



reabilita

Reabilitação Ambiental Sustentável
Arquitetônica e Urbanística

REGISTRO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO À DISTÂNCIA

Vol. 2 Urbano

TERCEIRA EDIÇÃO - 2023 - REVISADA E AMPLIADA

Org.
Marta Adriana Bustos Romero
Ederson Oliveira Teixeira
Ana Carolina Cordeiro Correia Lima



reabilita

Reabilitação Ambiental Sustentável
Arquitetônica e Urbanística

REGISTRO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO À DISTÂNCIA
TERCEIRA EDIÇÃO - 2023 - REVISADA E AMPLIADA

Vol. 2 Urbano

TERCEIRA EDIÇÃO - 2023 - REVISADA E AMPLIADA

Org.
Marta Adriana Bustos Romero
Ederson Oliveira Teixeira
Ana Carolina Cordeiro Correia Lima



UnB



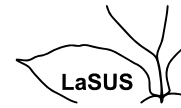
faunb



LaSUS



Reitora Márcia Abrahão Moura
Vice-Reitor Henrique Huelva
Decana de Pesquisa e Inovação Maria Emília Machado Telles Walter
Decanato de Pós Graduação Lucio Remuzat Rennó Junior



Diretor da FAU Caio Frederico e Silva
Vice Diretoria da FAU Maria Claudia Candeia de Souza
Coordenadora de Pós-Graduação Maria Fernanda Derntl
Coordenadora do LaSUS Marta Adriana Bustos Romero

**Coordenação de Produção Editorial,
Preparação, Revisão e Diagramação** Valmor Cerqueira Pazos
Isabella Capanema
Lucas Correia
Érika Stella Silva Menezes

Conselho Editorial Abner Luis Calixter
Humberto Salazar Amorin Varum
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa
Thiago Montenegro Goes

Organizadores Marta Adriana Bustos Romero
Ederson Oliveira Teixeira
Ana Carolina Cordeiro Correia Lima

Textos, imagens, figuras e ilustrações são de responsabilidade dos autores

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Reabilitação ambiental sustentável arquitetônica e urbanística [livro eletrônico] : registro de curso de especialização à distância : vol. 2 / organização Marta Adriana Bustos Romero, Ederson Oliveira Teixeira, Ana Carolina Cordeiro Correia Lima. -- 3. ed. -- Brasília, DF : LaSUS FAU : Editora Universidade de Brasília, 2023.
PDF

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-84854-16-1

1. Arquitetura 2. Eficiência energética 3. Simulação computacional 4. Sustentabilidade ambiental 5. Urbanismo I. Romero, Marta Adriana Bustos. II. Teixeira, Ederson Oliveira. III. Lima, Ana Carolina Cordeiro Correia.

23-166768

CDD-720.47

Índices para catálogo sistemático:

1. Arquitetura sustentável 720.47

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

3ª Edição

FAU - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo / LaSUS – Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e ao Urbanismo.
Caixa Postal 04431, CEP 70842-970 – Brasília-DF. Telefones: 55 61 99362-3397. E-mail: lasus@unb.br / www.lasus.unb.br

Sumário geral

ANESP – Análise espacial em apoio à reabilitação e ao planejamento urbano	11
Apresentação	14
Capítulo 1 – Políticas urbanas no Brasil e legislação brasileira	15
Capítulo 2 – Conceitos em análise espacial	31
Capítulo 3 – O Sistema de Informação Geográfica - SIG	43
Palavras finais	50
Referências	52
MOBI – Introdução à Mobilidade Urbana	57
Apresentação	60
Capítulo 1 – Mobilidade urbana	61
Capítulo 2 – Planejamento integrado	66
Capítulo 3 – Aspectos econômicos, institucionais e tecnológicos dos sistemas de transporte	90
Capítulo 4 – Ferramentas de análise e avaliação	95
Palavras finais	100
Referências	101
PATR – Preservação e Patrimônio Cultural	105
Apresentação	109
Parte 1	110
Capítulo 1 – Conceitos fundamentais	111
Capítulo 2 – Preservação e intervenção	129
Capítulo 3 – A carta de veneza de 1964	136
Parte 2	140
Capítulo 4 – Patrimônio – Visão geral	141
Capítulo 5 – Intervenções urbanas	162
Parte 3	172
Capítulo 6 – Técnicas de construção, patologias e patrimônio cultural	173
Capítulo 7 – Patologia das edificações	178
Capítulo 8 – Conservação, manutenção, restauro	190
Capítulo 9 – O concreto armado	210

Palavras finais 216

Referências 217

SENS – Sensoriamento remoto aplicado à análise ambiental e urbana 223

Apresentação 226

Capítulo 1 – Histórico do sensoriamento remoto 229

Capítulo 2 – Radiação eletromagnética 254

Capítulo 3 – Interação da radiação eletromagnética com a matéria 264

Capítulo 4 – Comportamento espectral de solos, de vegetação,
de água e de materiais manufaturados 270

Capítulo 5 – Sistemas sensores 275

Palavras finais 278

Referências 279

PAISAGEM SONORA – Análise do som em diferentes escalas urbanas 283

Apresentação 286

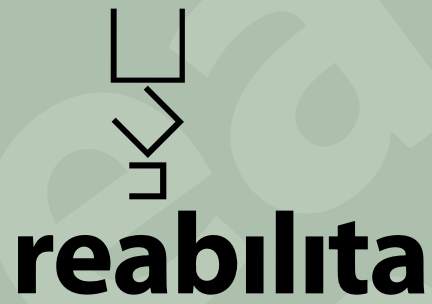
Capítulo 1 – Conceitos básicos da acústica ambiental 288

Capítulo 2 – Arquitetura sensorial e o som 303

Capítulo 3 – Olhar sonoro nas quatro escalas urbanas 311

Palavras finais 336

Referências 338



SENS

**Sensoriamento remoto aplicado
à análise ambiental e urbana**

Professor Gustavo Macedo de Mello Baptista

Sumário • SENS

	Apresentação	226
	Capítulo 1 – Histórico do sensoriamento remoto	229
	Capítulo 2 – Radiação eletromagnética	254
	Capítulo 3 – Interação da radiação eletromagnética com a matéria	264
	Capítulo 4 – Comportamento espectral de solos, de vegetação, de água e de materiais manufaturados	270
	Capítulo 5 – Sistemas sensores	275
	Palavras Finais	278
	Referências	279

Apresentação

Prezado aluno,

Seja bem-vindo ao terceiro módulo do curso Reabilita.

Iremos tratar sobre sensoriamento remoto, que vem se popularizando cada vez mais e tornando-se parte do nosso cotidiano, que pode ser entendido, neste curso, como a aquisição de informações, por meio da radiação eletromagnética, sem o contato físico entre alvo e sensor.

Um pouco (ou muito) técnico para o começo de uma apresentação, não achas?

Mas infelizmente, tentarei ser o mais objetivo possível neste módulo. Temos muito conteúdo para aprender e, por esse motivo, não podemos perder o foco.

Claro, a coordenação me pediu que precisarei dar algumas “pausas para o café” no conteúdo, evitando ficar muito extenso. E logicamente sugiro essas pausas, principalmente por ser um conteúdo muito técnico.

Então vamos ao que interessa neste momento, certo?

É importante saber que o sensoriamento remoto faz parte da nossa vida o tempo todo, pois sensor é o que capta a informação e remoto, dá ideia de distância e sem um contato físico direto com o alvo.

Quer ver um exemplo simples?

Ao nascer, o ser humano e boa parte dos animais deparam-se com um conjunto de sistemas sensores fantásticos que os permitem interagir com o mundo: seus olhos.

Ao olharmos para um objeto, nós captamos suas diversas características, tais como a cor, a sua textura, sua rugosidade, dimensões, entre outros, sem precisarmos tocá-lo. Isso é sensoriamento remoto! Mas como essa informação chega até os nossos sistemas sensores? Como impressiona o nosso cérebro? As respostas de tais questões são obtidas por meio da radiação eletromagnética, que incide sobre o alvo e transportam as informações até os nossos sistemas sensores, nesse caso, os olhos.

Como são comumente utilizados para a compreensão de recursos

naturais, os dados obtidos em sistemas sensores tem possibilitado a identificação de impactos, permitindo o monitoramento e tem funcionado como instrumento geotecnológico de planejamento e gestão ambiental e urbana.

Dominá-lo permite ampliar a análise das interferências antrópicas sobre os subsistemas ambientais tanto em áreas limítrofes como dentro das cidades.

Este curso surge do amadurecimento de diversas disciplinas, palestras e cursos que vêm sendo ministrados em diversos anos e em diversas localidades no país e no exterior por mim.

É fruto de minhas reflexões teóricas e práticas sobre as diversas possibilidades de se utilizar sensoriamento remoto para monitoramento e controle de diversas interferências antrópicas no meio natural e modificado.

Por isso, eu o escrevi sem alguns formalismos acadêmicos comuns nos materiais sobre sensoriamento remoto, inclusive no que escrevi sobre os sistemas hiperespectrais. Segui por um caminho mais descontraído, afinal de contas o tema é apaixonante. Eu acho!

E claro, espero que você também ache!

Portanto, procurei trazer, sob a forma de um curso básico, os aspectos conceituais relacionados ao sensoriamento remoto, passando por discussões sobre características dos diversos sistemas sensores, além de apresentar uma série de aplicações ambientais e urbanas, visando à difusão desse conhecimento bem como a ampliação das perspectivas de trabalho aos profissionais e estudantes da área de ciências da Terra e demais áreas do conhecimento.

Destina-se tanto ao profissional que quer começar a atuar na área de sensoriamento remoto, como para o gestor que quer saber se os produtos que lhe são entregues para a análise que se baseiam nesses tipos de dados cumprem com a demanda exigida.

Estruturado em quatro partes, este material começa com a compreensão dos conceitos básicos de sensoriamento remoto, na qual questões relativas ao histórico do sensoriamento remoto são abordadas desde as primeiras fotografias até o surgimento dos sistemas de alta resolução, como os hiperespectrais, hiperespectrais, hipertemporais, entre outros. Ainda na primeira parte, a radiação eletromagnética é apresentada, bem como as interações da energia com a atmosfera e com a matéria de superfície. Finalizando os conceitos básicos com o comportamento espectral de solos, de água, de vegetação e de diversos materiais manufaturados.

A segunda parte se dedica aos sistemas sensores multiespectrais, apresentado inicialmente a classificação dos sensores, bem como às definições das diversas resoluções que um sistema sensor deve ter, tais como resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica

e temporal. Essa parte finaliza-se com a apresentação de aplicações tanto no âmbito ambiental como no urbano.

A terceira parte apresenta os sistemas hiperespectrais, que são sistemas que permitem investigações com níveis de detalhamento de questões espectrais muito mais refinado que nos multi, apresentados no segundo capítulo. Aqui a brincadeira sai da esfera de “isso é solo exposto – abordagem multiespectral” para saber quais e quanto tem de cada mineral que compõem esse solo. As aplicações aqui são apresentadas, abordando o sequestro de carbono intraurbano, os domos urbanos de CO₂, as interferências antrópicas em componentes do ciclo hidrológico, bem como a identificação de possíveis focos de proliferação de vetores da dengue.

E, para concluir, sua última parte aborda os sensores remotos termais que trazem uma grande contribuição ao estudo do tecido urbano, pois o fenômeno das ilhas urbanas de calor é possível de ser mapeado, bem como investigado juntamente com dados de luz noturna, visando compreender o adensamento de áreas urbanas.

Sei que é muita informação inicial, mas, como disse, tentarei ser o mais objetivo possível. É um conteúdo extenso, mas trouxe muitas imagens ilustrativas. Lógico, não tem como apresentar todo este conteúdo sem visualizar o que estamos tratando, não achas?

Espero que você se apaixone pelo mundo do sensoriamento remoto e passe a utilizá-lo em sua prática cotidiana. É incrível!

Aproveite!

Professor Gustavo M. Baptista

Capítulo 1

Histórico do sensoriamento remoto

Desde os mais remotos tempos, o ser humano sempre teve o sonho de voar e entre os aspectos relacionados a esse sonho, além da sensação de liberdade, o olhar de cima estava entre eles.

Quando das grandes navegações existia abordo um profissional, chamado de geógrafo ou de cartógrafo, que ia anotando do alto do mastro principal, do cesto da gávea, as nuances da paisagem e seus acidentes para depois passá-los para a toalha de mesa, chamada de MAPPA.

O que mais nos impressiona na avaliação dos mapas gerados nessa época é a sua elevada correlação para com a realidade que os dados de imagens de sensoriamento remoto nos apresentam. Isso pode ser notado quando se compara o planisfério intitulado *Orbis Terrarum*, produzido por Stoopendaal em 1680 e o gerado por meio de imagens de satélite no projeto The Living Earth, produto obtido com o auxílio de 2500 imagens sem cobertura de nuvem. A comparação pode ser vista nas figuras a seguir.

Essa alta correlação entre o representado pelos navegantes e o gerado com tecnologia de sensoriamento remoto é fruto da observação das paisagens e à medida que o homem foi se fixando em ambientes urbanos, a necessidade de observá-la foi sendo deixada de lado.

Quem, nas grandes cidades, utiliza as estrelas para ir visitar um parente, ou mesmo, quem se vale da trajetória aparente do sol para ir trabalhar? O ordenamento territorial nos leva a uma lógica que pode ser alfanumérica, como em cidades planejadas, porém, em cidades espontâneas, as ruas têm nome de gente que não é sequer parente do que é homenageado na rua seguinte. Isso acaba sendo um problema. Ou decora ou se lasca!

Mas foi com advento da fotografia que a compreensão espacial e as técnicas de mapeamento avançaram muito. A fotogrametria, ou a possibilidade de se fazer medições mediante fotografias e, com elas, elaborar os mapas foi um salto tecnológico significativo.

Porém as fotografias sugeriram com o intuito de se perpetuar as memórias e não apenas para se obter informações geográficas. É muito comum

que até hoje as pessoas registrem momentos importantes de suas vidas por meio de fotografias e que nunca tenham sido apresentadas a um par estereoscópico.

Figura 1 – Comparação dos planisférios produzidos em 1680 e pelo projeto The Living Earth



Fonte: acervo do autor

Par estereoscópico é um conjunto de duas fotografias que foram tiradas por intermédio de um voo e que ilustram parte do terreno com ângulos de visada distintos as quais, quando observadas com um aparelho chamado estereoscópio (um arranjo de espelhos e lentes), permitem a visão tridimensional da área fotografada.

Para essas pessoas, tais lembranças são tão importantes que, em algumas catástrofes nas quais os indivíduos perdem suas casas, muitas vezes falam que a sua história se perdeu juntamente com as fotografias que não puderam ser recuperadas.

Atribui-se ao francês Joseph Nicéphore Niépce a primeira fotografia que se tem notícia. Obtida em 1827, foram, à época, denominadas

heliografias, ou escritas do Sol. Sua técnica utilizava o betume da Judéia, um verniz que possuía a propriedade de secar bem rápido quando exposto à luz.

Como as partes não expostas podiam ser removidas, era possível obter uma imagem rudimentar por meio de placas metálicas emulsionadas com esse verniz utilizando-se câmaras escuras. Como a quantidade de luz que entrava era muito pequena, o tempo de exposição tinha de ser muito grande, superior a oito horas, o que modificava a paisagem por meio do movimento aparente do Sol e da alteração das sombras, comprometendo o resultado.

A figura a seguir apresenta a única imagem que restou dos experimentos de Niépce, considerada a fotografia mais antiga que se tem registro, provavelmente obtida a partir de uma janela. Nota-se o telhado de uma água na porção central mais baixo que as edificações que o ladeiam.

Figura 2 – Primeira fotografia tirada por Niépce, intitulada Vista da janela em Gras em 1827. A esquerda, a placa metálica, e a direita, a foto “revelada”



Fonte: acervo do autor

Um pouco ruim de ver, não acha?

Mas a mágica da computação é incrível. Veja a foto revelada.

“tchan-ran!!!”

Figura 3 – Fotografia tirada por Niépce. Reconstituição digital em cores



Fonte: acervo do autor

As heliografias de Niépce influenciaram diversos utilizadores de câmaras escuras, como Louis Daguerre, que as utilizava para fins artísticos, como a pintura. Em 1829, Daguerre conseguiu se associar a Niépce para aprimorarem a técnica de obtenção de imagem, mas os interesses eram antagônicos, pois Niépce queria uma imagem que pudesse ser copiada e Daguerre queria apenas a imagem.

Com a morte de Niépce, quatro anos mais tarde, Daguerre continuou as tentativas até que um golpe de sorte solucionou seu grande problema: a fixação da imagem. Começou a trabalhar com sais de prata que imprimiam a imagem rapidamente, mas com o tempo elas se perdiam. Um dia, ao abrir um armário no qual havia guardado uma placa, ele percebeu uma imagem que antes não estava impressa e atribuiu o fato ao mercúrio de um termômetro que havia se quebrado no armário. Fez alguns testes e criou o que chamou de daguerreótipos.

Apresento na próxima figura o considerado primeiro daguerreótipo bem sucedido, registrado em 1837, que retrata uma paisagem interna, com alguns rostos de anjos na porção central inferior, bem como uma placa entalhada com uma Vênus, além de um quadro e outros utensílios.

Figura 4 – Primeiro daguerreótipo bem-sucedido obtido em 1837, intitulado *O Ateliér do Artista*



Fonte: acervo do autor

Porém as tentativas de se estabelecer uma fotografia que fosse possível de ser imortalizada continuavam, mas no caso do sensoriamento remoto, as coisas tomaram outro rumo.

Cerca de 20 anos após a descoberta do processo de fixação de Daguerre, Gaspard Felix Tournachon, conhecido como Nadar, foi o grande pioneiro das fotografias aéreas. Balonista, ele obteve as primeiras fotos em Paris, em 1858, a 520m de altura (Figura 5).

A Figura 6 apresenta uma das fotografias obtidas por Nadar, já em 1886. Nota-se que a visada nadiral já era uma preocupação na obtenção

da imagem, o que de certa forma facilita a derivação de mapas. Nela notamos uma ponte, alguns barcos, além da copa de algumas árvores.

Observe as figuras na próxima página.

Eu as acho incríveis.

Figura 5 – A primeira fotografia aérea de Paris tirada por Nadar de um balão a 520 metros



Fonte: acervo do autor

Figura 6 – Fotografia aérea da Ilha Saint Louis obtida por Nadar



Fonte: acervo do autor

Outro registro histórico importante da fotografia aérea data de 1860, retratando os telhados de Boston, que se estendem até o porto em visão panorâmica. A torre da Igreja Velha pode ser vista à esquerda na Figura 7. O fotógrafo James Black registrou a imagem quando sobrevoava a cidade a 370m de altitude no balão “Rainha do Ar”. Acredita-se que esta seja a primeira imagem aérea nítida tirada nos Estados Unidos. A imagem registrada por Black apresenta visada oblíqua alta, ou seja, não nadiral e com ângulo superior a 45°.

Figura 7 – Imagem de Boston em 1860



Fonte: acervo do autor

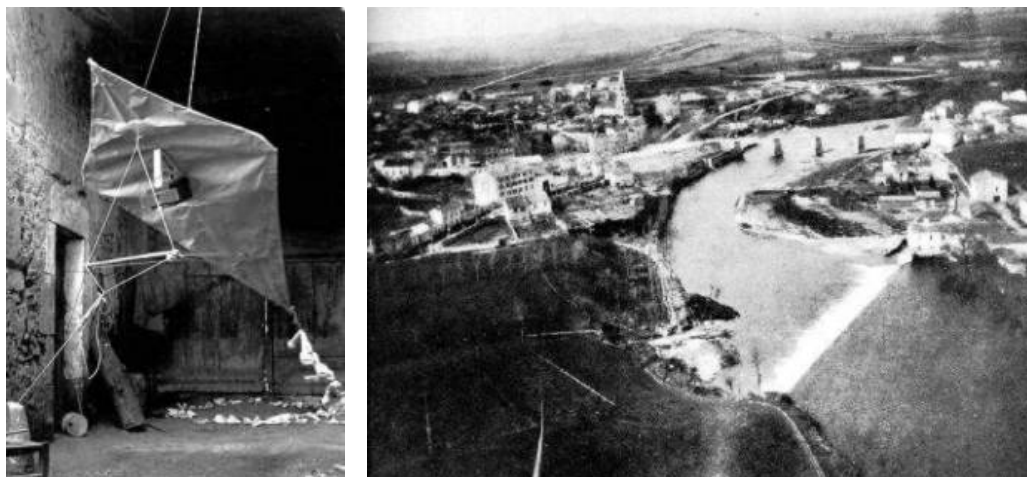
Nem todos, porém, tinham acesso aos balões e muitos optavam por soluções mais criativas, aliás, isso é inerente ao ser humano. No final do século XIX, o francês Arthur Batut utilizou pipas para a tomada de fotografias aéreas. O grande problema das pipas é que a visada seria sempre oblíqua.

Mas se soltar uma pipa requer habilidades, soltar pipas pesadas pelo equipamento acoplado e ainda obter fotografias era para poucos. A Figura 8 mostra a pipa com a câmera e a fotografia que Batut registrava. Salienta-se para o detalhe da linha da pipa em destaque na porção inferior esquerda.

Se soltar uma pipa para tirar fotografias era difícil, imaginem mais de uma. Tal prática era considerada praticamente impossível. Bem, não foi o que George R. Lawrence mostrou. O terremoto de 1906 em São Francisco destruiu quarteirões inteiros. Seis semanas depois do

desastre, Lawrence, um fotógrafo de Chicago, captou uma série de fotografias de visão panorâmica oblíqua alta (Figura 9) da cidade devastada, de uma altitude de cerca de 600 m acima de um navio na baía de São Francisco. Para isso, Lawrence ergueu sua grande câmera amarrando-a em uma composição de 17 pipas.

Figura 8 – Esquerda: detalhe da pipa de Batut com a câmera acoplada. Direita: a fotografia obtida



Fonte: acervo do autor

Na figura da direita, há uma questão bastante interessante. Olhe atentamente. Encontrou algo de diferente? A linha da pipa!

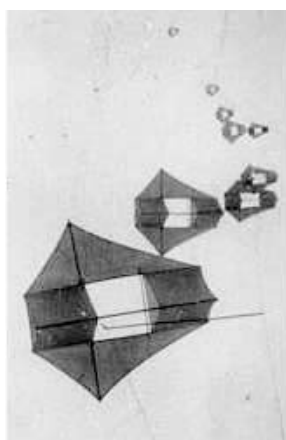
Podem-se perceber ao fundo as plumas de fumaça decorrentes dos incêndios causados como consequência do abalo sísmico. No canto superior direito, percebe-se a presença do sol com seus raios.

Não que eu goste de destruição, longe disso, mas para se ter noção da destruição do terremoto, sugiro que pesquise esse ensaio de Lawrence. Apresento uma pequena parte na figura a seguir, em alta resolução, que permite verificar o estrago do abalo sísmico.

Porém o cúmulo da criatividade ocorreu no início do século XX, quando pombos-correios equipados com minúsculas câmaras fotográficas (Figura 10) chegaram a ser utilizados na obtenção de fotografias aéreas. O gênio por trás dessa proeza foi o Julius Neubranner, que desenvolveu a pequena câmera em 1903, que obtinha fotos automaticamente a cada 30 segundos. O grande problema era controlar as linhas de voo, o ângulo de visada de obtenção da fotografia e as interferências das

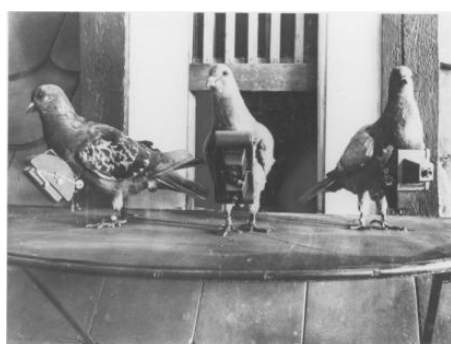
pontas das asas registradas.

Figura 9 – 1) Imagem da cidade de São Francisco, CA, em 1906.
2) Composição de 17 pipas utilizada por Lawrence para erguer sua câmera.
3) Detalhe em alta resolução da cena mostrando a destruição do terremoto



Fonte: acervo do autor

Figura 10 – 1) Pombos-correios com câmeras acopladas.
2) Fotografia obtida pelo pombo com o destaque para as pontas das asas



Fonte: acervo do autor

A primeira fotografia aérea bem-sucedida obtida por meio de câmera acoplada em foguete foi realizada por Alfred Nobel em 1897 (Figura 11), porém foi o alemão Albert Maul que desenvolveu um método utilizando foguetes à propulsão a ar comprimido (Figura 12), o que poderia permitir a obtenção de fotografias a altitudes da ordem de 800 metros. Mas a primeira fotografia obtida por foguete foi um feito de Robert H. Goddard, que em 1926 construiu o primeiro foguete movido à combustível líquido. Com seu segundo foguete, em 1929, ele obteve a primeira imagem (Figura 13).

Figura 11 – Primeira fotografia bem-sucedida obtida por câmera acoplada em foguete do Alfred Nobel, 1897



Fonte: acervo do autor

Figura 12 – Foguete de propulsão a ar comprimido de Albert Maul



Fonte: acervo do autor

Figura 13 – Fotografia obtida de Auburn, Massachusetts a partir do foguete de Goddard

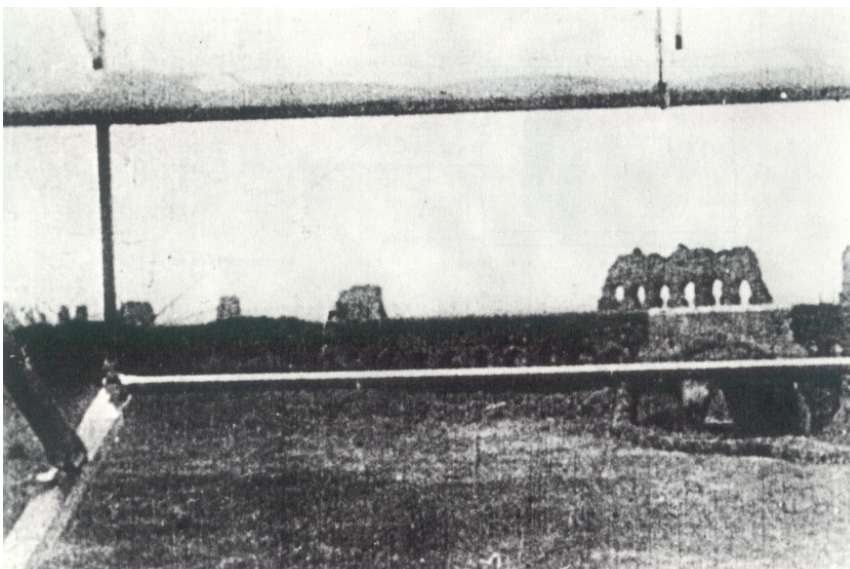


Fonte: acervo do autor

Atribui-se a Wilbur Wright a primeira fotografia aérea obtida por meio de aeronave, tirada em 24 de abril de 1909, por uma câmera levada a bordo, na qual pode ser vista a sua estrutura, além de uma visada oblíqua baixa dos muros de Centocelli, Itália (Figura 14).

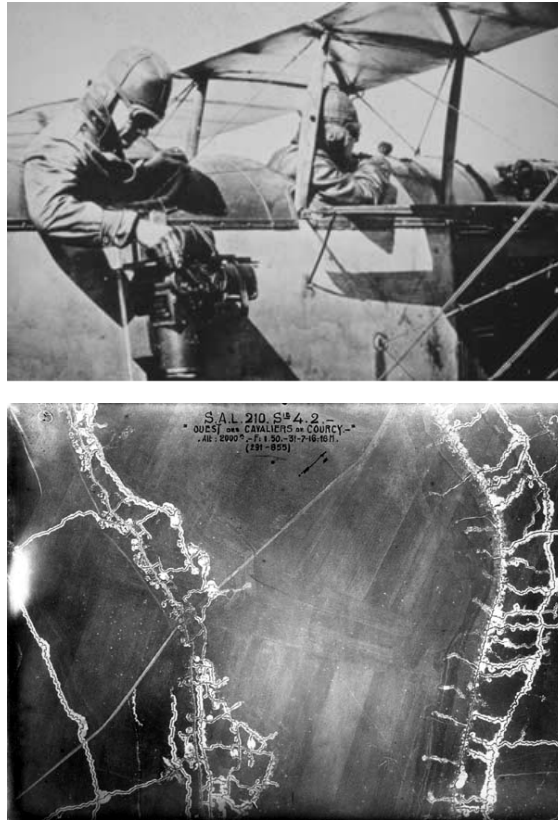
Esse tipo de produto obtido em avião já foi utilizado na Primeira Guerra Mundial (Figura 15), como forma estratégica de mapear o território inimigo. Note na figura as trincheiras abertas no campo de batalha. Aliás, a aerofotogrametria e o sensoriamento remoto avançaram bastante quando passaram a ser utilizados como recursos militares.

Figura 14 – Primeira fotografia aérea obtida por meio de aeronave, em 24 de abril de 1909, por Wilbur Wright



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

Figura 15 – 1) Detalhe da câmera acoplada na fuselagem do avião e o observador.
2) Fotografia obtida com visada nadiral detalhando as trincheiras no campo de batalha em 1916



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

Mas os primeiros registros de utilização de recursos fotográficos obtidos em altitude em conflitos são da Guerra Civil americana (1861 e 1865), quando Thaddeus Lowe (dentro do cesto na Figura 16) foi o primeiro a usar balões para a coleta de segredos militares. Mais de 70 anos depois, em 1935, o balão foi novamente utilizado, quando o de alta altitude Explorer II tirou a primeira fotografia, mostrando a curvatura da Terra.

Figura 16 – 1) Utilização de balão para obtenção de imagens do território inimigo durante a Guerra Civil norte americana. 2) Balão de alta altitude Explorer II em 1935



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

Os aviões estratosféricos de espionagem U2 (hoje chamados de ER-2) colheram informações secretas como na fotografia apresentada, que mostra submarinos soviéticos na Península de Kola, no mar de Barents, em local próximo onde anos mais tarde ocorreu o desastre com o submarino nuclear russo Kursk.

Figura 17 – Submarinos soviéticos no mar de Barents



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

Fotografias obtidas pelo U2 também ajudaram a confirmar a presença de mísseis soviéticos em Cuba, em 1962 (Figura 18). As fotos detectaram testes nucleares na China e forneceram informações táticas durante as guerras do Vietnã e do golfo Pérsico. Além disso, monitoraram os recursos da Terra e a atmosfera.

Figura 18 – Mísseis soviéticos em Cuba em 1962



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

A Figura 19 apresenta tropas norte-vietnamitas se deslocando por uma rodovia. Essa foto foi obtida por meio de câmera acoplada no U2.

Figura 19 – Tropas norte-vietnamitas se deslocando em estrada no Vietnam



Fonte: foto produzida por Wilbur Wright

Por serem de alta altitude, pois voam a 20 km em média, são bastante estáveis no traçado de linhas de voo e são utilizados hoje como suporte a sensores da NASA, que atualmente mantém três exemplares para as mais diversas missões, destacando-se a obtenção dos dados hiperespectrais do sensor AVIRIS do *Jet Propulsion Laboratory*.

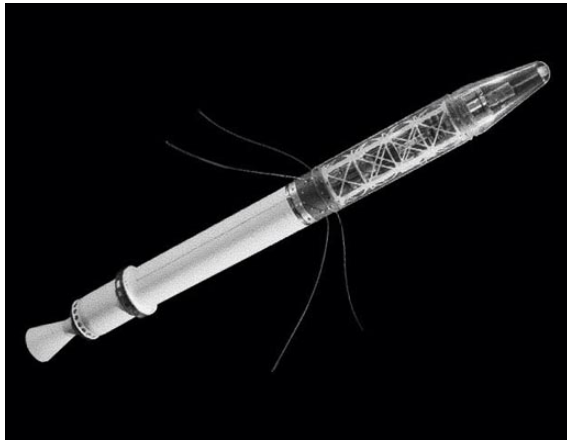
Muita história, muitas fotos, muito incrível e gostoso (eu acho).
Mas vamos fazer uma pausa, pois a partir de agora iremos tratar sobre os satélites.

Dos aviões para os satélites. Em quatro de outubro de 1957, foi colocado em órbita o primeiro satélite da história, o soviético Sputnik (Figura 20) e no ano seguinte, em 31 de janeiro de 1958, os americanos colocaram em órbita o Explorer I (Figura 21). Dentre os pesquisadores que estavam associados ao projeto Explorer I estava o Dr. James A. Van Allen, que por meio dos seus experimentos com seu pacote de raios cósmicos e micrometeoritos descobriu os cinturões de radiação entorno da Terra, que levam seu nome.

Figura 20 – Sputnik

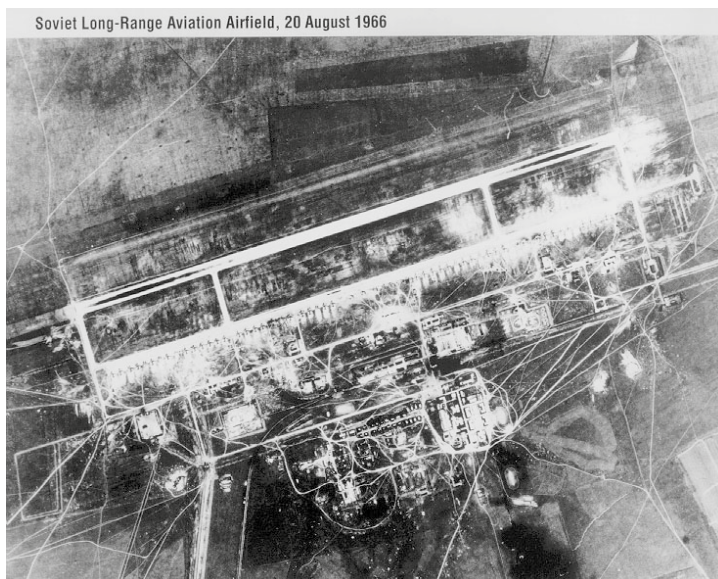


Fonte: acervo do autor

Figura 21 – Explorer I

Fonte: acervo do autor

Isso permitiu que, nos anos 60, o Serviço de Inteligência Americano - CIA desse início ao programa CORONA para a obtenção de fotografias, mediante satélites em órbita da Terra, tendo como objetivo investigar as atividades militares da URSS, como pode ser visto na Figura 22, que apresenta uma base militar soviética. CORONA é considerado o primeiro programa americano de Inteligência por satélite.

Figura 22 – Base militar soviética registrada no âmbito do projeto Corona em 1966

Fonte: acervo do autor

Em 1º de abril de 1960, é colocado em órbita o satélite para obtenção das primeiras observações orbitais sistemáticas da Terra – TIROS I, que usava um sistema de câmera de televisão de resolução espacial relativamente baixa. A figura a seguir apresenta a primeira imagem do TIROS I. Esse satélite permitiu a obtenção de informações extremamente importantes, principalmente no âmbito das ciências atmosféricas.

Figura 23 – Primeira imagem do TIROS I



Fonte: acervo do autor

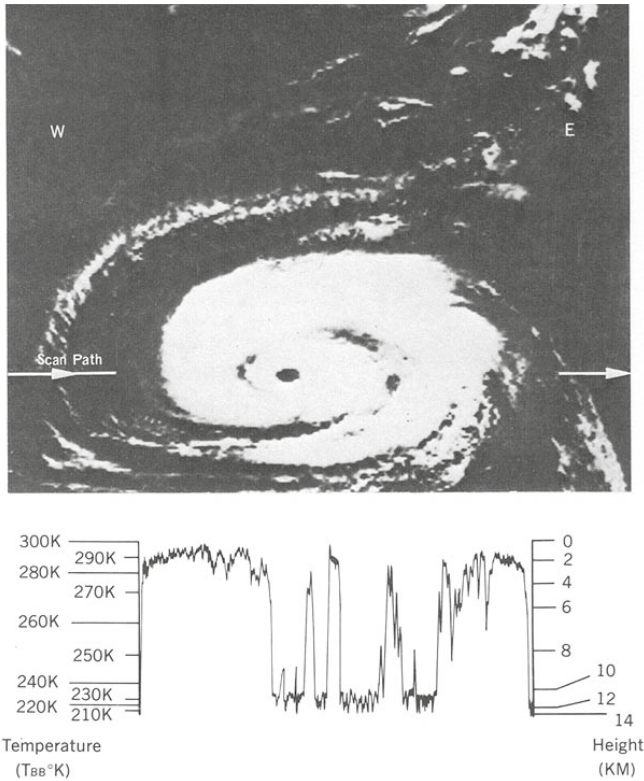
Muita história, muitas fotos, muito incrível e gostoso (eu acho). Mas vamos fazer uma pausa, pois a partir de agora iremos tratar sobre os satélites.

Perfilagens em sistemas meteorológicos, como a do furacão Gladis, permitiram avaliar a temperatura radiométrica da superfície do mar e a espessura do furacão (Figura 24). Começaram a ser obtidas quando do lançamento do NIMBUS 1, em 1964, por meio de seu radiômetro infravermelho de alta definição (High-Resolution Infrared Radiometer - HRIR).

Uma vez dominada a tecnologia dos satélites e de inserir sistemas sensores como suas cargas úteis, estava pronto o terreno para os avanços no sensoriamento remoto. E se olhar para a Terra sempre foi de interesse da humanidade, para as estrelas, então, povoava o imaginário coletivo. Nessa época, o grande objetivo era alcançar nosso satélite natural, a Lua, mas para tal façanha era preciso se mapear toda a sua superfície.

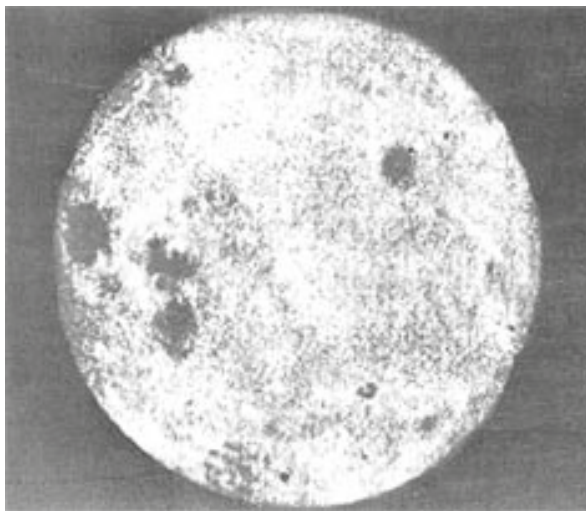
Assim como no lançamento de foguetes, os soviéticos se adiantaram aos americanos e as primeiras fotografias da Lua foram obtidas a partir da LUNA III, colocada em órbita em 1959 (Figura 24). Os soviéticos lançaram a sonda ZOND III, que durante 68 minutos obteve 25 fotos da superfície lunar, com um pouco mais de detalhe.

Figura 24 – Primeira imagem do TIROS I



Fonte: acervo do autor

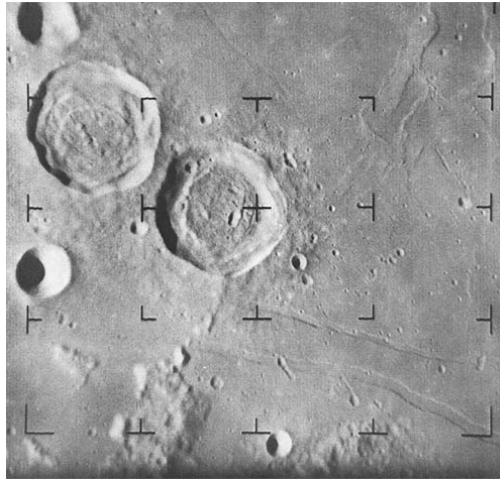
Figura 25 – Primeiras imagens soviéticas da Lua, obtidas a partir da LUNA III



Fonte: acervo do autor

Porém as cenas obtidas tanto pela LUNA como pela ZOND são bem distantes e sem muito detalhamento, mas os americanos se dedicavam a desenvolver um sistema que permitisse a observação mais de perto. Entre 1964 e 1965, os americanos obtiveram diversas cenas detalhadas da superfície da Lua por meio de câmeras de TV instaladas nas sondas RANGER VII, VIII e XI. A Figura 26 apresenta detalhes da superfície lunar obtidos pela RANGER VIII.

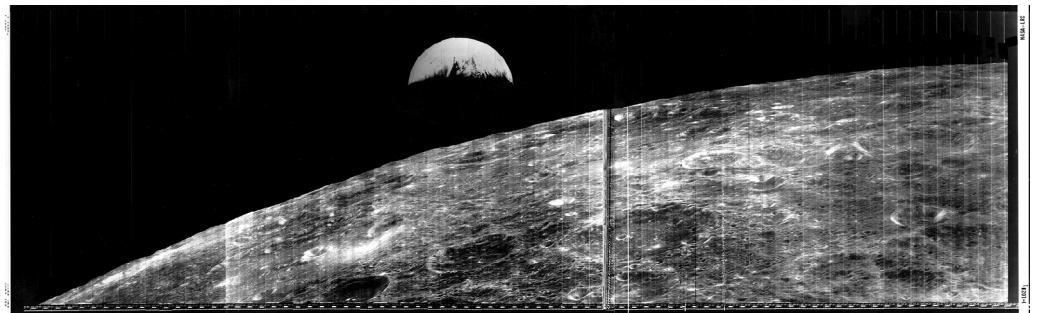
Figura 26 – Imagem obtida pela RANGER VIII, mostrando as crateras Ritter e Sabine, na borda do Mar da Tranquilidade



Fonte: acervo do autor

A primeira visão de nosso planeta por intermédio da órbita da Lua só foi possível em 23 de agosto de 1966, por meio de imagem obtida pela Lunar Orbiter I (Figura 27). Nela, podem-se notar as diversas crateras que nosso satélite natural apresenta, incluindo a cratera Pasteur no centro, logo abaixo da imagem da Terra. Porém, pelo ângulo de incidência solar, a superfície lunar não se apresenta tão detalhada.

Figura 27 – Primeira visão da Terra por intermédio da órbita da Lua em 23 de agosto de 1966, pela Lunar Orbiter I

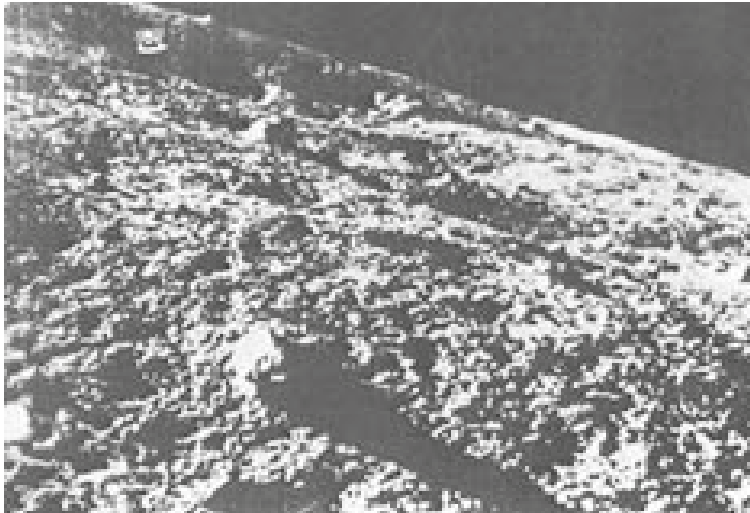


Fonte: acervo do autor

Os soviéticos também inovaram com os pousos na Lua, por meio da série de sondas LUNA. O primeiro pouso foi da LUNA IX que, por meio de câmera de TV, transmitiu em 1966 as primeiras imagens obtidas em solo lunar (Figura 27).

A primeira abordagem americana em solo lunar foi realizada com a série de sondas Surveyor em 1966, que permitiu a obtenção de imagens detalhadas como as fraturas na rocha apresentada na Figura 28, obtida pela Surveyor VII. Apesar de imagens muito nítidas que permitiam um nível de detalhamento invejável, a Surveyor não tinha a mobilidade dos rovers utilizados nas missões a Marte.

Figura 28 – Imagem da Lua obtida pela LUNA IX



Fonte: acervo do autor

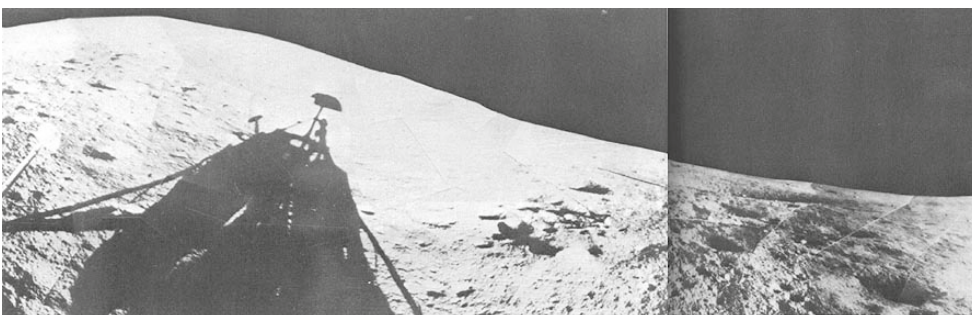
Na figura 29, podemos verificar a sombra da Surveyor I pousada sobre solo lunar. A Surveyor V pousou no Mar da Tranquilidade em 1967, 2 anos antes da chegada de Neil Armstrong a essa superfície.

Figura 29 – Imagem de detalhe de rochas da superfície, destacando fraturas nelas, pela Surveyor VII



Fonte: acervo do autor

Figura 30 – Imagem da sombra da Surveyor I em solo lunar em 1966



Fonte: acervo do autor

Aliás, quando Armstrong alunissou (sim, pois aterrissar é só na Terra) as diversas revistas da época apresentavam o mapa da face iluminada, destacando as diversas crateras e o Mar da Tranquilidade, o local do pouso e, além disso, apresentavam o mapa da face oculta da Lua (as primeiras imagens dessa face foram obtidas em 1959), pois como seus movimentos de rotação e de translação são coincidentes sempre vemos a mesma face e a que não vemos foi chamada de oculta.

E como esses mapas foram gerados? Pelo que chamo de sensoriamento remoto à lenha, ou seja, montando mosaicos com fotografias de grandes formatos e fazendo os mapas a mão, como podemos ver na Figura 30. Note que, no canto superior direito, eles têm um mosaico reduzido para facilitar a montagem do quebra-cabeça.

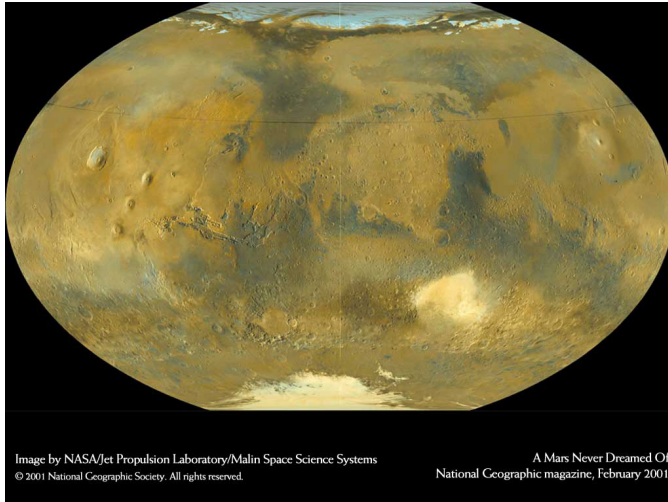
Lembro aos leitores que, até meados da década de 90, não tínhamos impressoras de jato de tinta e nem monitores coloridos, e que, para obtermos os resultados dos processamentos digitais de imagens de sensoriamento remoto, tínhamos que fotografar a tela do monitor especial que funcionava como uma televisão, pois os de microcomputadores eram de fósforo verde. Eu sou dessa época!

Figura 31 – Sensoriamento remoto à lenha



Fonte: acervo do autor

Depois da sequência de viagens à Lua, o novo destino, Marte também passou e passa atualmente por uma série de missões de exploração do planeta vermelho. O processo que vivemos hoje com Marte é muito parecido com o que vivemos com a Lua nas décadas de 50 a 70. A Figura 21 mostra um planisfério publicado na edição americana de fevereiro de 2001 e sua legenda anuncia algo como “Marte como nunca imaginado”.

Figura 32 – Planisfério de Marte

Fonte: acervo do autor

Outros membros do sistema solar já foram figurados, mas recentemente um planeta passou a chamar a atenção por sua distância e por suas peculiaridades: Saturno. A sonda Cassini tem registrado o planeta dos anéis por diversos ângulos e há uma extensa galeria de imagens na internet.

Algumas séries, como as da Gemini e as da Faith, começaram a produzir imagens coloridas da superfície da Terra, porém em escala regional e sem nenhum detalhamento. Além disso, algumas dessas cenas, principalmente da série Gemini, acabam mostrando a curvatura do planeta, por obterem imagens em visada oblíqua, como a mostrada na Figura 33, que apresenta o delta do rio Nilo obtida pela Gemini IV.

Opa, novamente... “a terra é plana?”

Figura 33 – Delta do rio Nilo visto pela Gemini IV

Fonte: acervo do autor

A missão Apollo obteve imagens do planeta e de seu satélite natural, como se pode verificar Figura 34, que mostra a curvatura da Terra e a reflexão especular do sol na lâmina d'água.

Especular: quando a superfície reflete a luz do sol como se funcionasse como um espelho, ou seja, o ângulo de incidência é o mesmo da refletância, chamamos de especular.

Figura 34 – Imagem da Terra obtida na missão Apollo 11



Fonte: acervo do autor

Até hoje, é muito comum que astronautas fotografem a Terra quando se encontram em órbita. Existe, inclusive, um website que mostra fotografias que foram obtidas em missões tripuladas. Acredito ser *The Gateway to Astronaut Photography of Earth*.

A Figura 35 mostra parte do Distrito Federal em 1990, com o Plano Piloto que tem sua forma de avião conhecida e o lago Paranoá em sua porção central. O Parque Nacional de Brasília é o grande polígono de vegetação nativa na porção noroeste da cena, com a represa de Santa Maria nele inserida. Saliento que a imagem foi reduzida a 10% de seu tamanho original e que a mesma originalmente era colorida.

Porém sensoriamento remoto como conhecemos hoje teve um marco significativo que foi o lançamento do *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), em 23 de julho de 1972. Considerado como o primeiro satélite para sensoriamento remoto de recursos terrestres não tripulado, posteriormente o programa ERTS foi renomeado para *Landsat*. Esse satélite trazia dois sistemas sensores com carga útil: o MSS e RBV.

O MSS (*Multispectral Scanner System*) constituía-se em um sistema de varredura multiespectral e o RBV (*Return Beam Vidicon*), um sistema composto por três câmeras de televisão. No próximo capítulo,

apresentaremos o sistema *Landsat* em detalhes.

Figura 35 – Fotografia tirada por astronauta de parte do Distrito Federal em 1990

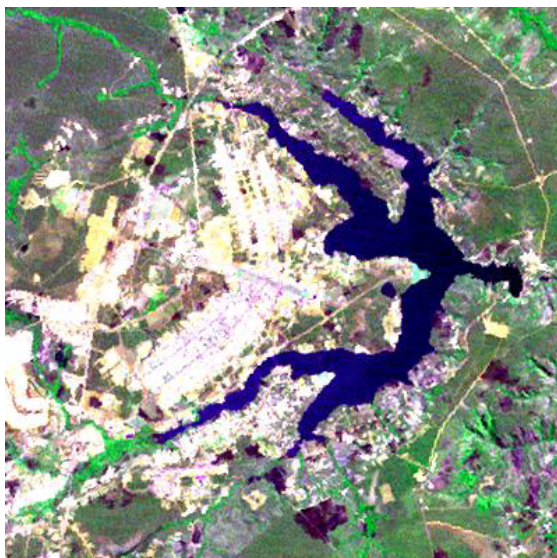


Fonte: acervo do autor

A Figura 36 apresenta a primeira cena disponível comercialmente do sensor MSS de Brasília, datada de 1º de agosto de 1973. Pode-se notar que a Asa Sul foi consolidada primeiro para abrigar os que vinham com a transferência da Capital e, portanto, apresenta-se mais adensada que a Asa Norte, na qual as vias são mais identificáveis.

Além do *Landsat 1*, outros seis satélites dessa série foram lançados e esse é considerado o sistema mais explorado e com o maior número de artigos publicados a partir de seus dados até hoje. De todos, apenas o 6 não obteve imagens, pois se tornou inoperante após seu lançamento.

Figura 36 – Primeiro registro de Brasília em 1º de agosto de 1973 pelo *Landsat 1*



Fonte: acervo do autor

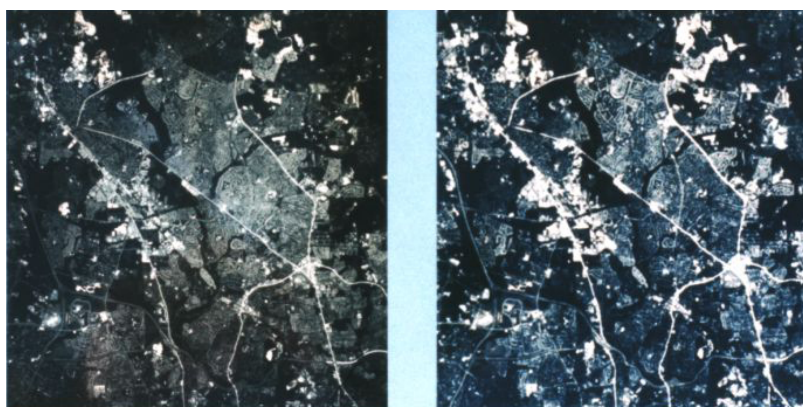
Dizem as más línguas que, até o Landsat 5, sempre havia uma réplica em Terra, mas para baratear os custos e como os cinco primeiros foram bem-sucedidos, resolveram não fazer a do 6, que foi o único que não funcionou. Aliás, o que funcionou foi a lei de Murphy.

Atualmente, o Landsat 7 está indisponível devido a problemas relativos aos seus sistemas de navegação e o Landsat 5 está com seu sistema óptico já bastante míope, o que praticamente reduziu a zero a aquisição de novas cenas ligadas a essa família de sensores. Desde 11 de fevereiro de 2013, quando foi colocado em órbita, o Landsat 8, também conhecido como Landsat Data Continuity Mission, tem suprido as necessidades de obtenção de imagens da superfície terrestre.

Em 1972, também foi colocado em órbita um laboratório espacial que possuía uma tripulação composta por um comandante, um piloto e por um cientista e que obtinha imagens por um sistema de câmera de vídeo e um escâner de varredura multiespectral: o Skylab. Esse laboratório teve três versões, sendo colocadas em órbita em 1972, 1973 e 1974.

A Figura 37 apresenta uma comparação realizada entre uma fotografia aérea de alta resolução tirada em junho de 1973 (à esquerda) e uma imagem obtida por meio do Skylab em agosto do mesmo ano (à direita), visando o mapeamento das informações necessárias ao planejamento do uso do solo urbano.

Figura 37 – Comparação de fotografia aérea de alta resolução e de uma obtida pelo Skylab

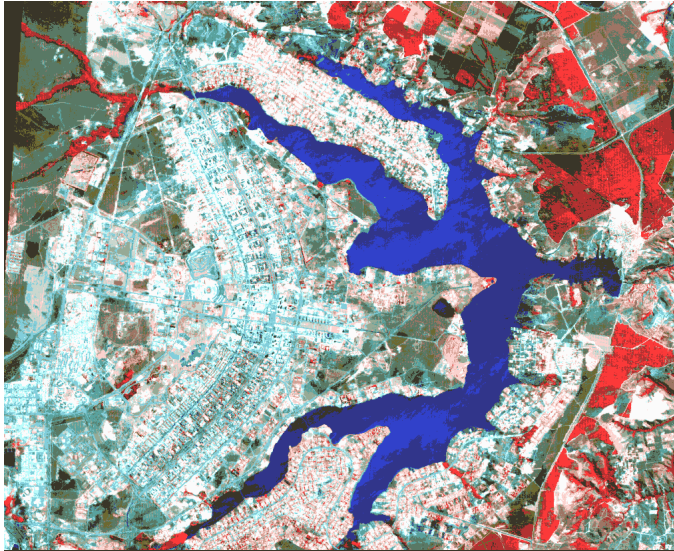


Fonte: acervo do autor

Em fevereiro de 1986, O CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) colocou em órbita o satélite francês SPOT – *Système Probatoire d'Observation de la Terre*. Esse sistema (melhor apresentado no próximo capítulo) foi o primeiro satélite de sensoriamento remoto não tripulado a apresentar a possibilidade da estereoscopia de suas cenas, o que permitia a visualização em 3D. Isso porque seu sistema sensor óptico é duplo e com espelho móvel que possui posicionamento variável, permitindo a aquisição de um par de cenas com recobrimento de uma

mesma porção do terreno com diferentes ângulos de visada. A Figura 38 apresenta uma das primeiras cenas do SPOT de Brasília de 18 de agosto de 1988.

Figura 38 – Imagem de 18 de agosto de 1988 de Brasília do SPOT



Fonte: acervo do autor

Nos últimos anos, assistimos três grandes revoluções paradigmáticas no sensoriamento remoto, que nos fizeram repensar praticamente tudo que conhecíamos até então. Essas revoluções foram os surgimentos dos sistemas hiperespectrais, dos hiperespaciais (que boa parte dos autores brasileiros prefere chamar de sistemas de alta resolução espacial) e os hipertemporais.

Até os sistemas multiespectrais (como o *Landsat*) nosso interesse era saber se o que a cena estava mostrando era, por exemplo, solo exposto. Afinal, esse sistema apresenta seis imagens recobrendo a faixa que chamamos de espectro óptico refletido (irei explicá-lo mais à frente). Com o surgimento dos sistemas hiperespectrais, com cerca de 200 imagens recobrendo a mesma faixa, passamos a ter a possibilidade de saber que era solo exposto, que tinham tantos por cento de argila e que tinha tanto de caulinita e de gibbsita, como composição mineralógica da fração argila, ou seja, o salto qualitativo e quantitativo da informação foi imenso.

No caso dos hiperespaciais, a mudança também foi muito significativa, pois sistemas como o *Landsat* imageavam uma área mínima de 900m² e surgiram novos sistemas que permitiam ver áreas inferiores a 1m². Quer dizer, o nível de detalhamento aumentou consideravelmente e a possibilidade de atualização cartográfica pode ser mais rápida do que a obtida por meio de voos aerofotogramétricos.

Os hipertemporais são os sistemas que permitem revisitas a uma mesma área em um tempo muito pequeno. No caso do *Landsat*, uma área era imageada hoje e só seria novamente daqui a 16 dias. Sistemas

hipertemporais permitem a aquisição de uma imagem pela manhã e outra à noite, o que possibilita a determinação de variações diurnas.

Mas talvez a revolução mais significativa no âmbito do sensoriamento remoto se deu com a sua popularização. O primeiro passo para isso foi dado pela NASA quando da determinação de produtos pré-processados do sistema hipertemporal MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer*), ou seja, disponibilizar uma série de produtos já prontos para sua utilização, tais como, índices de vegetação, temperatura de superfície ou radiométrica, entre outros. Disponibilizar dados prontos para quem não sabe processá-los.

O mais relevante foi, sem dúvida, o *Google Earth*® e sua variação *Google Maps*®. A possibilidade de acessar imagens de satélite do mundo todo e em áreas urbanas ter resoluções do sistema hiperespacial *Quickbird*, com pixels de 0,6 m de lado é um avanço muito grande. As pessoas passaram a ter de graça a possibilidade de verem suas casas, seu bairro, de traçarem rotas, além de acompanhar uma série de eventos com suas rotas detalhadas na imagem. Já faz dois anos que a organização do *Tour de France*, a principal prova de ciclismo do mundo, disponibiliza todos os seus dias de competição no *Google Earth*®.

Em 2005, fiz uma viagem de carro pelos EUA com a família e, antes de chegar lá, indiquei os pontos de saída e de chegada no *Google Earth*® e foi meu guia sem nenhum problema. E no programa eu pude reproduzir a rota me deslocando pela imagem. Sensacional!

É claro que existiram problemas em algumas sugestões de rota, principalmente fora dos EUA. Ao buscar minha rota, entrei no *Google Maps*® e na opção “como chegar” digitei a rota de Campinas à Miami. Um pouco longe, mas me mostrou uma sequência. Ao invés de ir a São Paulo, ele me sugeriu que eu me deslocasse até o Rio de Janeiro, até a Avenida Atlântica, avenida beira-mar de Copacabana. Ao olhar a 32ª etapa da rota, o sistema me sugeriu que eu atravessasse o Oceano Atlântico A NADO! Bobagem, pois são apenas 9.207km de extensão pelo trajeto sugerido, mas acho que pode ser uma solução para os que têm dificuldades em pagar a passagem aérea, além de ser um ótimo exercício. Vale a pena tentar!

Recentemente quis reproduzir a rota e é claro que foi corrigida, mas a época foi muito engraçada!

Capítulo 2

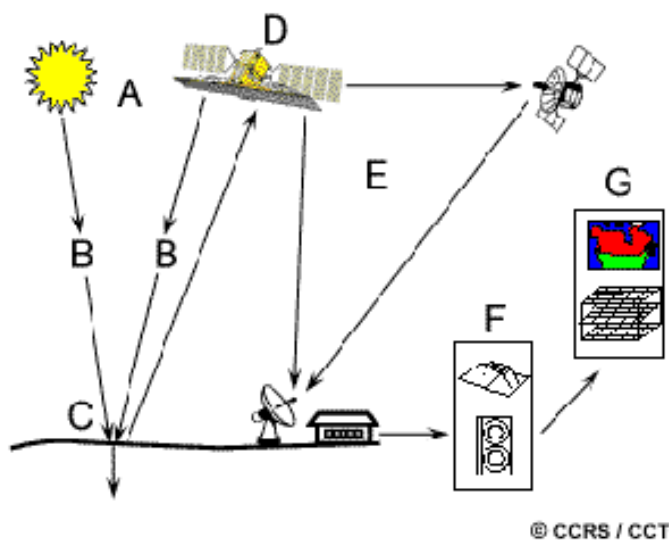
Radiação eletromagnética

Após todo esse apanhado (e longo) histórico sobre o avanço da tecnologia até chegar no sensoriamento remoto, vou agora abordar sobre um dos componentes do sensoriamento remoto.

Todo o sistema possui sete componentes: fonte de radiação eletromagnética (REM) (A); a interação da REM com a atmosfera (B); a interação da REM com os alvos na superfície (C); o sistema sensor (D); a transmissão de dados (E); recepção e processamento dos dados (F); processamento de dados, análise e aplicação (G).

A Figura 39 apresenta um sistema típico de sensoriamento remoto.

Figura 39 – Sistema de sensoriamento remoto



Fonte: acervo do autor

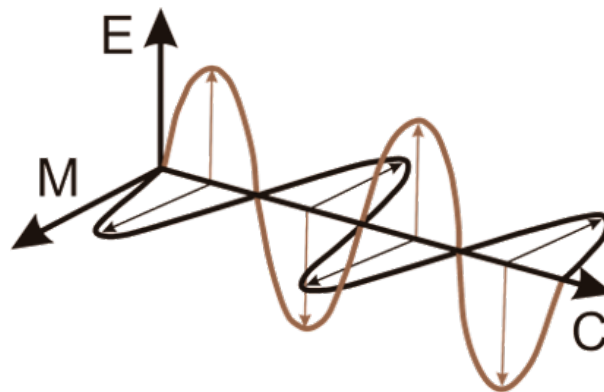
Conforme salientei logo na apresentação, entendo sensoriamento remoto como a aquisição de informações, sem o contato físico entre alvo e sensor. Mas, para que isso seja feito, essa informação precisa, se possível, poder ser transportada pelo espaço sideral, o que muito se aproxima do vácuo. E isso ocorre porque ela é transportada por meio da radiação eletromagnética.

Essa energia eletromagnética ou radiante é a energia transportada na

forma de ondas eletromagnéticas e não necessita de um meio físico para se propagar. É através dela que a informação é transmitida de um objeto ao sensor. A radiação eletromagnética é gerada pela transformação de outras formas de energia, tais como a energia cinética ou de movimento, a química, a térmica, a elétrica, a magnética e a nuclear, sendo capaz de realizar trabalho, provocar aquecimento ou mudança de estado físico.

A radiação eletromagnética consiste em um campo elétrico (E) que varia senoidalmente e em direção perpendicular um campo magnético (M) que é orientado à direita do campo elétrico. Ambos os campos viajam a velocidade da luz (C), ou seja, a 300.000km/s. Isso pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 40, que apresenta os dois campos e a trajetória de deslocamento da onda.

Figura 40 – Radiação eletromagnética



Fonte: acervo do autor

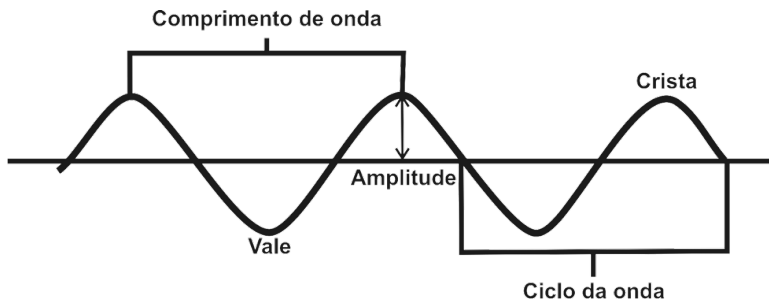
Ela pode ser entendida por meio de dois modelos, um ondulatório e outro corpuscular. No modelo ondulatório, a radiação eletromagnética pode ser entendida como uma onda senoidal e harmônica. Quando uma partícula é carregada eletricamente, ela gera um campo magnético, assim como quando ela é imantada, gera um campo elétrico. Conforme se pode verificar na figura acima, os campos se propagam vibrando de forma ortogonal, gerando perturbações que são chamadas de ondas eletromagnéticas.

Existem algumas características das ondas que devem ser explicadas, pois as utilizamos muito em sensoriamento. Elas são explicitadas na Figura 41. O comprimento de onda (λ) é a distância entre uma crista e outra.

Não confundam com crista de galinha, por favor...

A crista é a porção mais elevada da onda ou seu pico máximo, enquanto o vale é o oposto da crista. O ciclo da onda é um conjunto de uma crista e de um vale e a amplitude da onda é a distância entre o ponto médio da onda e sua crista. Desses conceitos, o mais importante é o comprimento de onda.

Figura 41 – Elementos de uma onda

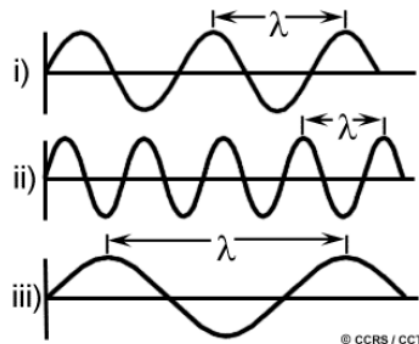


Fonte: acervo do autor

Como a luz viaja a uma velocidade constante de aproximadamente 300.000km/s, o que diferencia uma radiação de outra normalmente é o seu comprimento. A radiação eletromagnética possui um espectro de diferentes faixas que se distinguem umas das outras em função dos diferentes comprimentos de onda, que são medidos em unidades métricas que variam desde bilionésimo do metro, no caso dos raios cósmicos, até os quilômetros, nas ondas de rádio.

A Figura 42 apresenta três ondas eletromagnéticas que se diferenciam pelos seus comprimentos. A primeira apresenta um comprimento médio; a segunda, o menor comprimento das três e a terceira, o maior comprimento de onda, mas todas se propagam à velocidade da luz.

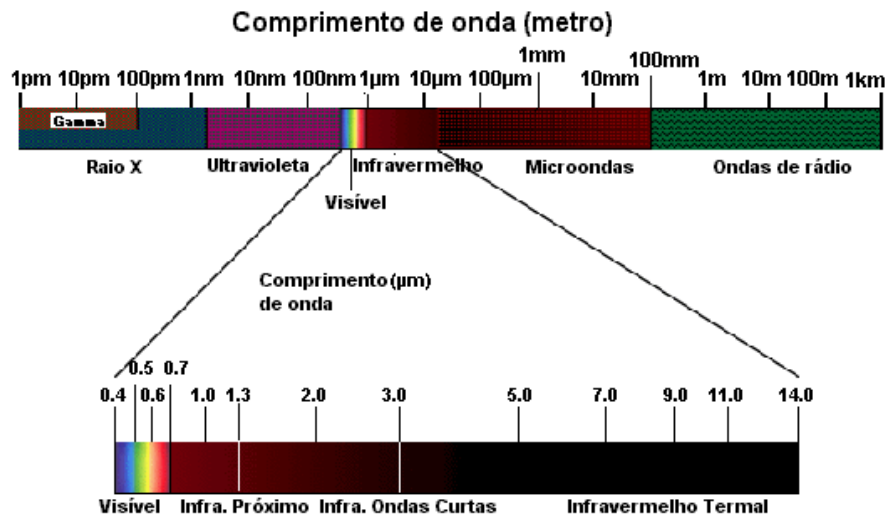
Figura 42 – Diferentes comprimentos de onda (λ)



Fonte: acervo do autor

O espectro eletromagnético (Figura 43) é uma maneira de representar, de forma ordenada, as principais regiões de radiação em função de seus comprimentos de onda. Começam com os raios cósmicos, os raios gama e os raios X, todos com comprimentos da ordem do picômetro (pm) ou 10^{-12} m. Depois vem a região do ultravioleta, seguido da região da luz visível e pelo infravermelho, que são expressos em nanômetros (nm) ou 10^{-9} m e pelo micrômetro (μ m) ou 10^{-6} m. A partir das microondas os comprimentos de onda são expressos em milímetros (mm) ou 10^{-3} m e as ondas de rádio variam do metro (m) ao quilômetro (km).

Figura 43 – Espectro eletromagnético



Fonte: acervo do autor

Em sensoriamento remoto, trabalhamos nas seguintes faixas do espectro eletromagnético: no visível, que vai de 0,4 a 0,76 µm; no infravermelho próximo, de 0,76 a 1,2 µm; no infravermelho de ondas curtas, de 1,2 a 3 µm; de 3 a 5 µm, temos o infravermelho médio; de 8 a 14 µm, no infravermelho termal; e na faixa das micro-ondas na qual atuam os radares, porém seus sistemas não são expressos em comprimento de onda.

No final do capítulo passado, citei o espectro óptico refletido e disse que iria explicá-lo mais à frente. Pois bem, considera-se essa a faixa em que o sensoriamento remoto se baseia na refletância da radiação eletromagnética que incidiu sobre os diversos alvos de superfície. Essa faixa engloba os comprimentos de onda do visível, do infravermelho próximo e do de ondas curtas, ou seja, de 0,4 a 2,5 µm.

Os sistemas de radar são expressos por frequência e não pelo comprimento de onda. Entende-se por frequência da onda a quantidade de ciclos (o conjunto de um vale e de uma crista) que passam por uma determinada seção transversal ou um ponto fixo de referência por segundo. É expressa em *hertz* (Hz) ou ciclos/s.

Para melhor entendê-la, vamos retornar à Figura 44. Se analisarmos a barra inicial da figura como nosso referencial e se imaginarmos as três ondas se deslocando da direita para a esquerda, como elas têm a mesma velocidade [a da luz (c)], notaremos que ao mesmo tempo passarão pela barra diferentes números de ciclos, sendo $2\frac{1}{2}$ ciclos na primeira onda, $4\frac{1}{2}$ na segunda e $1\frac{1}{2}$ na terceira. A onda que passará mais ciclos será justamente a que possui o menor comprimento. Isso mesmo, a frequência (f) é inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ) e isso é expresso da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Bem, como citado anteriormente, o modelo corpuscular é outra maneira de entender a radiação eletromagnética. Por essa teoria, a radiação eletromagnética é composta por unidades discretas ou partículas de energia que são chamadas de FÓTONS ou QUANTA. Ou seja, em uma onda caminham diversos corpúsculos de energia ou os fótons.

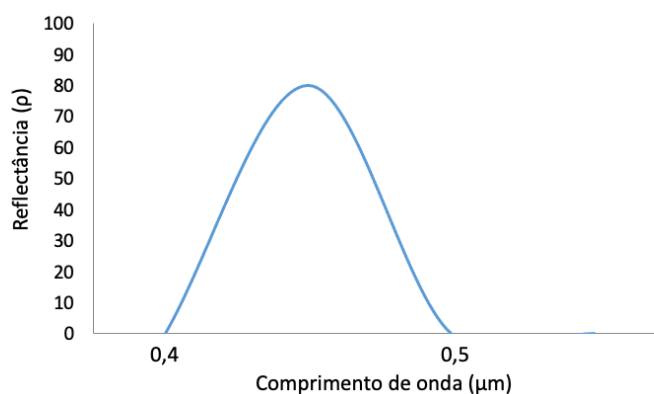
Existem fenômenos que são explicados melhor pelo modelo ondulatório e outros que encontram melhor sentido no modelo corpuscular. Quando falamos dos fenômenos de refletância, de transmitância e de absorbância de energia, tendemos a explicá-los por meio do modelo ondulatório, mas quando falamos de absorbância e emitância, explicamos melhor pelo modelo corpuscular.

Costumo utilizar os seguintes exemplos em aula: se olharmos as roupas dos estudantes, encontramos alguém com uma camiseta azul, outro com uma verde e outro com uma vermelha, além de alguns com camisetas brancas e outros com pretas. Pois bem, se apagarmos a luz da sala e se nenhuma outra luz a adentrar, nós perdemos a diferenciação das cores.

“se nenhuma luz adentrar, perdemos a diferenciação das cores”

Porém, ao ascendermos à lâmpada, temos uma fonte artificial de radiação eletromagnética que enviará ondas eletromagnéticas. Essas serão absorvidas pela pigmentação de cada camiseta de forma diferente, ou seja, os pigmentos da camiseta azul absorverão a radiação eletromagnética nos comprimentos de onda da faixa do verde (0,5 a 0,6 μm) e do vermelho (0,6 a 0,7 μm) e refletirá os do azul (0,4 a 0,5 μm), conforme pode se ver na Figura 33. Afinal, o que chega aos nossos sensores remotos, os nossos olhos, é a porção da radiação que foi refletida pela superfície e nós enxergamos dentro da estreita faixa da luz visível.

Figura 44 – Espectro de refletância hipotético de uma camiseta azul



Fonte: acervo do autor

No caso da camiseta vermelha, a radiação nos comprimentos de onda do azul e do verde é absorvida pelos pigmentos e a porção não absorvida, a faixa do vermelho, é refletida e chega até nossos olhos. Por isso a vemos vermelha. No caso da verde, o processo é o mesmo, mudando apenas as regiões de absorção e de refletância.

Na camiseta branca, todos os comprimentos de onda são refletidos com a mesma intensidade e, na preta, todos os comprimentos são absorvidos. Não existem corpos que sejam 100% refletores ou mesmo absorvedores, mas existem materiais que muito se aproximam desses valores.

Nesses exemplos anteriores, utilizamos o modelo ondulatório o tempo todo, ou seja, falamos de absorção e de reflexão de ondas de comprimentos específicos. E o modelo corpuscular, como seria utilizado? Vamos para isso adotar a camiseta preta e a branca.

Se você expuser as duas camisetas ao Sol, um do lado da outra e no mesmo tempo perceberá que ao aproximar sua mão de cada uma delas, uma estará mais quente que a outra, concorda? Pois bem, sabemos que a camiseta preta absorve a radiação eletromagnética de todos os comprimentos de onda da luz visível, considerada como de pequeno comprimento e chamada comumente de radiação de ondas curtas. Mas o que significa absorver essa energia? Significa absorver os fótons que caminham ao longo da onda.

Ao absorver fótons, o material aumenta seu nível energético, chegando ao chamado estado excitado, porém ele tem de retornar ao seu nível anterior e, para que isso ocorra, tem de se livrar dos fótons absorvidos. Ele o faz emitindo-os de sua superfície sob a forma de ondas longas, ou nos comprimentos de onda do infravermelho termal. Por isso que sua mão sobre a camiseta de cor preta percebe que ela emite calor, pois está se livrando dos fótons que ela absorveu. Como a de cor branca refletiu a radiação que chegou os fótons não foram absorvidos e não houve necessidade de se livrar deles, pois não houve mudança de nível energético.

Stephen Hawking, em seu livro *Uma Breve História do Tempo* (1988), explica de forma fantástica o modelo corpuscular da REM, quando fala sobre os cones de luz futura e diz que se o Sol se extinguísse, nós aqui na Terra só perceberíamos oito minutos depois, que é o tempo que um fóton percorre da lá até aqui.

A energia de um fóton ou quantum é expressa pela seguinte equação:

$$Q = h \times f$$

Onde:

Q = energia do quantum em Joules (J)

h = constante de *Planck* = $6,625 \times 10^{-34}$ J s

f = frequência

Por essa equação, podemos deduzir que a energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência de uma onda e que, portanto, é inversamente proporcional ao comprimento de onda. É por isso que os raios X conseguem penetrar em nossos corpos e trazer as informações dos elementos mais densos que são os ossos, porque ela apresenta comprimentos de onda muito pequenos e, portanto, com muita energia.

A Figura 45 abaixo, apresenta à esquerda a relação da energia com o comprimento de onda e com a frequência das diversas faixas do espectro eletromagnético. À direita, mostra a mesma relação, porém associada às subdivisões da luz visível.

Figura 45 – Esquerda: relação da energia com comprimento de onda e com frequência das diversas faixas do espectro eletromagnético. Direita: a mesma relação, porém associada às subdivisões da luz visível



Fonte: acervo do autor

Como foi dito anteriormente, não existem materiais que sejam 100% absorvedores ou refletores, mas existem materiais que se aproximam dessas características, como é o caso do óxido de bário e de uma substância chamada *spectralon*, referente a uma combinação de óxido de hólmio, óxido de érbio e óxido de disprosio, e que se aproximam de 100% de reflectância.

Mas, para entender um corpo que absorva 100%, temos a lei de *Planck* (equação a seguir). Ela foi desenvolvida para explicar a radiação emitida por um corpo negro em todo o espectro eletromagnético. Porém, como Planck não tinha um objeto que absorvesse 100% da radiação que sobre ele incidisse, ele bolou seu modelo de forma teórica

$$E_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp^{c_2/\lambda T} - 1]}$$

Onde:

E_{λ} = energia ou emitância radiante espectral expressa em $W m^{-2} \mu m^{-1}$;

$$c1 = 3,74151 \times 10^{-6} \text{ W m}^{-2};$$

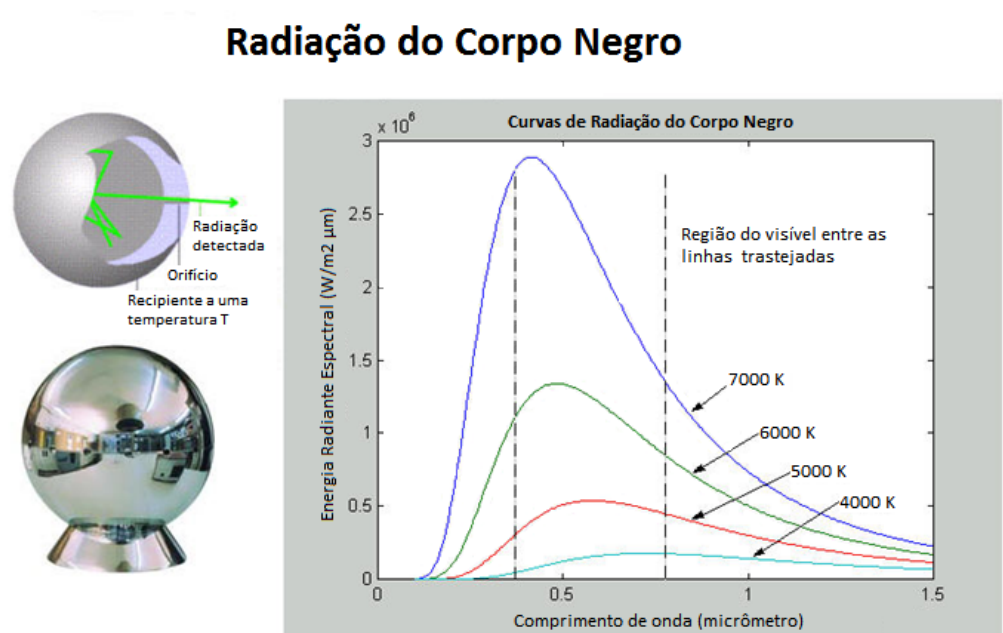
$$c2 = 1,43879 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m K};$$

T = temperatura absoluta medida em Kelvin.

Por meio de uma esfera metálica toda espelhada interiormente e com um pequeno orifício, por onde se introduz um feixe de radiação eletromagnética, pode se simular um corpo negro. Como essa radiação reflete o tempo todo dentro da esfera, acabava ficando aprisionado no seu interior.

Isso fazia com que a esfera possuísse o comportamento similar à de um corpo 100% absorvedor, ou de corpo negro. Além de ser capaz de absorver toda a radiação que sobre ele incide, ele também é capaz de emitir toda a energia que ele possui, por isso, ele explica a forma característica da curva de emissão de cada corpo de acordo com sua temperatura, conforme pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Radiação do Corpo Negro pela lei de Planck.
Destaque para a esfera que simula o corpo negro



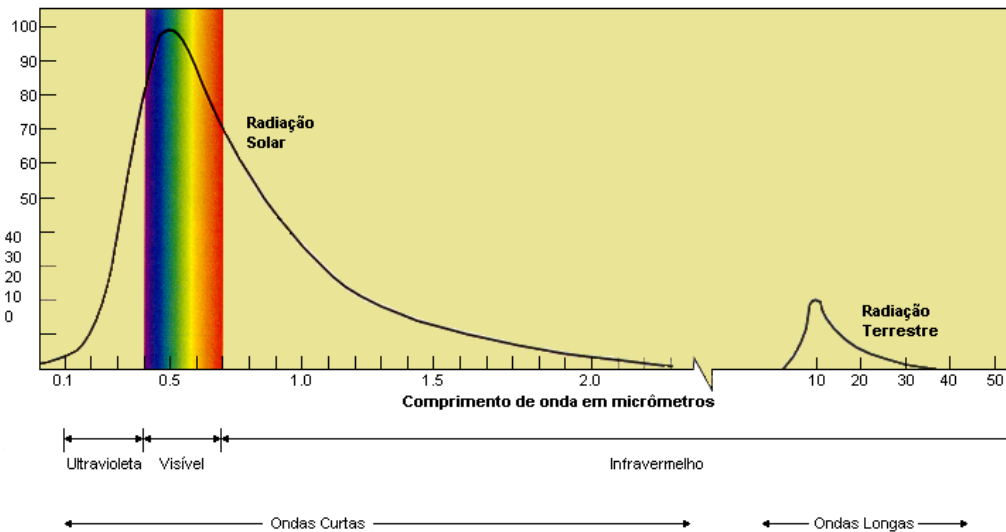
Fonte: acervo do autor

Podemos perceber, tanto na equação de Planck como no gráfico da Figura 46, que realmente há uma relação inversa entre a temperatura e o comprimento de onda no qual temos a maior energia radiante espectral. Se analisarmos que a temperatura do Sol é de aproximadamente 6000K, veremos que um corpo negro a essa temperatura tem seu pico máximo de radiação entorno de 0,5 μm , o que corresponde à transição da faixa do azul para a do verde e sua eficiência como fonte de radiação eletromagnética será do intervalo entre 0,1 a 3,0 μm .

Se tomarmos como temperatura média do planeta Terra como 300K, um corpo negro a essa temperatura emitirá seu máximo de energia radiante

entorno de 10 μm e seu faixa como fonte de REM será de 8 até 35 μm. Por isso, podemos dizer que na faixa do espectro óptico refletido utilizado em sensoriamento remoto, de 0,4 a 2,5 μm o Sol é a fonte de REM e no espectro óptico emitido, de 8 a 14 μm, a Terra é a fonte de radiação eletromagnética. Simplificando, o Sol é a fonte de REM de ondas curtas e a Terra, de ondas longas. A figura abaixo apresenta essa ideia.

Figura 46 – Radiação do Corpo Negro pela lei de Planck. Destaque para a esfera que simula o corpo negro



Fonte: acervo do autor

Qualquer corpo que se encontre em temperatura maior que a do zero absoluto, ou seja, acima de $-273,15^{\circ}\text{C}$, emite radiação eletromagnética de forma contínua. A quantidade de energia que qualquer corpo emite é, dentre outras coisas, função de sua temperatura do corpo. Essa propriedade pode ser expressa pela Lei de Stephan-Boltzman.

$$M = \sigma T^4$$

Onde:

- M = emitância radiante da superfície do material (W m^{-2});
- σ = Constante de Stephan-Boltzman ($5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);
- T = temperatura absoluta medida em Kelvin.

Por essa equação, notamos que há uma relação direta entre emitância radiante e a temperatura e essa relação não é linear, ou seja, um pequeno aumento da temperatura representa um grande aumento na emissão de radiação. Isso também pode ser verificado na figura anterior, pois a diferença nas intensidades dos picos de radiação do Sol em relação à Terra é reflexo da diferença de temperatura dos dois astros. Enquanto o primeiro está 6000K , o segundo apresenta-se com 300K de temperatura.

Da mesma maneira que a energia total emitida por um corpo varia com a temperatura, a distribuição espectral da energia emitida também varia. O comprimento de onda no qual a emissão de energia é máxima pode ser determinado pela Lei do Deslocamento, também conhecida como Lei de Wien, expressa pela equação:

$$\lambda_m = A/T$$

Onde:

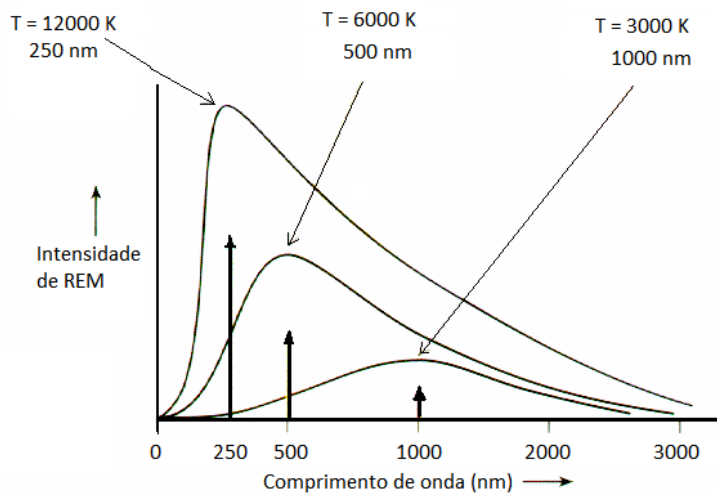
λ_m = comprimento de onda de máxima emissão (nm);

$A = 2898 \text{ nm K}$;

T = temperatura absoluta medida em Kelvin.

Por essa lei podemos explicar a razão da variação de cor, quando uma barra de ferro é aquecida, pois à medida que a temperatura aumenta, diminui o comprimento de onda de máxima emissão. Quando encostamos a barra de ferro na chama e ela começa a se aquecer, ela começa a ficar vermelha, depois vai ficando amarelada e depois azulada. A Figura 47 mostra essa relação e esclarece que, pela Lei de Stephan-Boltzman, há um aumento na intensidade de emissão de radiação eletromagnética.

Figura 47 – Deslocamento e aumento do pico de intensidade de REM em função da temperatura



Fonte: acervo do autor

Capítulo 3

Interação da radiação eletromagnética com a matéria

Se você está continuando a leitura, sugiro dar uma pausa e voltar a este capítulo outro dia. Foram muitas informações históricas e fórmulas matemáticas até agora. É interessante assimilar o conteúdo anterior antes de continuar, certo? Agora, se você está aqui em um novo dia, vamos para frente que tem muita coisa boa para aprender.

Neste capítulo, iremos analisar duas importantes interações da REM com a matéria, sendo que inicialmente trataremos da interferência atmosférica e depois discutiremos a interação com a superfície e finalizaremos com o comportamento espectral dos alvos componentes das cenas.

Se considerarmos todo o espectro eletromagnético, veremos que a Terra possui bloqueadores de algumas radiações e que permite a entrada de outras. Nosso primeiro escudo é o campo magnético do planeta ou a magnetosfera.

A Terra funciona como um grande ímã, cujo magnetismo é formado pelo atrito gerado na rotação do núcleo externo e do interno, que determinam linhas de indução magnética que saem de um polo em direção ao outro, envolvendo e protegendo o planeta.

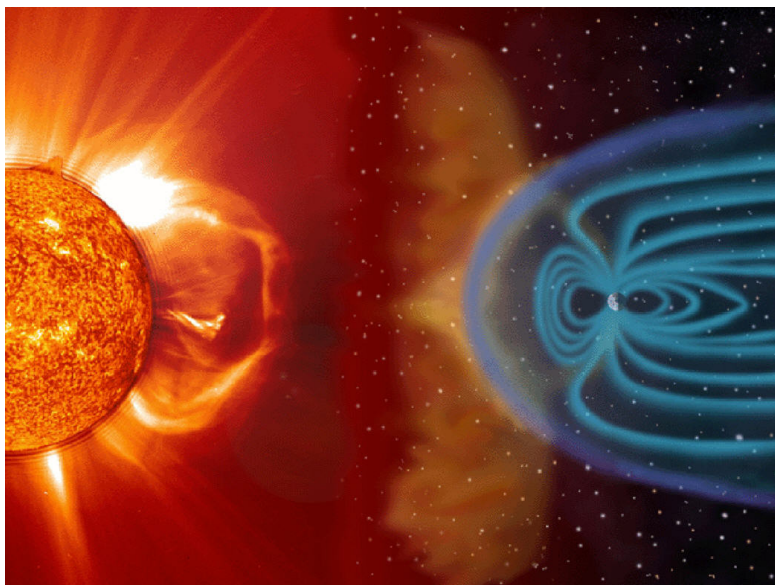
A Figura 38 apresenta a interação do Sol com a magnetosfera. Nela podemos notar que a face que está voltada para o Sol é achatada e que à medida que nos afastamos dessa interferência temos um alongamento do campo magnético da Terra.

Essa esfera magnética que nos protege da radiação mais nociva às espécies existentes na Terra, a de alta frequência, composta pelos raios cósmicos. Essa radiação, como vimos no capítulo anterior, é de alta energia e pode gerar a extinção da vida em nosso planeta.

Para se ter noção de quão poderosa é essa energia, é só pensar em um

fenômeno natural muito comum em altas latitudes: as auroras polares. Os locais de onde saem e chegam as linhas de indução magnética são os locais nos quais o campo é mais frágil, os polos do planeta.

Figura 48 – Interação do Sol com a magnetosfera



Fonte: acervo do autor

Que imagem linda, não acha?

Pois bem, quando a radiação de mais alta frequência consegue penetrar a magnetosfera, ela interage com as camadas mais externas da atmosfera planetária, que se caracterizam por camadas de hidrogênio atômico, seguidos pelo hélio atômico, e assim sucessivamente. Ao incidir sobre esses gases, a radiação cósmica aquece esses gases de tal forma que eles perdem seus elétrons, transformando-se em plasma (4º estado da matéria). As auroras polares nada mais são do que a visualização de folhas de plasma ocasionadas pela interação com a radiação de alta frequência. Chamada de aurora boreal quando ocorrem no hemisfério norte e austral quando no sul.

Ao observarmos a Figura 49, como a mesma foi obtida em visada oblíqua, podemos notar o Sol no topo da imagem à esquerda, a formação de plasma na porção mais externa da atmosfera ou a ionosfera, representada pelo foco de luz branca e, logo a seguir a superfície da Terra com o reflexo especular do Sol sobre a água.

Outro importante filtro de radiação eletromagnética é a camada de ozônio estratosférico. Ela se situa ao longo da estratosfera, porém mais adensada entre 25 a 45 km de altitude em relação à superfície. Nela são bloqueados os comprimentos de onda do ultravioleta, sendo que em função do comprimento de onda, se dividem em UVA, UVB e UVC. Como o comprimento de onda é inversamente proporcional

à frequência, o UVC é a região de maior frequência ou energia e é totalmente bloqueada pelo ozônio estratosférico. Parte de UVB e pouco do UVA são bloqueados e é por isso que os protetores solares são do tipo anti-UVA e anti-UVB.

Figura 49 – Aurora polar vista do ônibus espacial



Fonte: acervo do autor

Se formos considerar a trajetória da radiação eletromagnética da fonte até a superfície, ou da superfície até o sensor, teremos sempre a atmosfera interposta entre eles.

A atmosfera é formada por gases e por uma porção não gasosa (líquida e sólida) chamada de aerossol. Tanto os gases como os aerossóis interferem na radiação incidente ou refletida absorvendo-a ou espalhando-a. Portanto há uma alteração na informação obtida de forma remota.

O espalhamento atmosférico pode ser entendido como sendo a difusão de radiação por meio de partículas na atmosfera. Os processos de espalhamento dependem da distribuição do tamanho dos elementos de espalhamento, de sua composição e concentração e dos comprimentos de onda do fluxo radiante incidente sobre eles.

Alguns pressupostos são assumidos para análise do processo de espalhamento, tais como: os elementos causadores do espalhamento são distribuídos randomicamente; os elementos de espalhamento estão separados suficientemente para que a ação de espalhamento de cada elemento seja independente de seus vizinhos; os elementos não são metálicos, ou seja, não causam absorção; a forma e a anisotropia dos elementos são ignoradas. Após esses pressupostos, Slater (1980) considerou o processo de espalhamento causado somente pela flutuação da densidade na atmosfera, descrita pelo coeficiente de espalhamento Rayleigh ($\beta_{0\lambda}$), conforme a equação a seguir:

$$\beta_{\theta\lambda} = \frac{2\pi^2}{H\lambda^4} [n(\lambda) - 1]^2 + (1 + \cos^2 \theta)$$

Onde H é o número de moléculas por unidade de volume na atmosfera, $n(\lambda)$ é o índice refrativo das moléculas em função do comprimento de onda, θ é o ângulo entre os fluxos incidente e espalhado, e λ é o comprimento de onda do fluxo incidente.

Analisando a equação 3.1, podemos concluir que o fluxo espalhado é inversamente proporcional à densidade da atmosfera H e à quarta potência do comprimento de onda do fluxo incidente. Por isso, há uma tendência muito mais forte de espalhamento para comprimentos de onda menores do que para comprimentos de onda mais longos.

O azul do céu é um exemplo da manifestação do espalhamento *Rayleigh*. Na ausência de espalhamento, o céu apareceria preto, como o visto nas fotos dos astronautas que pousaram na lua (Figura 50). As alunissagens (pousos na Lua) ocorreram sempre na face iluminada do satélite natural, que, como tem rotação e translação coincidente, tem sempre a mesma face voltada para o Sol. Reparem que na foto, os alvos estão iluminados e o céu é preto, pois não ocorre espalhamento *Rayleigh*.

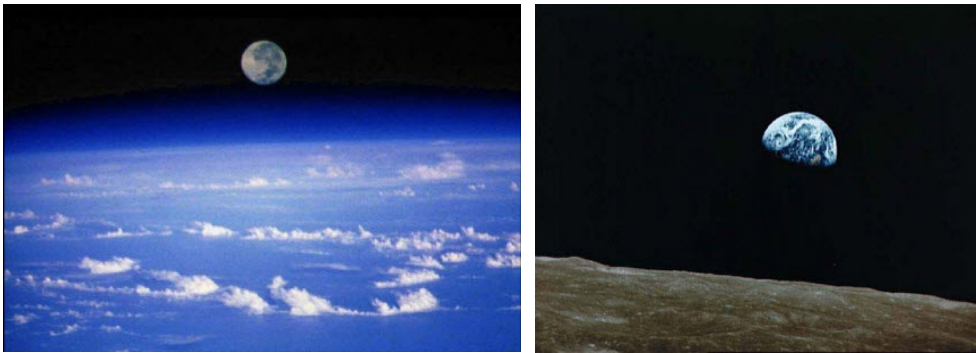
Figura 50 – Fotografia na superfície lunar apresentando ausência de espalhamento *Rayleigh*



Fonte: acervo do autor

É bem interessante observar uma imagem da Lua vista da órbita da Terra e da Terra da órbita da Lua (Figura 51). Na primeira você percebe a atmosfera por causa do espalhamento dos gases ou *Rayleigh*. Já na segunda, não se percebe a presença de atmosfera com a luz espalhada. Aliás, é esse fenômeno físico que é utilizado para estimar a composição química dos gases em atmosferas de outros planetas.

Figura 51 – Esquerda: órbita da Terra com a Lua ao fundo. Direita: órbita da Lua com a Terra ao fundo. Presença e ausência de espalhamento *Rayleigh*



Fonte: acervo do autor

O tipo de espalhamento da atmosfera depende do tamanho da partícula do elemento de espalhamento e sua relação com o comprimento de onda da radiação que está sendo espalhada. Se o diâmetro da partícula for menor que o comprimento de onda, o espalhamento é molecular ou do tipo *Rayleigh*; se for do mesmo tamanho que o comprimento de onda, será espalhamento de aerossóis ou do tipo *Mie*; e, finalmente, se a partícula for maior que o comprimento de onda, é do tipo não seletivo ou o que vemos com a presença de nuvens. O espalhamento do tipo *Mie*, também conhecido como espalhamento de aerossóis, gera uma bruma na atmosfera, que fica turva, muito comum em áreas urbana poluídas. A Figura 52 apresenta os três tipos de espalhamento em uma mesma cena. O azul do céu representa o espalhamento *Rayleigh*, o cinza da parte poluída apresenta o espalhamento *Mie* e as nuvens, o não seletivo.

Figura 52 – Tipos de espalhamento



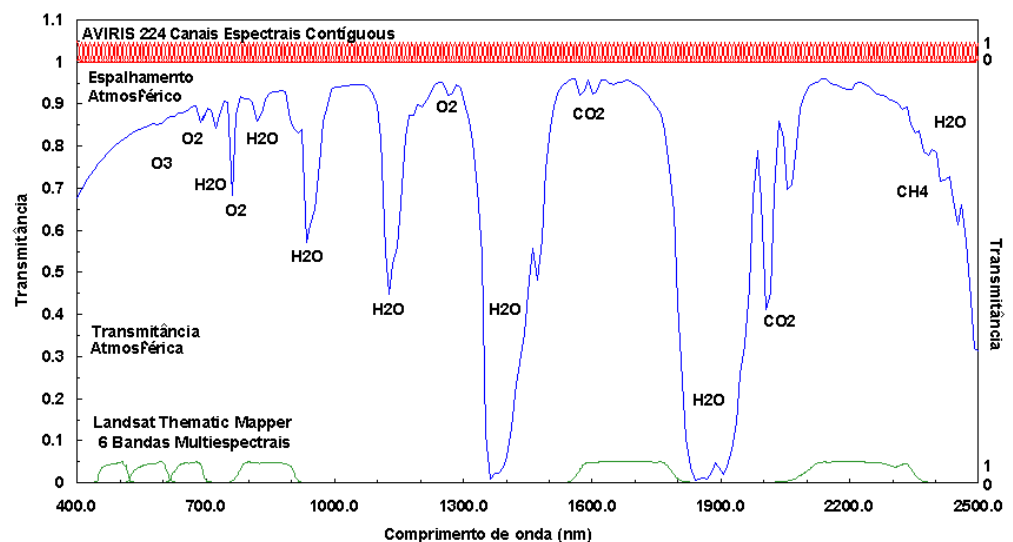
Fonte: acervo do autor

A absorção é uma transformação irreversível da energia radiante em calor. A absorção atmosférica resulta em uma perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos. Da faixa do visível até $0,8 \mu\text{m}$, a absorção da atmosfera limpa é praticamente inexistente, porém, em

uma atmosfera turva ou mesmo poluída, as absorções passam a ser consideráveis. A absorção decorrente do ozônio é bastante forte em 0,29 μm e o vapor d'água e o dióxido de carbono geram feições de absorção na faixa do infravermelho.

Existem aproximadamente trinta gases na atmosfera terrestre, mas a maioria não produz feições de absorção observáveis na faixa do espectro de 0,4 a 2,5 μm . Somente sete gases, o vapor d'água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o óxido nitroso (N_2O), o monóxido de carbono (CO), o metano (CH_4) e o oxigênio (O_2) produzem feições perceptíveis nessa faixa do espectro, que influenciam muito mais dados hiperespectrais do que dados multiespectrais, como pode ser observado nos espectros de transmitância apresentados na Figura 53.

Figura 53 – Tipos de espalhamento



Fonte: acervo do autor

Conforme podemos notar na Figura 53, o vapor d'água apresenta várias feições intensas, e duas delas apresentam 100% de absorção; o dióxido de carbono apresenta feições intensas próximas a 2,0 μm ; o ozônio apresenta uma feição próxima a 0,6 μm , com um pico de absorção de aproximadamente 10%; o óxido nitroso e o monóxido de carbono apresentam feições pouco intensas entre 2,0 e 2,5 μm com picos de absorção variando entre 1 a 2% de intensidade; o metano gera uma feição em torno de 2,35 μm com intensidade de absorção de 20%; o oxigênio apresenta várias bandas na faixa que vai de 0,6 a 1,3 μm .

O espalhamento molecular e por aerossóis é o efeito atmosférico mais importante na faixa do visível, enquanto a absorção de gases da atmosfera é o efeito mais importante na faixa de 1,0 a 2,5 μm .

Capítulo 4

Comportamento espectral de solos, de vegetação, de água e de materiais manufaturados

Ao avaliarmos uma imagem de sensoriamento remoto, vamos encontrar uma diversidade de alvos que varia de localidade para localidade. Mas ao avaliar ambientes urbanos, essa diversidade se intensifica e as interpretações tendem a ser bastante complexas.

Uma imagem de área de floresta apresenta um predomínio de vegetação com estratos vegetais de portes variados; em uma área agrícola, além da vegetação, encontramos várias manchas de solo exposto; em uma área com hidrografia densa, a água é o elemento que vai preponderar. Mas em uma área urbana, encontramos uma área de solo exposto ao lado de um gramado, de asfalto, de telhados, de lagos, enfim, são muitos alvos que podem se misturar e tudo é urbano.

Para avaliarmos as imagens, é de extrema importância entender como cada alvo reflete a luz do Sol.

Ao avaliarmos a radiação eletromagnética que passou pela atmosfera e que sofreu os processos de espalhamento e de absorção, a porção que chegou à superfície é cerca de 45% do que chegou ao topo da atmosfera. Dessa porção, conforme visto no capítulo no qual tratamos a radiação eletromagnética, uma parte é refletida, outra é absorvida e uma terceira porção é transmitida ou passa através do material, como ocorre com as folhas de uma árvore. Portanto, a radiação incidente é resultante do somatório dessas três porções, conforme pode ser visto na Figura 54.

A maioria dos corpos naturais e artificiais apresenta comportamento de reflexão difusa, ou seja, os raios incidem sobre a superfície e são refletidos em diversas direções e com intensidades diferentes. Alguns poucos corpos, como os asfálticos, os corpos d'água, apresentam reflexão especular, ou seja, o ângulo e a incidência são iguais ao de refletância. Porém, para a maioria dos modelos que tratam do tema, utiliza-se o comportamento lambertiano, que reflete a radiação de forma isotrópica, ou seja, em todas as direções com a mesma intensidade, porém ele é teórico. A Figura 55 apresenta esses três comportamentos de reflexão.

Figura 54 – Relação entre a radiação incidente e as porções refletidas, absorvidas e transmitidas

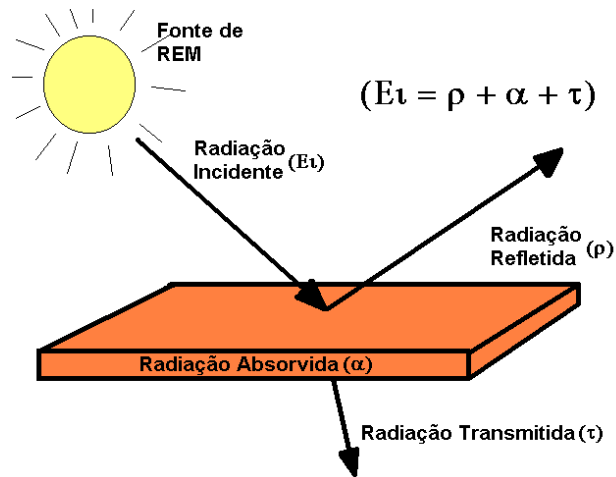
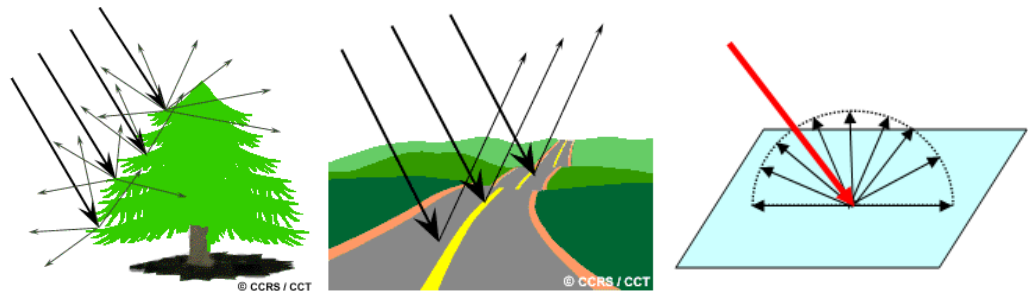


Figura 55 – Refletância difusa, especular e lambertiana, respectivamente



Como visto anteriormente, a energia da radiação depende do comprimento de onda e quanto menor esse comprimento, maior frequência e mais energia ela apresenta.

Vamos tratar agora sobre os comportamentos espectrais dos solos.

Café?

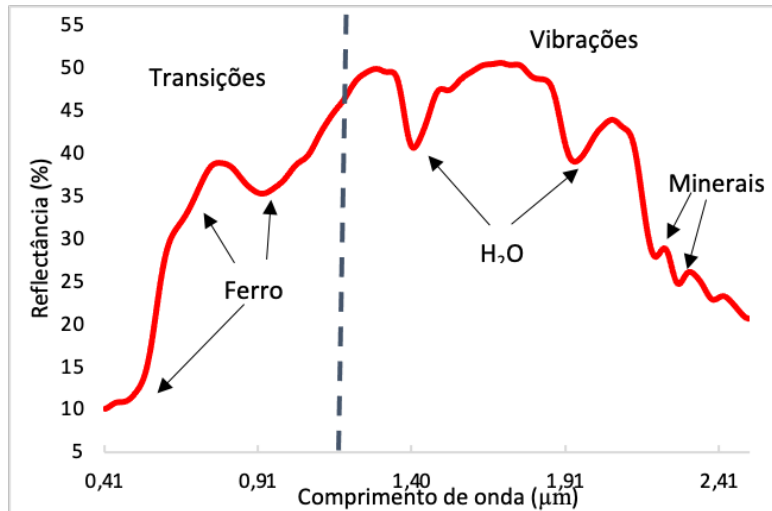
As principais absorções que são percebidas são decorrentes de interações eletrônicas, nos menores comprimentos de onda e de interações com as moléculas nos comprimentos de menor energia.

No caso dos solos, as transições eletrônicas aparecem devido à presença de elementos de transição, como o ferro e o titânio. Já as vibrações moleculares ocorrem devido à presença de água e de hidroxilas nos minerais, principalmente os da fração argila.

Sem entrar muito nos detalhes, um espectro de solos tropicais apresenta na parte do visível e infravermelho próximo as absorções dos óxidos

e hidróxidos de ferro e na porção do infravermelho de ondas curtas, são decorrentes dos minerais da fração argila que apresentam água e hidroxilas nas suas estruturas. A Figura 56 apresenta essas feições de absorção.

Figura 56 – Espectro típico de solos



Fonte: elaborado pelo autor

Dependendo de teor de umidade, dos conteúdos de matéria orgânica, presença de minerais opacos, granulometria, os espectros de solos tendem a mudar, mas em termos de análises urbanas, essas informações são menos importantes, do que a compreensão sobre o comportamento típico. Da mesma maneira, a compreensão do comportamento espectral típico da vegetação.

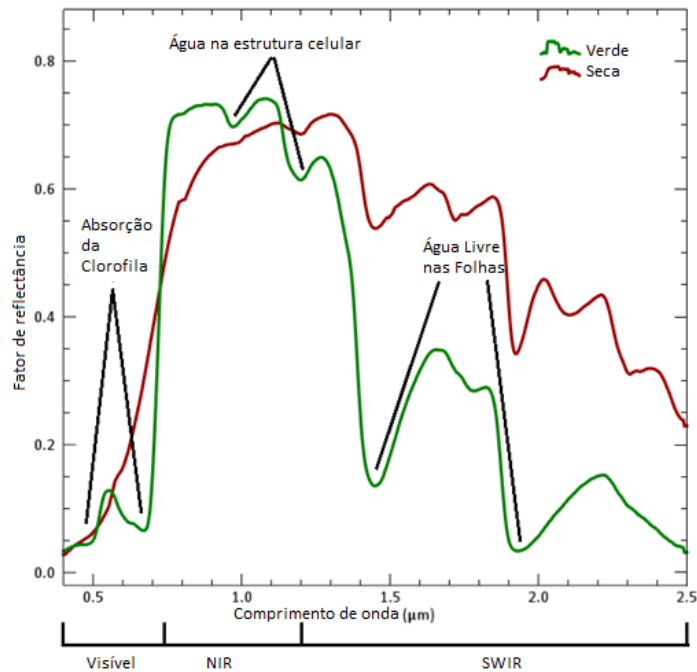
O espectro de vegetação, apresentado na Figura 57, destaca as absorções na faixa do visível decorrentes da clorofila responsáveis pela fotossíntese; no infravermelho próximo (NIR – Near Infrared) que ocorrem por causa da água na estrutura celular; e no infravermelho de ondas curtas (SWIR – *Shotwave Infrared*) devido à presença de água livre nas folhas das plantas.

Já a água se comporta de forma diferente nos três estados. Em seu estado líquido, apresenta baixa reflectância centrada na região do verde e absorvendo todos os comprimentos de onda após o NIR; no estado gasoso, a água apresenta elevado albedo ao longo de todo o espectro óptico refletido, ou seja, de 0,4 a 2,5 µm; no sólido, alto albedo na faixa do visível e do NIR, mas com baixo albedo no SWIR, conforme visto na Figura 58.

Mas quando pensamos em ambientes urbanos, encontramos esses três alvos descritos anteriormente e materiais manufaturados que se apresentam na composição dos pixels. A figura 56 apresenta uma diversidade de materiais de construção que encontramos em cidades. Note que muitos deles se parecem com seus materiais originais. Um

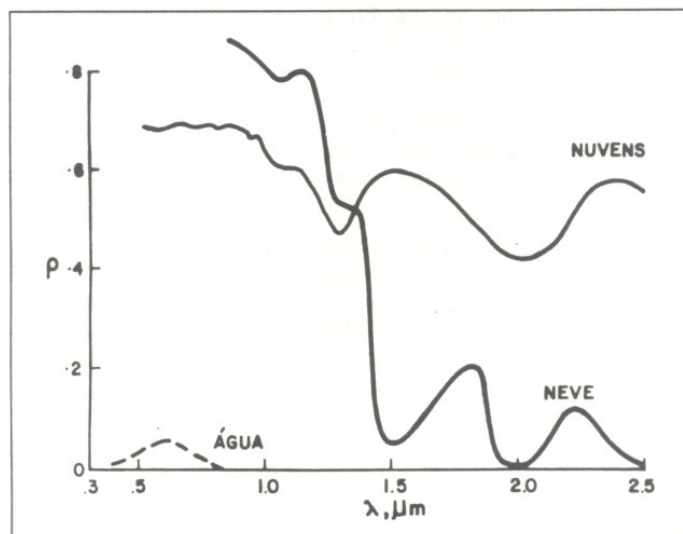
exemplo: o espectro de um tijolo vermelho é semelhante ao de um solo exposto, pois afinal de contas, um tijolo é um solo cozido, então era de se esperar que ele apresentasse comportamento similar. E isso é um grande problema quando nos aproximamos mais da superfície com dados de sensores de alta resolução espacial, pois tudo será classificado como solo exposto pelos métodos tradicionais.

Figura 57 – Espectro típico de vegetação e suas feições espectrais de absorção



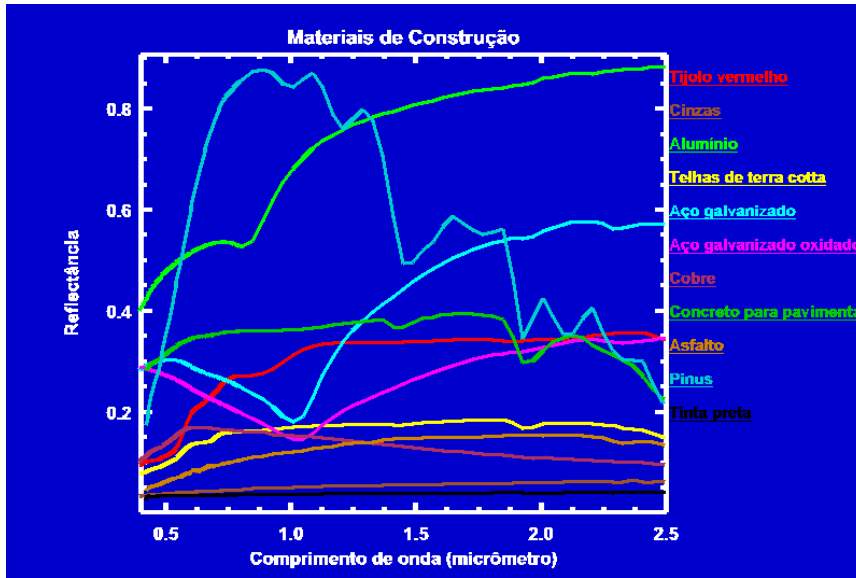
Fonte: acervo do autor

Figura 58 – Comportamento espectral da água nos três estados



Fonte: acervo do autor

Figura 59 – Espectros de material de construção



Fonte: acervo do autor

Capítulo 5

Sistemas sensores

Até agora vimos a porção remota que se verifica por meio da radiação eletromagnética. E para fecharmos a compreensão e o nivelamento teórico, precisamos abordar a parte dos sensores.

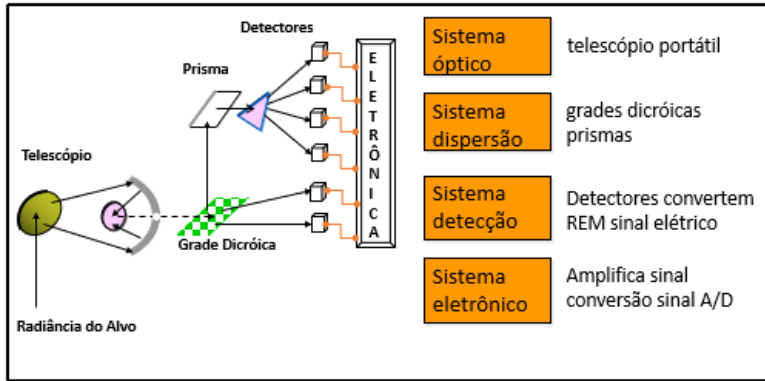
Sensor é algo que capta a informação. No caso dos sistemas sensores utilizados em sensoriamento remoto, temos uma gama de possibilidades, mas abordaremos os mais importantes para os estudos ambientais e urbanos.

Todo sistema sensor pode ser subdividido em quatro subsistemas: o sistema óptico, o de dispersão, o de detecção e o eletrônico. O sistema óptico é formado por espelhos e lentes e faz a “visualização” da superfície. Essa visualização pode ser por varredura mecânica, quando os espelhos se movimentam e “olham” toda a superfície; por meio da varredura eletrônica, quando um arranjo linear de sensores “olham”; e, imageamento instantâneo, quando uma matriz olha toda a área ao mesmo tempo e é bem similar à câmera digital do seu celular.

A radiância que vem dos alvos da superfície, após ser observada pelo sistema óptico, passa por um processo de dispersão da radiação eletromagnética, por meio de prismas e grades dicróicas que separam a radiância em diversos comprimentos de onda. Essa radiação dividida em comprimentos de ondas específicos é encaminhada para os detectores que adquirem essa informação e a convertem em sinal elétrico. Finalmente, tal radiação dividida e captada e transformada em sinal elétrico é amplificada, transformada de analógica para digital e enviada para as antenas na superfície para termos acesso aos dados. Isso de forma bem resumida. A Figura 50 apresenta o sistema sensor genérico.

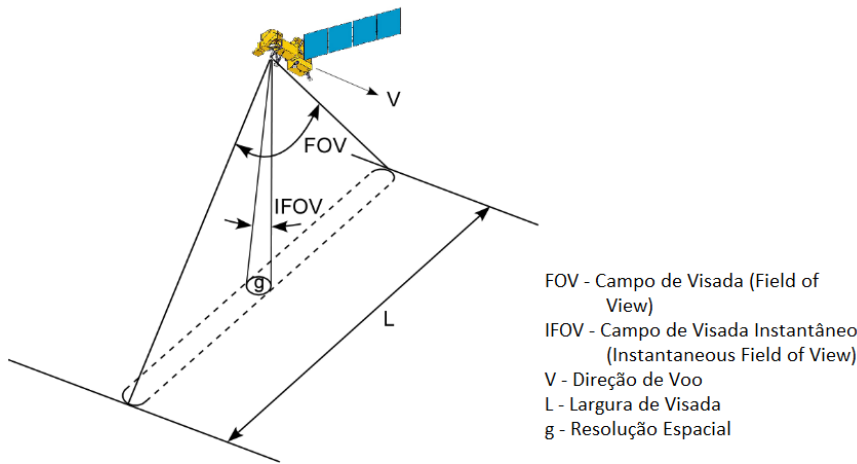
Outro aspecto importante que devemos saber quando estudamos sensores são alguns conceitos apresentados na Figura 51. Todo sistema óptico tem uma área de imageamento, definido como campo de visada ou FOV, sigla em inglês de *Field Of View*, e acaba definindo a largura da cena. Esse campo de visada varia de sensor para sensor. No caso do *Landsat*, essa largura de cena é de 185 km, mas cada área é vista individualmente e define a resolução no campo ou espacial, e esse campo de visada instantâneo é chamado de IFOV. Com isso, começamos a avaliar as resoluções dos sistemas sensores.

Figura 60 – Sistema sensor genérico



Fonte: acervo do autor

Figura 61 – Detalhes da órbita do sensor



Fonte: acervo do autor

Todo o sistema sensor apresenta quatro resoluções que também o diferencia dos demais. Já falamos da resolução espacial que representa a menor área imageada e é definida pela relação entre a distância entre o sistema óptico e os detectores e a altitude do sensor em relação à superfície terrestre. Quando se fala que um sensor tem uma resolução espacial de 30 metros, significa que a menor unidade da imagem ou o *pixel* (elemento pictorial ou *Picture X Element*) tem 30 metros de lado e, portanto, representa uma área de 900 m². Isso quer dizer que todos os elementos que estão dentro dessa área serão apresentados como um valor digital.

A segunda resolução que vamos abordar é a resolução espectral que representa o quanto a radiação eletromagnética foi decomposta pelo sistema dispersor em imagens distintas. O sistema Landsat 5, o caso mais exitoso da história do sensoriamento remoto orbital, obtém simultaneamente uma imagem na faixa da luz azul, uma no verde, uma no vermelho, uma no infravermelho próximo, uma no infravermelho de ondas curtas e uma no termal. Ou seja, a radiação que chegou ao sistema foi decomposta com 7 faixas distintas do espectro. Existem

sistemas que separam essa radiação em centenas de imagens e esses sistemas são chamados de hiperespectrais.

A terceira resolução é chamada de radiométrica. Ela trata da quantidade de informações que podemos obter por pixel. Vamos explicar como funciona. Tudo em computação é binário, ou seja, toda a linguagem computacional pode ser resumida em ligado ou desligado, ou zero ou um. Tudo no computador é um arranjo de zeros e uns ou a quantidade de bits. Quando dizemos que uma imagem tem 8 *bits*, temos uma relação binária de 2 elevado a 8, ou seja, 256 níveis de cinza, sendo o zero como o preto e o 255 como branco e, entre eles, todos os níveis de cinza. Quanto mais bits, mais informações você terá no pixel; se a imagem fosse de 1 *bit* ela apresenta dois elevado a 1 que representa dois níveis apenas, preto e branco.

Finalmente, a quarta resolução é a temporal que representa o tempo que uma área é revisitada pelo sensor. Usando ainda o exemplo do *Landsat*, ele tem uma resolução temporal de 16 dias, ou seja, a cada 16 dias uma nova cena de uma mesma área seja obtida.

Palavras finais

Queridos Estudantes,

A conclusão desse módulo de Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise Ambiental e Urbana é, na verdade, o início de uma nova leitura de espaço. Meu intuito neste módulo foi promover uma provocação e uma inquietação sobre novas perspectivas de observação espacial. Comum em algumas áreas do conhecimento, o sensoriamento remoto aparece como uma forma de agregação de valor e informação ao que normalmente é feito em áreas que ainda não se apropriaram de toda essa potencialidade.

Ao entenderem de cima a cidade e a não cidade, vocês se colocam como os geógrafos, depois cartógrafos, que ficavam no cesto da gávea das caravelas. Vocês agora foram convidados para desenharem o espaço, não mais na toalha de mesa, pois agora o seu cesto é uma plataforma orbital, mas ao computador. Recordo-me de quando, em uma banca de uma aluna minha, uma colega que trabalha com qualidade de lagos disse como era engrandecedor para ela, que sempre pensava o corpo d'água por meio da amostra de água que coletava no vidrinho, que, com dados de sensoriamento remoto, agora conseguia ver literalmente o lago todo.

É isso que espero que vocês tenham adquirido: a vontade de entender mais sobre as potencialidades que os sistemas sensores nos oferecem para adquirirmos informação de forma precisa e científica sobre fenômenos que ocorrem dentro e fora de nossas cidades. É claro que o módulo é um passaporte inicial para ingresso em um mundo enorme e sem limites, uma degustação, um gostinho de quero mais. Mas, como tudo na vida, temos que dar o primeiro passo. Nos anos 80, em um simpósio de sensoriamento em Salvador, em uma quarta-feira à tarde, eu optei por não conhecer o Projeto TAMAR na Praia do Forte com amigos e fiquei 4 horas assistindo um tutorial de radiometria óptica espectral. Aquelas 4 horas definiram toda a minha carreira nos últimos 30 anos. É assim que funciona!

Agora que pixel e albedo não são mais nomes de chiclete e que o incômodo de conhecer uma área que pode muito lhe ajudar em suas análises espaciais se estabeleceu, o negócio é correr atrás e meter a mão na massa! Contem comigo no que eu puder ajudar.

Sucesso e bons imageamentos!

Abraços, Professor Gustavo.

Referências

BAPTISTA, G. M. de M. Daytime and Nighttime Variation of the Urban Heat Island Effect in São Paulo, Brazil, by means of TERRA/MODIS data. In: I **Workshop sobre o sensor MODIS**, 2003, Goiânia. Anais em CD-ROM. Goiânia: UFG, 2003b.

BAPTISTA, G. M. de M. **Ilhas Urbanas de Calor**. Scientific American Brasil, São Paulo, v. 8, n.08, p. 54-59, 2003a.

BAPTISTA, G. M. de M. **Ilhas Urbanas de Calor**. Scientific American Brasil: Aula Aberta, v. 2, p. 24-31, 2010.

BAPTISTA, G. M. de M. **Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Doms Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral**. Geografia (Rio Claro. Impresso), v. 29, p. 189-202, 2004.

BAPTISTA, G. M. de M. **Mapeamento do Sequestro de Carbono: um passo importante para consolidar o protocolo de Quioto**. Revista do Ceam, v. 3, n. 1, p. 101-111, 2015.

BAPTISTA, Gustavo Macedo de Mello. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais**. 1. ed. Brasília: Editora Universa, 2006. v. 1. 212p .

BAPTISTA, G. M. de M.; NASCIMENTO, M. E. M. **Geração de Cenários de Crescimento da Mancha Urbana da Área Metropolitana de Brasília por meio da Série Histórica DMSP-OLS de Dados de Luz Noturna**. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online), v. 68, p. 911-919, 2016.

BAPTISTA, G. M. de M.; RIBEIRO, R. J. da C. Variação Temporal e Tendência de Crescimento da Mancha Urbana de Águas Lindas de Goiás, por Meio de Sensoriamento Remoto. In: Seminário Nacional Governança Urbana e Desenvolvimento Metropolitano, 2010, Natal. Anais do **Seminário Nacional Governança Urbana e Desenvolvimento Metropolitano**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010. v. 1. p. 1-19.

BAPTISTA, G. M. de M.; RIBEIRO, R. J. da C. Avaliação do grau de adensamento urbano por meio de dados de luz noturna e de temperatura de superfície. In: **Seminário Nacional Regimes Urbanos e Governança Metropolitana** - Encontro Nacional do INCT Observatório das Metrôpoles, 2017, Natal. Anais. Natal: Núcleo RMNatal, 2017. v. 1. p. 1-5.

BIAS, E. de S.; BAPTISTA, G. M. de M.; LOMBARDO, M. A. Análise do Fenômeno de Ilhas de Calor Urbanas, por meio da Combinação de Dados LANDSAT e IKONOS. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2003, Belo Horizonte. Anais em CD-Rom. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese. xviii, 598 p. 2011.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley and Sons, Nova York. 1994.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles**: o exemplo de São Paulo. Editora Hucitec, 244 pg., 1985.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, c2004. xvii, 324 p. 2004.

MCKNIGHT, Tom L. **Physical Geography a Landscape Appreciation**. Upper Saddle River, N.J Prentice Hall, 604 pg. 1999.

MENESES, P. R. & ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UnB/CNPq. 276p. 2012.

NOVO, Evlyn. **Sensoriamento Remoto**: Princípios e Aplicações. São Paulo, Edgard Blücher. 363 p. 2008.

PEDROZA DA SILVA, S. C.; BAPTISTA, G. M. de M. **Análises Espectrais da Vegetação com Dados Hyperion e sua Relação com a Concentração e o Fluxo de CO₂ em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira**. Boletim de Ciências Geodésicas (Online), v. 21, p. 354-370, 2015.

RICHARDS, J. A.; XIUPING, J. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4th ed. Berlin: Springer, c2006. XXV, 439 p. 2006.

ROUSE, J. W.; HAAS, R.H., SCHELL, J.A.; DEERING, D.W., "Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS". In: **Proceeding of ERTS-1 Symposium**. Anais, p. 309 317, 1973.

SLATER, P.N. **Remote Sensing**: optics and optical systems. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts. 1980.

ZHANG, Q., SCHAAF, C., SETO, K. C. **The Vegetation Adjusted NTL Urban Index**: A new approach to reduce saturation and increase variation in nighttime luminosity. Remote Sensing of Environment 129, p. 32–41, 2013.

