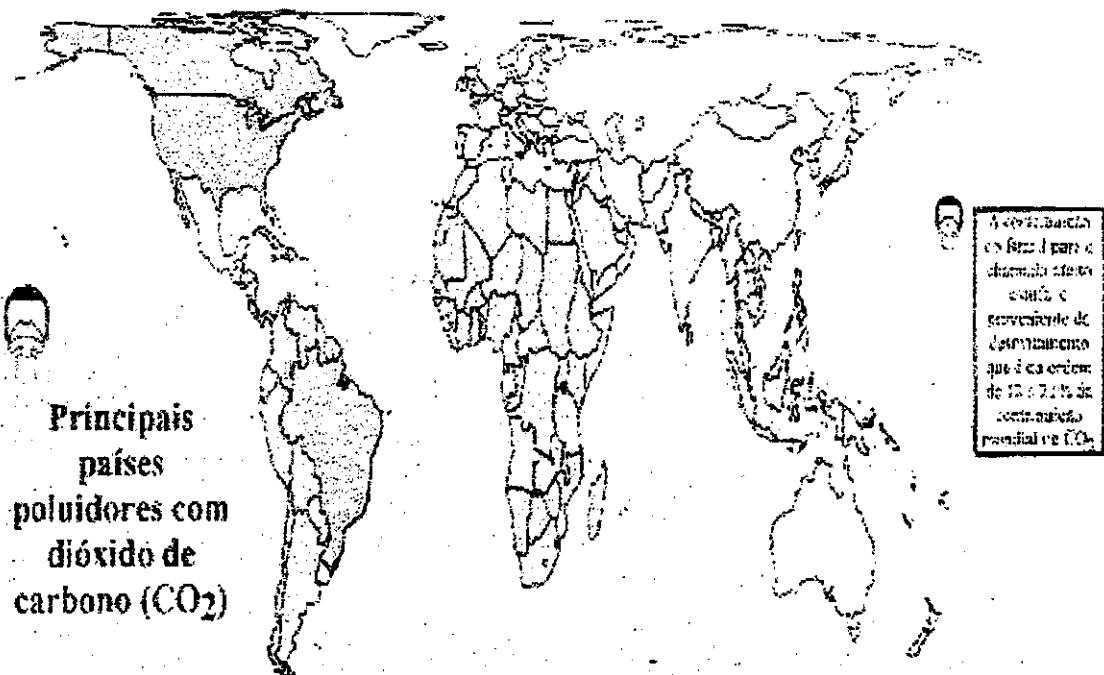
**Emissão de  
dióxido de azoto  
(NO<sub>2</sub>)**

	<b>USA</b> 29,3
	<b>Ex-URSS</b> 6,5
	<b>Alemanha</b> 3,7
	<b>Grã-Bretanha</b> 2,7
	<b>Canadá</b> 1,9

**Buraco na camada de ozônio no  
Círculo Polar Sul, em 06 de  
outubro de 1993**



Em outubro de 1993, foi estabelecido um novo  
recorde do buraco de ozônio no Círculo Polar Sul. As  
cores azul, vermelho e branco indicam os níveis  
baixos, enquanto as cores azul-clara, laranja,  
amarelo, verde e verde-escuro demonstram valores  
normais.

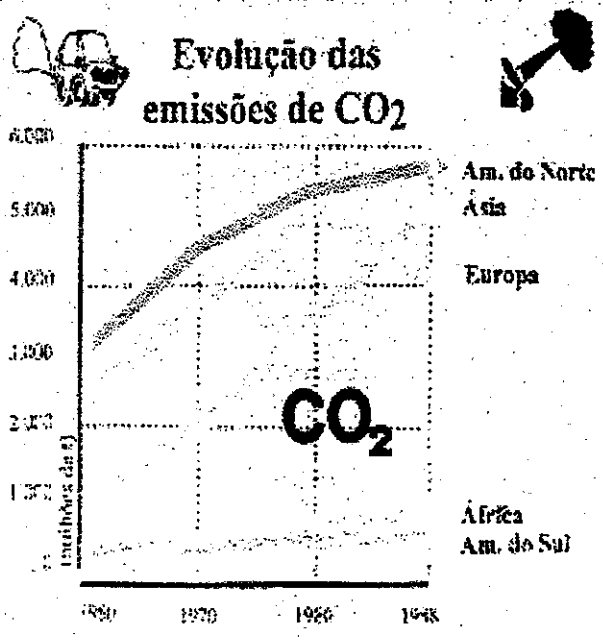


**Principais países poluidores com dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

em bilhões de toneladas

País	Comb. fóssil	Desmatamento	Total por hab.
EUA	5.422,7		21,8
Canadá	496,5		18,9
Colômbia	56,7	420,0	15,6
Alemanha	1.032,9		12,1
Ex-URSS	3.734,2		12,9
Polónia	433,5		11,3
Grã-Bretanha	606,9		10,5
Japão	1.855,2		8,6
Brasil	196,5	259,9	7,6
Itália	429,8		7,5
França	406,0		7,2
Indonésia	1.547	876,7	6,1

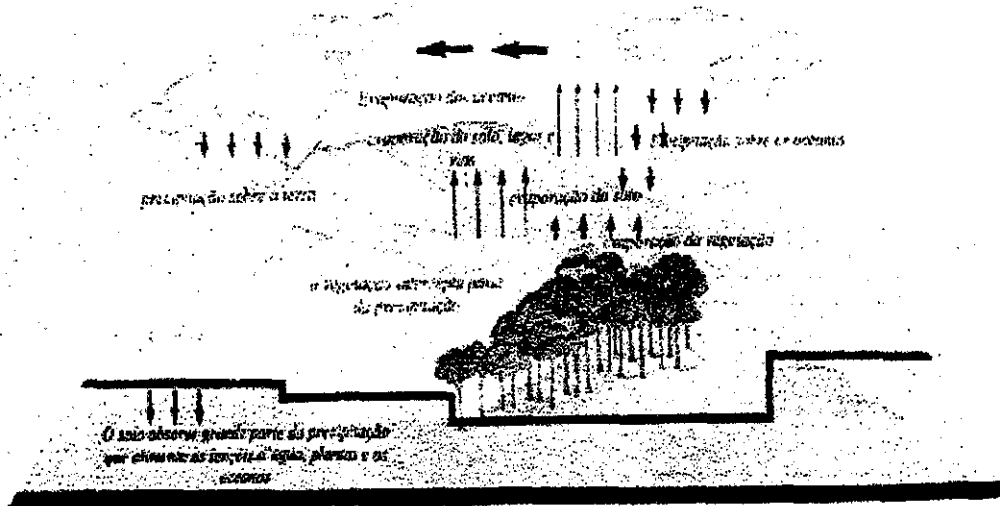
Fonte: Global Warming, 1992



Fonte: Global Warming, 1992



# Ciclo da água



A medida que crescem as populações, a sustentabilidade do uso humano de água depende fundamentalmente da adaptação das pessoas ao ciclo da água. As sociedades humanas precisam desenvolver a habilidade - conscientização, conhecimento, procedimentos e instituições - para administrar seu uso da terra, além também da água, em uma forma integrada e sustentável de modo a manter a qualidade do suprimento de água para as pessoas e para os ecossistemas que as sustentam.

Fonte: Conselho de Planos Nacionais

## Desperdício de Água

Categoria	Mélio Urbano (litros)	Mélio Mensal (m³)
●	2.058	62,34
●●	4.112	124,68
●●●●●	10.280	311,70
●●●●●●●●	10.280	311,70

Fonte: Plano de Energia

## Consumo de água no Brasil

Abastecimento urbano: 238,4 bilhões de litros

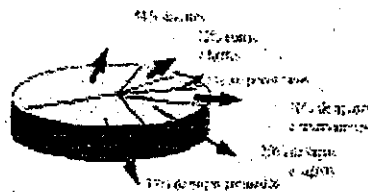
Irrigação: 9,42 bilhões de litros

## O uso da água

Abastecimento: 255,1

Irrigação: 680,3

Indústria: 215,9



Fonte: IBGE

Municípios abastecidos por tipo de manancial

### Volume de água doce dos rios por continente

Continentes	km <sup>3</sup> água
Europa	76
Ásia	533
África	181
Am. do Norte	215
Am. do Sul	945
Oceania	24

### Uso da água no mundo

Continentes	Irrigação	Doméstico e industrial
década de 80		
Europa	95	10
Ásia	980	51
África	85	7
Am. do Norte	215	20
Am. do Sul	55	14
Oceania/Austrália	13	1,2
Ex-URSS	180	5



### Água doce no mundo

Total de água no mundo:

97% são os oceanos e 3% de água doce

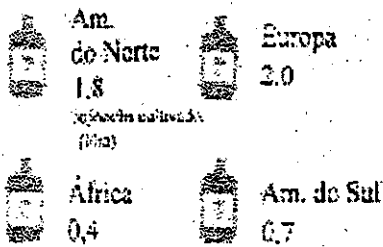
### Disputa internacional de água

País	Países	Águas
Egito	Egito	Canal de Suez
	Síria	Canal de Suez e Canal de Suez
Turquia	Grécia	Canal de Suez
	Irã	Canal de Suez
	Armênia	Canal de Suez
EUA	Canadá	Canal de Suez
	México	Canal de Suez
	Brasil	Canal de Suez

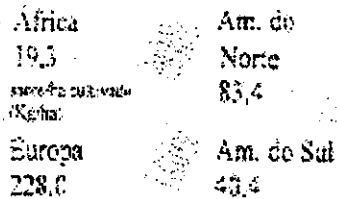
9% da água doce está acessível na superfície

Água doce	97%
Água salgada	3%
Água doce disponível na superfície	0,3%
Água doce disponível no subsolo	0,7%
Água doce disponível em reservatórios	0,03%

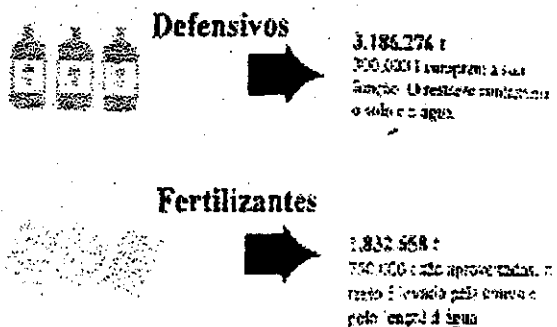
### Contaminação da água por fertilizantes/inseticidas



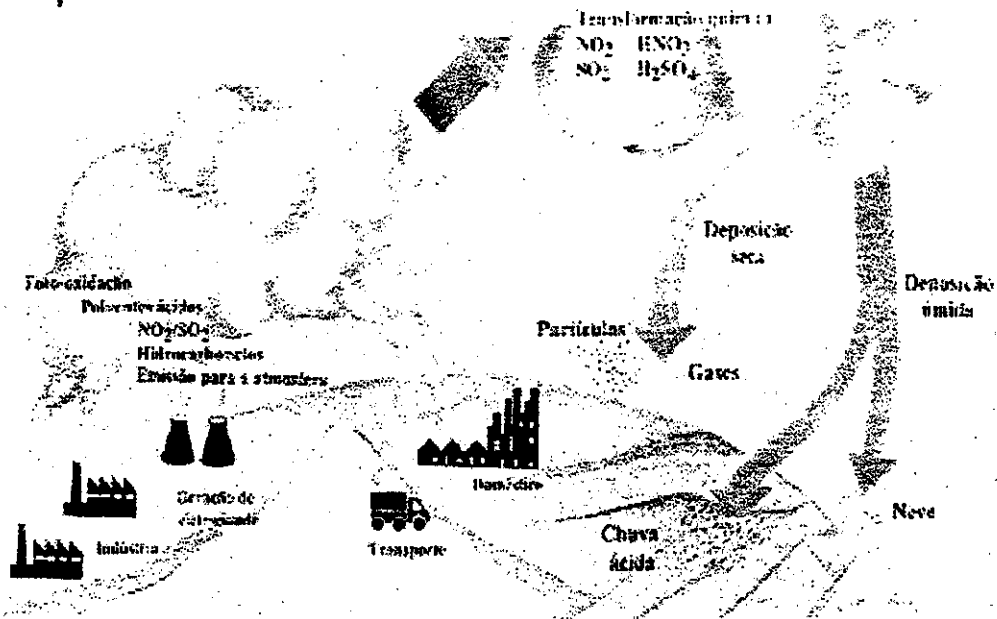
### Inseticidas Fertilizantes



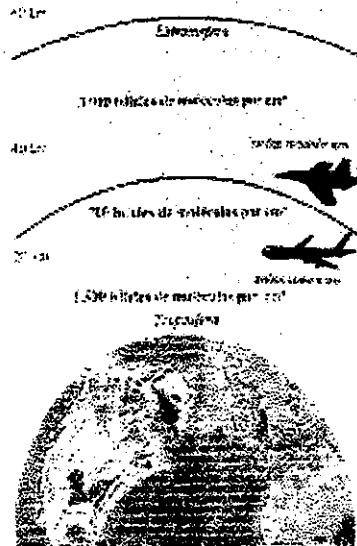
### Uso de fertilizantes e defensivos agrícolas no Brasil - 1991



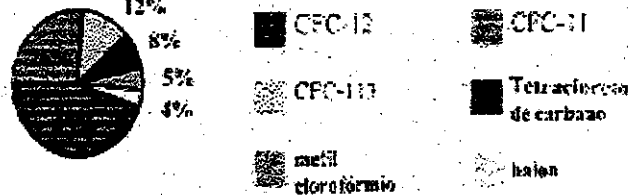
# Formação da chuva ácida



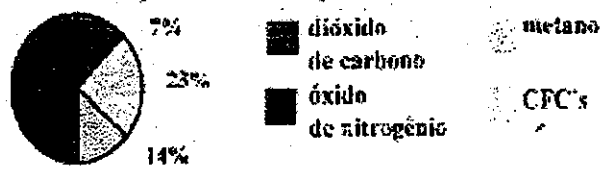
## Concentração de ozônio na atmosfera



## Principais responsáveis pelo buraco na camada de ozônio



## Contribuição dos gases para o aquecimento do planeta








### Efeitos sobre a terra

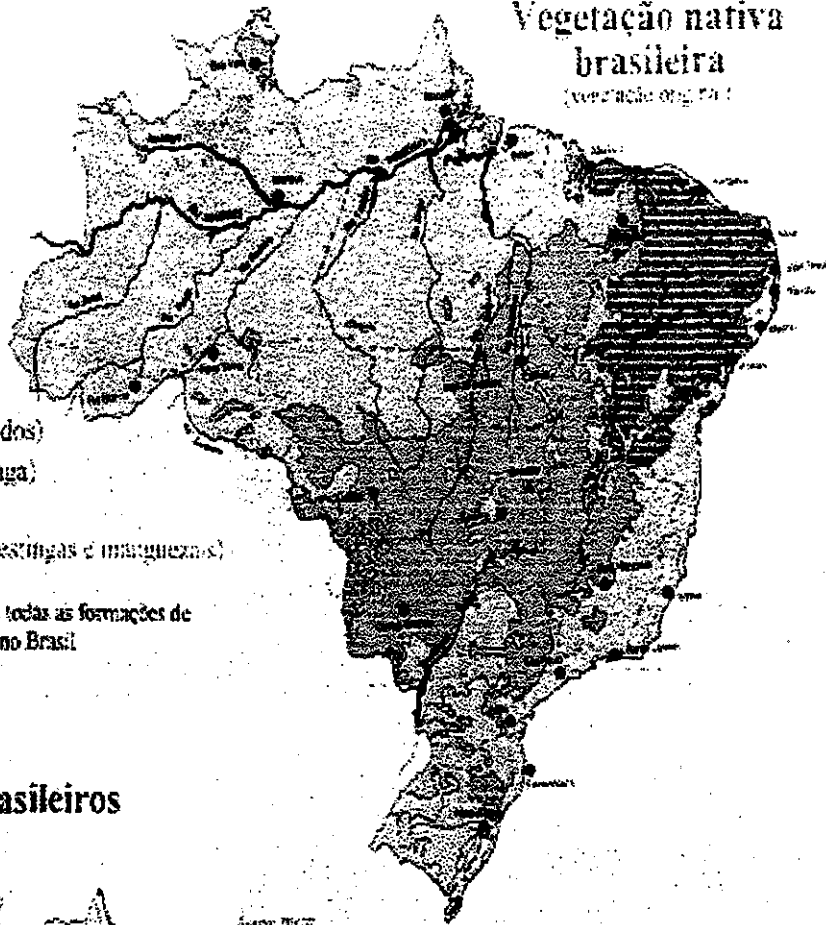
- alteração de precipitação das chuvas e na umidade dos solos
- alteração nos processos biológicos de diversos habitats
- aumento do nível dos oceanos devido ao derretimento das calotas polares do planeta

## Vegetação nativa brasileira

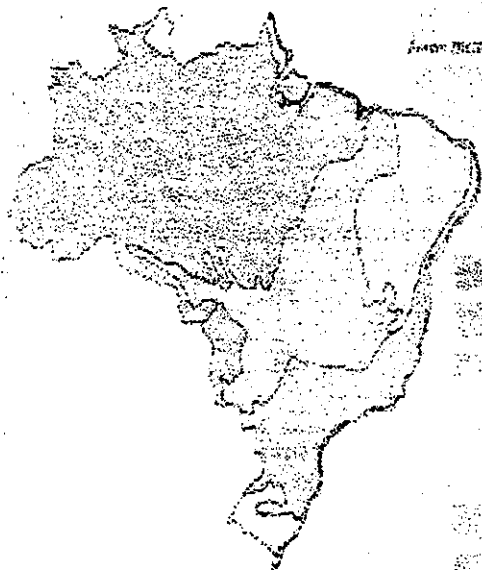
(vegetação original)








-  Florestas\*
-  Savanas (cerrados)
-  Estepes (caatinga)
-  Campos
-  Manguezais (restingas e manguezais)

\* Foram adicionadas todas as formações de florestas conhecidas no Brasil



## Biomás brasileiros



-  Floresta Amazônica
-  Mata Atlântica
-  Cerrados
-  Caatinga
-  Campos
-  Pantanal
-  Restingas e Manguezais

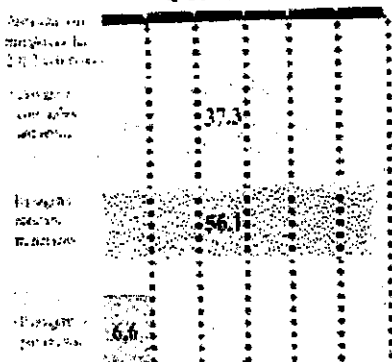
O Brasil apresenta uma superfície com extensão de 8,511.976,3 km<sup>2</sup>. Abrazando diversos regimes climatológicos distintos, possui grande diversidade ecológica que a torna o maior país de reservas biológicas do mundo. A Amazônia deserta, através de um processo de sucessão ecológica, apresenta uma diversidade biológica que a torna o maior país de reservas biológicas do mundo.

A Amazônia deserta, através de um processo de sucessão ecológica, apresenta uma diversidade biológica que a torna o maior país de reservas biológicas do mundo.

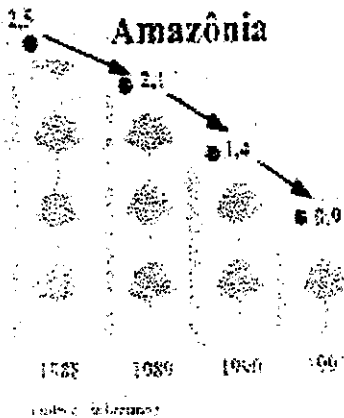
A Amazônia deserta, através de um processo de sucessão ecológica, apresenta uma diversidade biológica que a torna o maior país de reservas biológicas do mundo.

A vegetação brasileira é considerada uma das mais ricas do mundo. Entretanto, a destruição das florestas brasileiras é um problema sério. Em 1960, a vegetação brasileira ocupava 70% do território nacional. Hoje, apenas 30% da área original permanece intacta. A destruição das florestas brasileiras é causada principalmente pela expansão da agricultura, da pecuária e da exploração madeireira. A destruição das florestas brasileiras é um problema sério porque elas são importantes para a manutenção do equilíbrio ecológico do planeta. Elas produzem oxigênio, regulam o clima e são fonte de medicamentos e alimentos. Além disso, elas são importantes para a preservação da biodiversidade e para a manutenção dos ciclos da água e do solo.

### Ocupação dos Cerrados



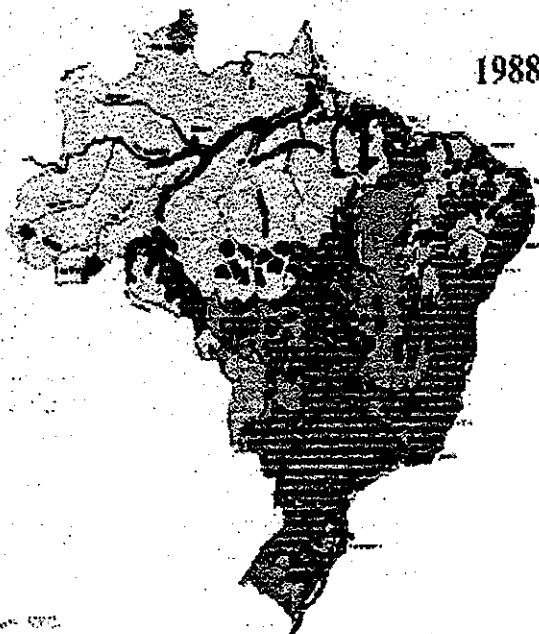
### Desmatamento na Amazônia

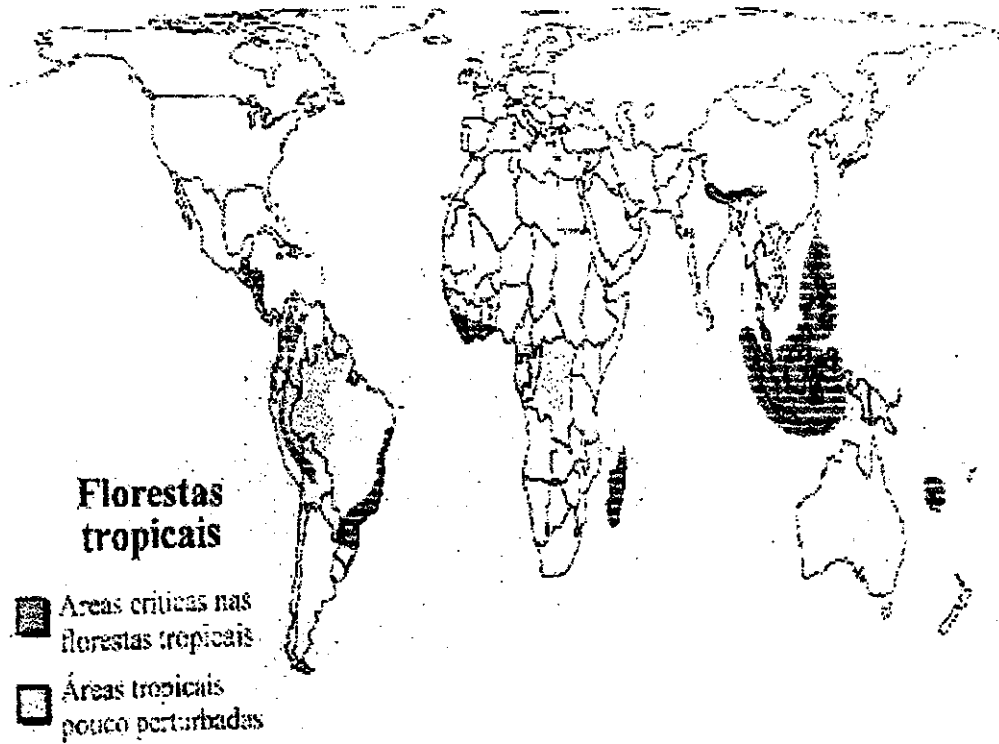


### Evolução da vegetação nativa brasileira



- Área arquipélago
- Floresta
- Caatinga
- Áreas pioneiras
- Campos
- Cerrados
- Pantanal





Data: dezembro 1990.

**Desmatamento anual na América do Sul\***  
(% anual sobre florestas)

País	%
1. Paraguai	4,0
2. Equador	2,6
3. Venezuela	0,9
4. Colômbia	0,6
5. Brasil	0,4
6. Peru	0,4
7. Argentina	0,2
8. Bolívia	0,1

\* Estimativa 1991.

**Produção industrial de madeira em tora - 1985 - 1987 - (1.000 m³)**

10 principais países

País	Produção (1.000 m³)
Yugoslávia	1.574.499
USA	382.005
Ex-URSS	288.057
Canadá	172.913
China	94.974
Brasil	66.109
Suécia	48.083
Finlândia	38.304
Alemanha	38.061
Malásia	32.541

Fonte: Estatísticas de Floresta (1990), FAO.

**Países que mais desmatam (est. 1991)**

% anual sobre florestas

País	%
Brasil	4,1
Paraguai	4,0
Guiné	3,6
Costa do Marfim	3,3
Nicarágua	3,1
Malásia	2,9
Níger	2,8
Equador	2,6
Nigéria	2,4
Honduras	2,3

Fonte: Banco Mundial.



## Desmatamento no mundo, em 87 países tropicais

Unidades de área

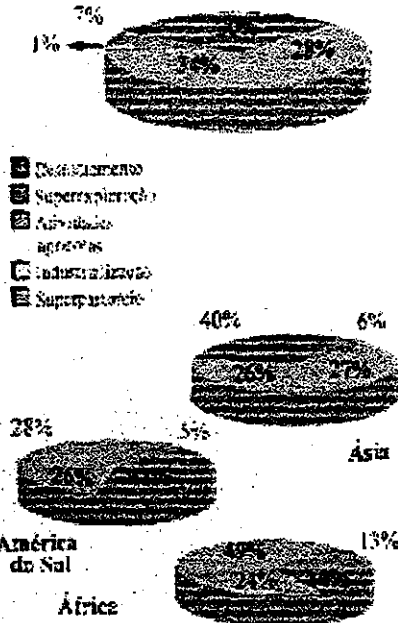
T. total de área	Área de floresta (1980)	Área de floresta (1990)	Área desmatada	% anual (1980-1990)
------------------	-------------------------	-------------------------	----------------	---------------------

África	4.319.300	1.236.800	3.082.500	14.900	0,9
--------	-----------	-----------	-----------	--------	-----

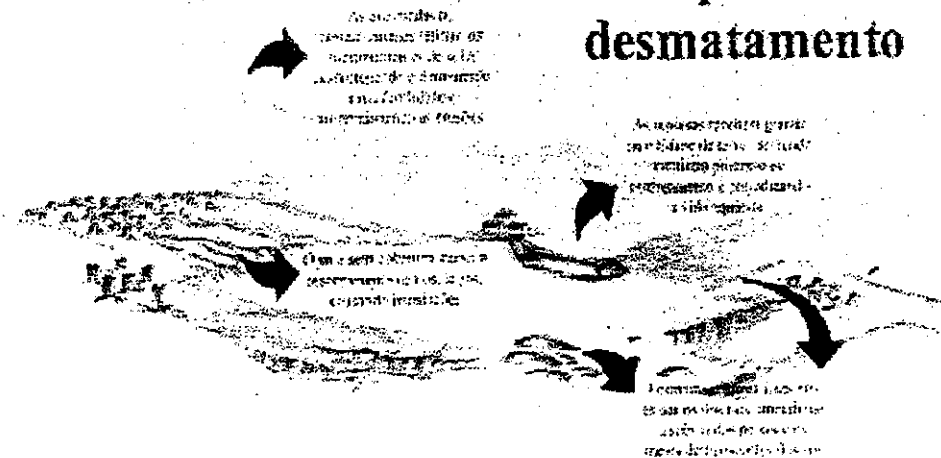
Am. Latina	1.573.300	923.600	649.700	1.100	0,2
Ásia	890.600	340.300	550.300	3.400	0,1
África	2.201.400	390.300	1.811.100	1.800	0,1

Fonte: Relatório Mundial de 1992

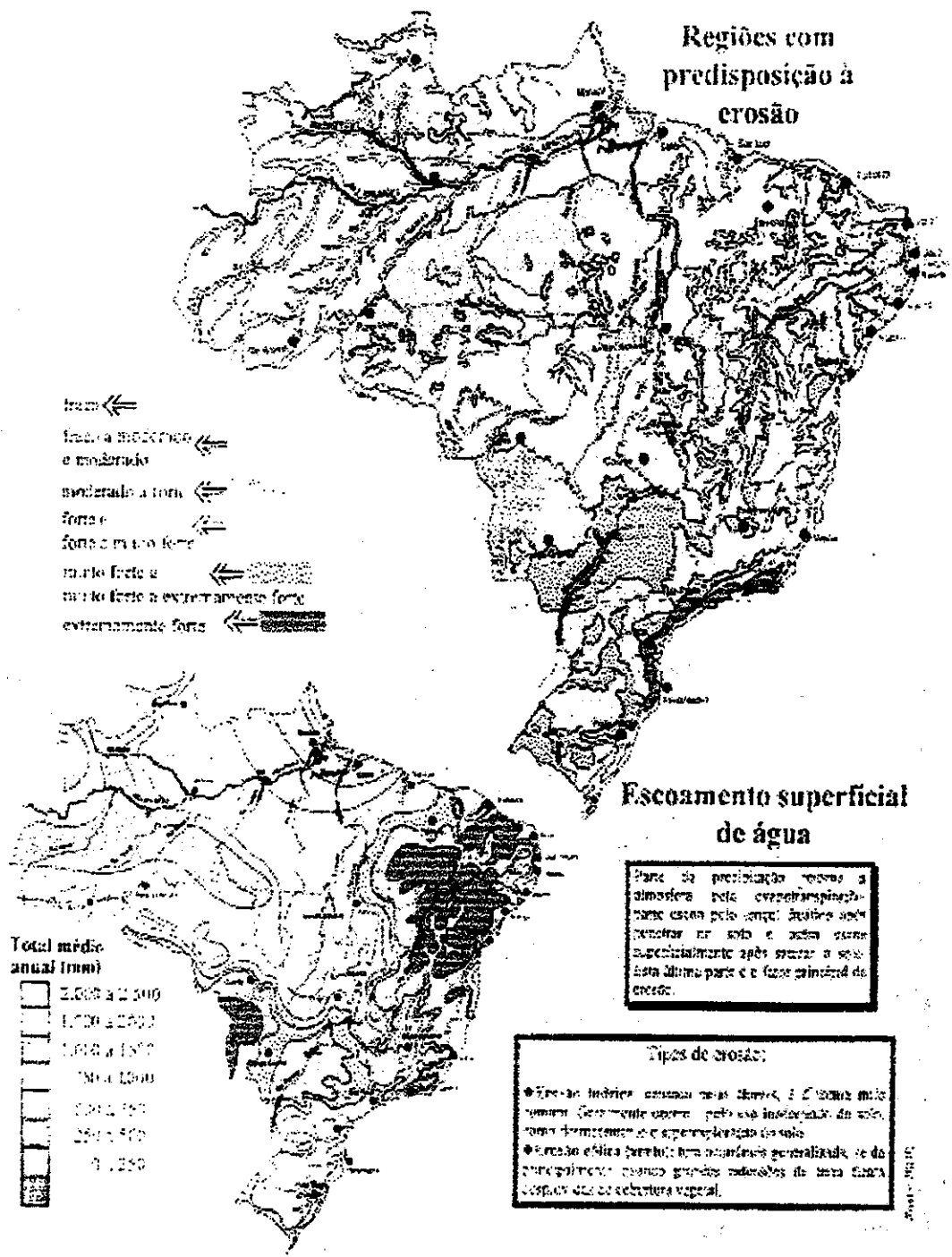
## O desmatamento e a degradação do solo no mundo



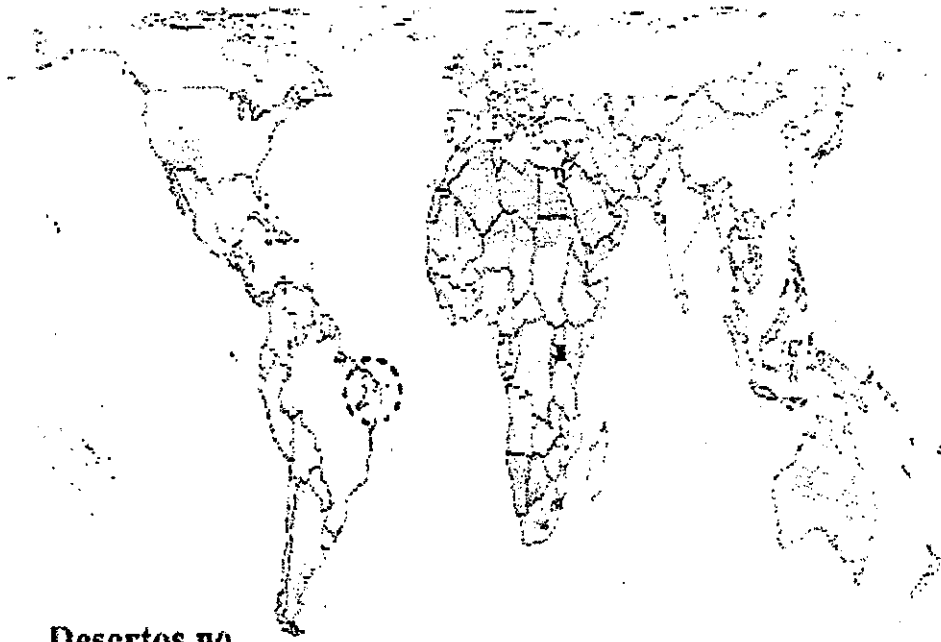
## Conseqüências do desmatamento



## Regiões com predisposição à erosão



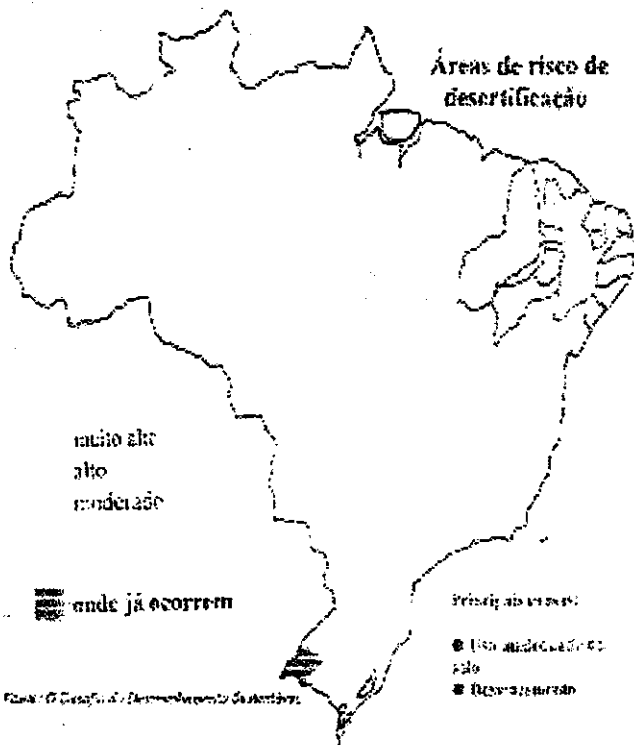




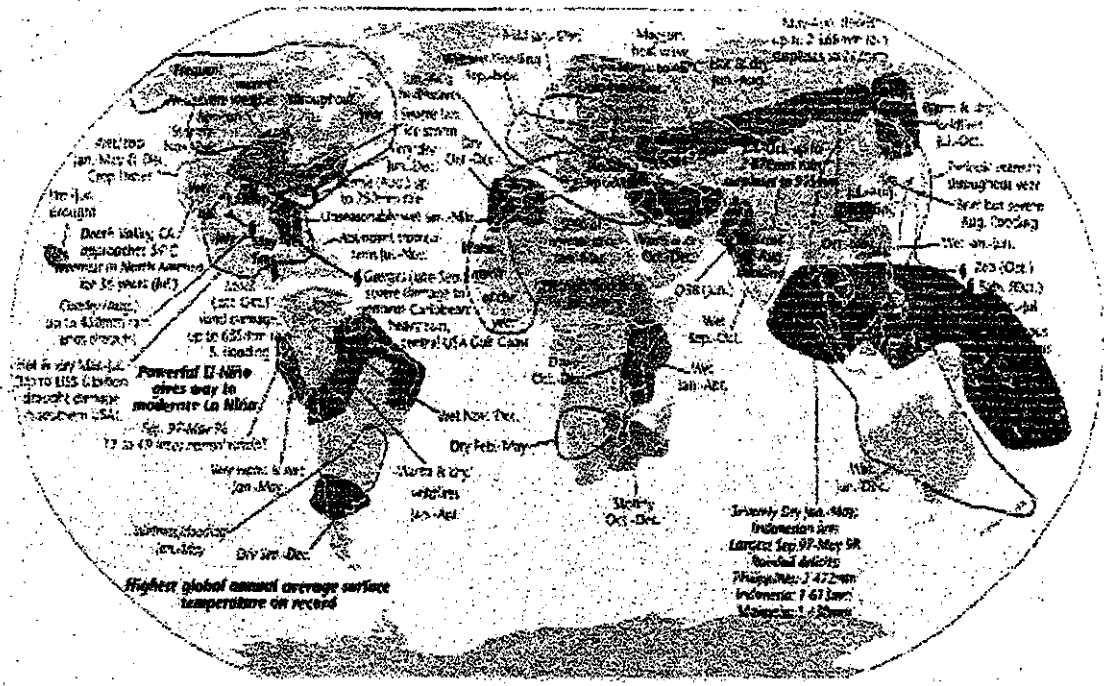
## Desertos no mundo

### Maiores desertos conhecidos

Nome	Continente
Sulawesi do E.A. e Nordeste do México	Am. do Norte
Atacama	Am. do Sul
Patagônia	Am. do Sul
Sahara	África
Karakum	Ásia
Kalbaras	África
Somália	África
Arábia	Oriente Médio
Túmpan	Ásia
Iran	Oriente Médio
Iran	Ásia
Gobi	Ásia
Antártica	Antártica



Fonte: O Estado da Desertificação no Brasil.



# Impactos sobre o ecossistema amazônico



## DESMATAMENTO

- As queimadas e desmatamentos deixam o solo desprotegido, facilitando a erosão, e provocam a perda de nutrientes, diminuindo a fertilidade.
- O solo sem cobertura causa o assoreamento dos rios, o que produz inundações.

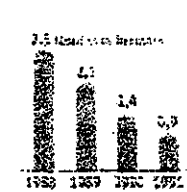
- As represas recebem grande quantidade de terra, sofrendo contínuo processo de assoreamento e prejudicando a vida aquática.
- Formam-se novas ilhas nos estuários dos rios, impedindo a subida dos peixes e dificultando o transporte fluvial.

As queimadas das florestas liberam o CO<sub>2</sub>

## DESMATAMENTO ANUAL NA AMÉRICA DO SUL

País	Porcentagem
1. PARAGUAI	4,5%
2. EQUADOR	2,6%
3. VENEZUELA	0,9%
4. COLOMBIA	0,2%
5. BRASIL	0,1%
6. PERU	0,1%
7. ARGENTINA	0,1%
8. BOLÍVIA	0,1%

## DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA



### GARIMPO DE OURO

Assoreamento, erosão e poluição dos cursos d'água. Contaminação por mercúrio com consequências para a pesca e a população. Degradação da paisagem e da vida aquática.



### GRANDES RODOVIAS

Destruição das culturas indígenas. Propagação dos garimpos e de doenças endêmicas. Projetos agropecuários que provocam explosão demográfica.



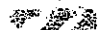
### INDÚSTRIAS DE ALUMÍNIO

Polluição atmosférica e marinha. Impactos diretos sobre a saúde humana pela enorme demanda de energia elétrica.



### INDÚSTRIAS DE FERRO-GUSA

Demanda de carvão vegetal da floresta nativa. Desmatamento. Exporção de energia elétrica para o setor industrial. Poluição das águas, do ar e do solo.



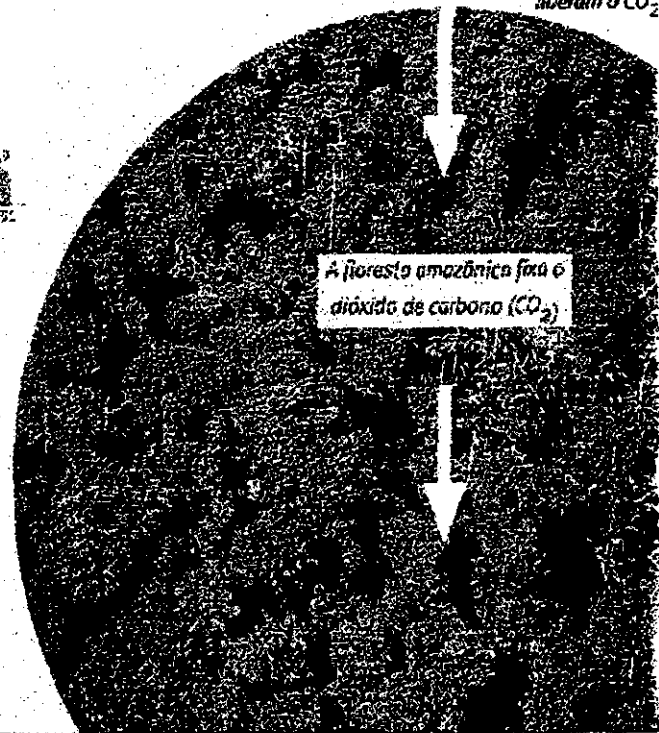
### MINERAÇÃO INDUSTRIAL

Degradação da paisagem. Poluição do solo e do ar e assoreamento dos cursos d'água. Esterilização de grandes áreas e impacto socioeconômico.



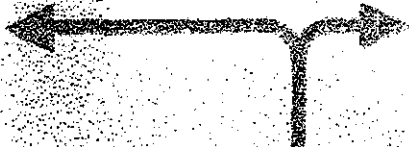
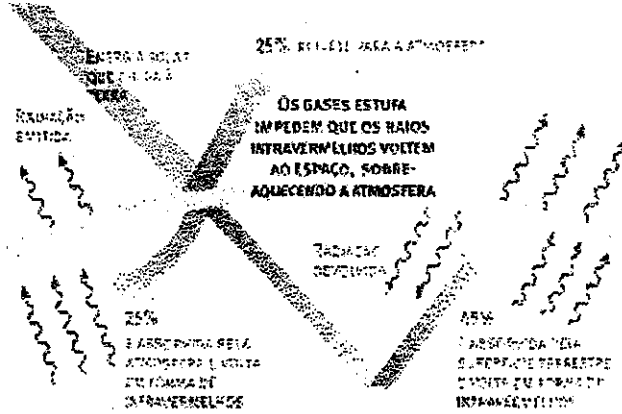
### GRANDES USINAS HIDRELÉTRICAS

Impacto cultural e socioeconômico sobre os povos indígenas e sobre a fauna e a flora. Inundação de áreas florestais, agrícolas, vilas, etc.



**EFEITO ESTUFA**

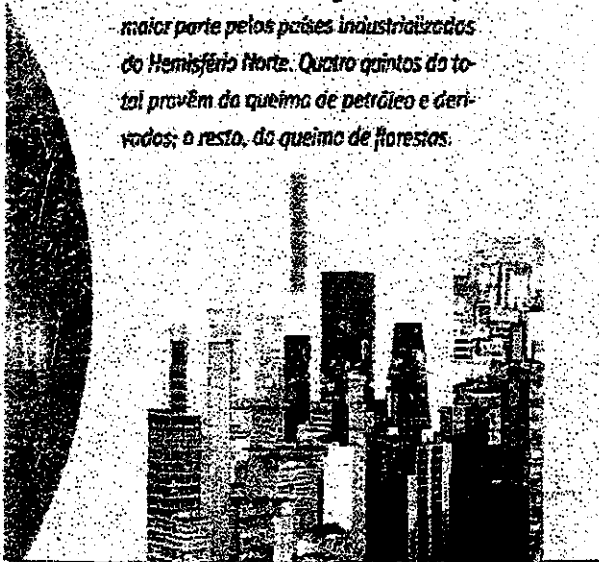
O gás carbônico (CO<sub>2</sub>) é a substância que as plantas retiram do ar para realizar a fotossíntese. Na atmosfera, o CO<sub>2</sub> funciona como uma parede de vidro em torno da Terra: deixa entrar a luz do sol, mas retém o calor. A queima de combustíveis fósseis aumenta a quantidade de gás carbônico e, em consequência, aumenta também a temperatura da Terra. É o chamado efeito estufa. As florestas do mundo, como a amazônica, absorvem gás carbônico; quando queimadas, liberam-no na atmosfera.



*A cada ano são lançadas na atmosfera 24 bilhões de toneladas de gás carbônico, a maior parte pelos países industrializados do Hemisfério Norte. Quatro quintos do total provém da queima de petróleo e derivados; o resto, do queimo de florestas.*

**RISCO DE DERRETIMENTO DAS CALOTAS POLARES**

Com o aquecimento da atmosfera, aumenta a temperatura das águas e o gelo das calotas polares começa a derreter. Como resultado, o nível das águas dos oceanos sobe.



**CAÇA E PESCA PREDATÓRIAS**

Extinção de mamíferos aquáticos, diminuição de populações de quelônios, peixes e diferentes animais de valor econômico e importância ecológica.



**EXPLOÇÃO POPULACIONAL**

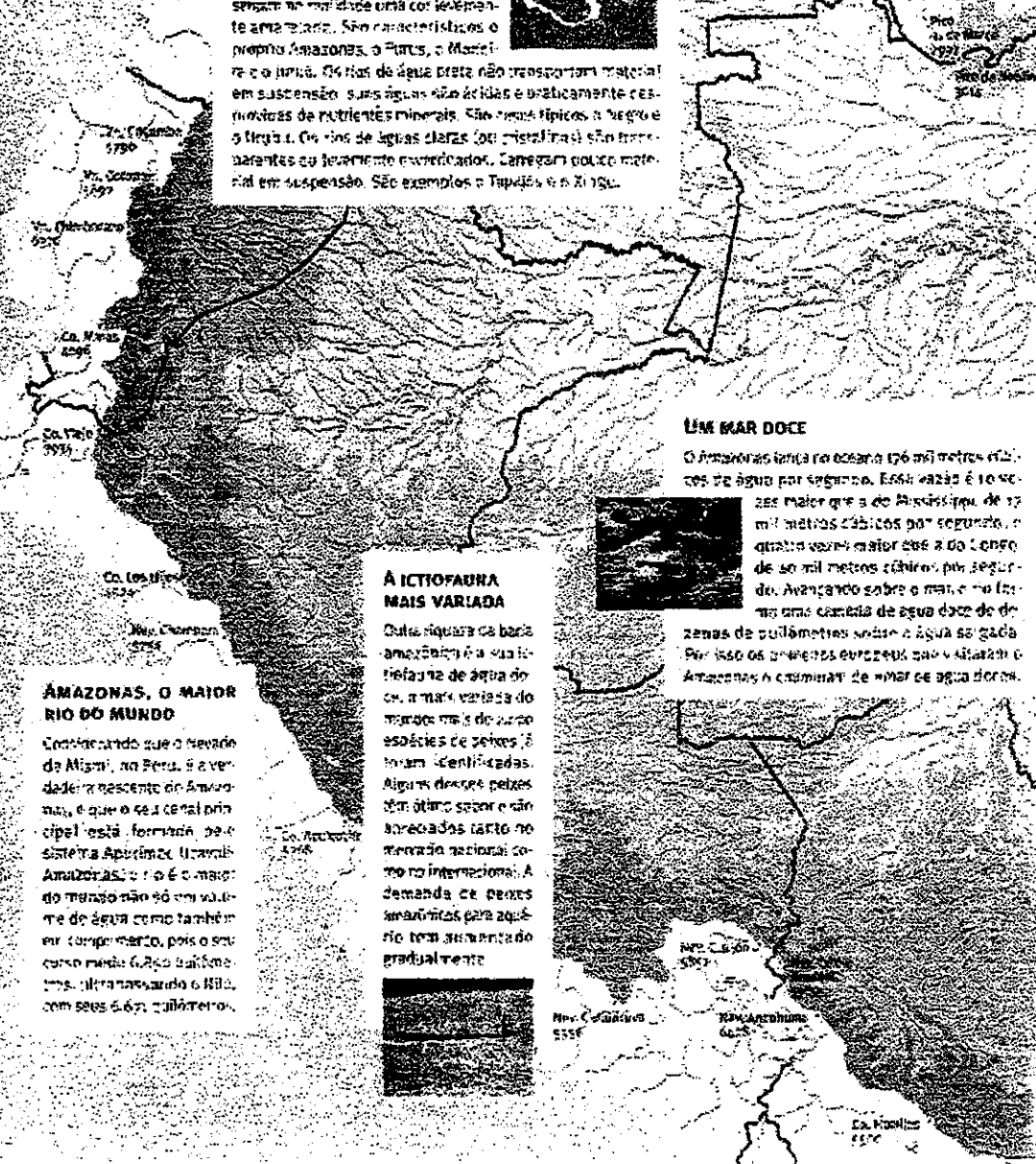
Problemas sociais graves, ocupação desordenada e vorazidade do solo com sérias consequências sobre os recursos naturais. Migração interna.

Dessemparelhamento de os centros urbanos, todos os recursos naturais, poluição das águas, extinção espécies e contaminação. Essa forma as terras baixas do Amazônia

# O rio Amazonas

## ÁGUA BRANCA, PRETA E CLARA

Os rios chamados de água branca carregam abundantes sedimentos e apresentam na maioridade uma cor levemente amarelada. São característicos o próprio Amazonas, o Purús, o Madeira e o Juruá. Os rios de água preta não transportam material em suspensão: suas águas são ácidas e praticamente desprovidas de nutrientes minerais. São rios típicos o Negro e o Tiriúá. Os rios de águas claras (ou cristalinas) são transparentes ao levemente esverdeados. Carregam pouco material em suspensão. São exemplos o Tapajós e o Xingu.



## AMAZONAS, O MAIOR RIO DO MUNDO

Commeçando sua origem na neve de Mismi, no Peru, é a verdadeiramente nascente do Amazonas, e que o seu canal principal está formado pelo sistema Apurímac-Ucayali-Amazonas, o rio é o maior do mundo não só em volume de água como também em comprimento, pois o seu curso inclui todos os subcontinentes, ultrapassando o Gila, com seus 6.631 quilômetros.

## UM MAR DOCE

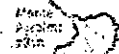
O Amazonas lança no oceano 176 mil metros cúbicos de água por segundo. Essa vazão é 10 vezes maior que a do Rio São Francisco de 17 mil metros cúbicos por segundo, e quatro vezes maior que a do Congo de 40 mil metros cúbicos por segundo. Avançando sobre o mar, o rio forma uma camada de água doce de dezenas de quilômetros sobre a água do mar. Por isso os primeiros europeus que visitaram o Amazonas A cruzaram de mar a água doce.



## A ICTIOFAUNA MAIS VARIADA

Data a quase 200 espécies de peixes amazônicos e a sua ictiofauna de água doce, a mais variada do mundo, mais de 200 espécies de peixes já foram identificadas. Alguns desses peixes têm ótimo sabor e são apreciados tanto no mercado nacional como no internacional. A demanda de peixes aumentou para aquele que tem aumentado gradualmente.





### HÁ 50 MIL ANOS...

Tudo indica que a es-  
profundidade que o rio Amazonas  
através os forais estavados  
nos sedimentos há 50 mil  
anos, quando o mar não en-  
cristava 100 metros abaixo  
do seu nível atual. Terminada  
a última glaciação, há 25 mil  
anos, iniciou-se a elevação do  
nível do mar e em consequên-  
cia ocorreu um represamen-  
to das rios em seus próprios  
vales. No decorrer dos milên-  
ios seguintes o Amazonas atin-  
giu sua situação atual.

### UMA LARGURA VARIÁVEL

De uma margem a outra do Amazonas pode apresentar uma lar-  
gura de até 15 quilômetros, como ocorre na confluência com o Pa-  
rajás. Durante os enchentes a diferença de nível pode variar en-  
tre 10 e 15 metros, de modo que as vár-  
zeas inundadas do Amazonas têm uma lar-  
gura de até 100 mil metros.



### UMA HIDROVIA NATURAL

A profundidade do rio em alguns pontos  
é de mais de 50 metros; no estreito de  
Chimú chega a 120 metros. As melhores  
condições de navegabilidade ocorrem na  
cana principal, por onde podem trafegar  
navios de grande calado durante o ano  
todo, desde a foz até Iquitos, no Peru. Navios mais  
pequenos também podem navegar em alguns dos  
afluentes, como o Madeira. O sistema fluvial do  
Amazônia é uma hidrovia natural.



As melhores  
condições de  
navegação

### SE O RIO DEIXASSE DE CORRER...

O Amazonas é um rio de pa-  
rte. A partir de Iquitos, que  
está a 1.520 quilômetros do  
Atlântico, o curso do rio está  
a 200 metros acima do nível  
do mar. Na foz do rio Negro,  
em Manaus, ainda a 1.500  
quilômetros no oceano, o  
desnível em relação ao mar  
é de apenas 25 metros. No  
entanto, com a profundida-  
de desse trecho de  
de 50 metros, se  
por algum motivo o  
rio deixasse de cor-  
rer, o Altiplano Inve-  
diária e calha, ter-  
minando uma faixa de água  
salgada que se estenderia  
até as 2000 ilhas de Iquitos,  
várias centenas de quilôme-  
tros a oeste de Manaus.

