



MINISTÉRIO DO EQUIPAMENTO SOCIAL

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

SOBRE A AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA: SUSPENSÕES

Lisboa, Janeiro de 1986

Eduardo Manuel Oliveira

Tese apresentada a concurso para a obtenção do grau de
Especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

I&D
TESE
HIDRÁULICA

MINISTERIO DAS OBRAS PUBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICACOES

LABORATORIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRAULICA

Núcleo de Estuários

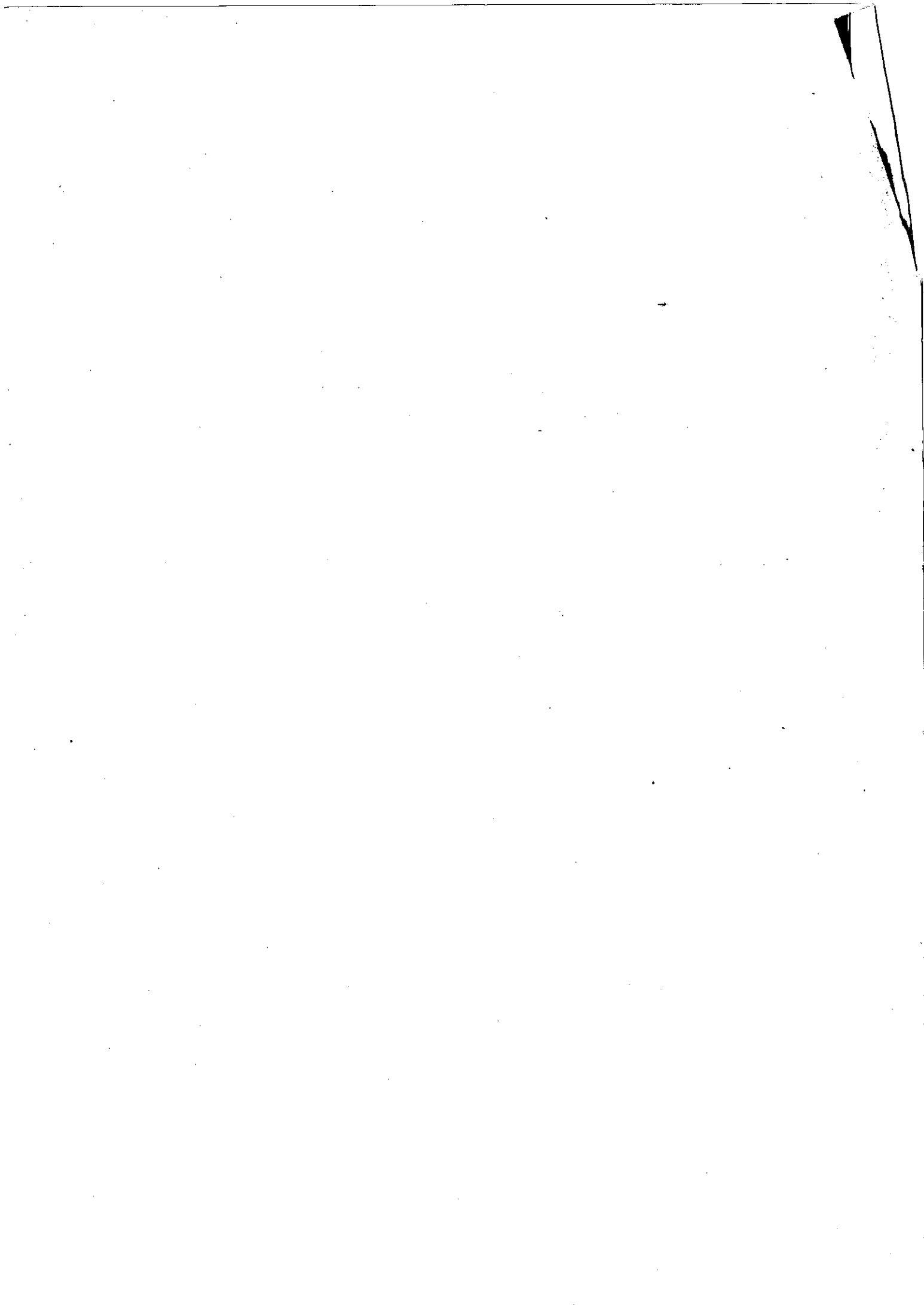
Proc. 64/13/7403

SOBRE A AVALIACAO DE PARAMETROS DE QUALIDADE DE AGUA DO MAR
POR DETECCAO REMOTA: SUSPENSOES

Eduardo Manuel Saraiva Henriques de Oliveira

Tese apresentada a concurso para a obtenção do grau de
Especialista e acesso à categoria de Investigador Auxiliar do
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Lisboa, Janeiro de 1986



Lúria

Eng^o João Ban, Presidente, Sub-Director

Prof. Paulo Peixoto, 1^o Adjunto, Vice-Presidente da Academia
de Ciências de Lisboa, Director do Inst.
Geofísico D. Luís

Eng^o Rui G. Henriques, 2^o Adjunto, Especialista do LNEC

Eng^o Pires Costanhos, Vogal, Chefe do Departamento de Hidráulica
do LNEC

Eng^o Pires Elias, Vogal, Chefe do Núcleo de Estudos
do LNEC

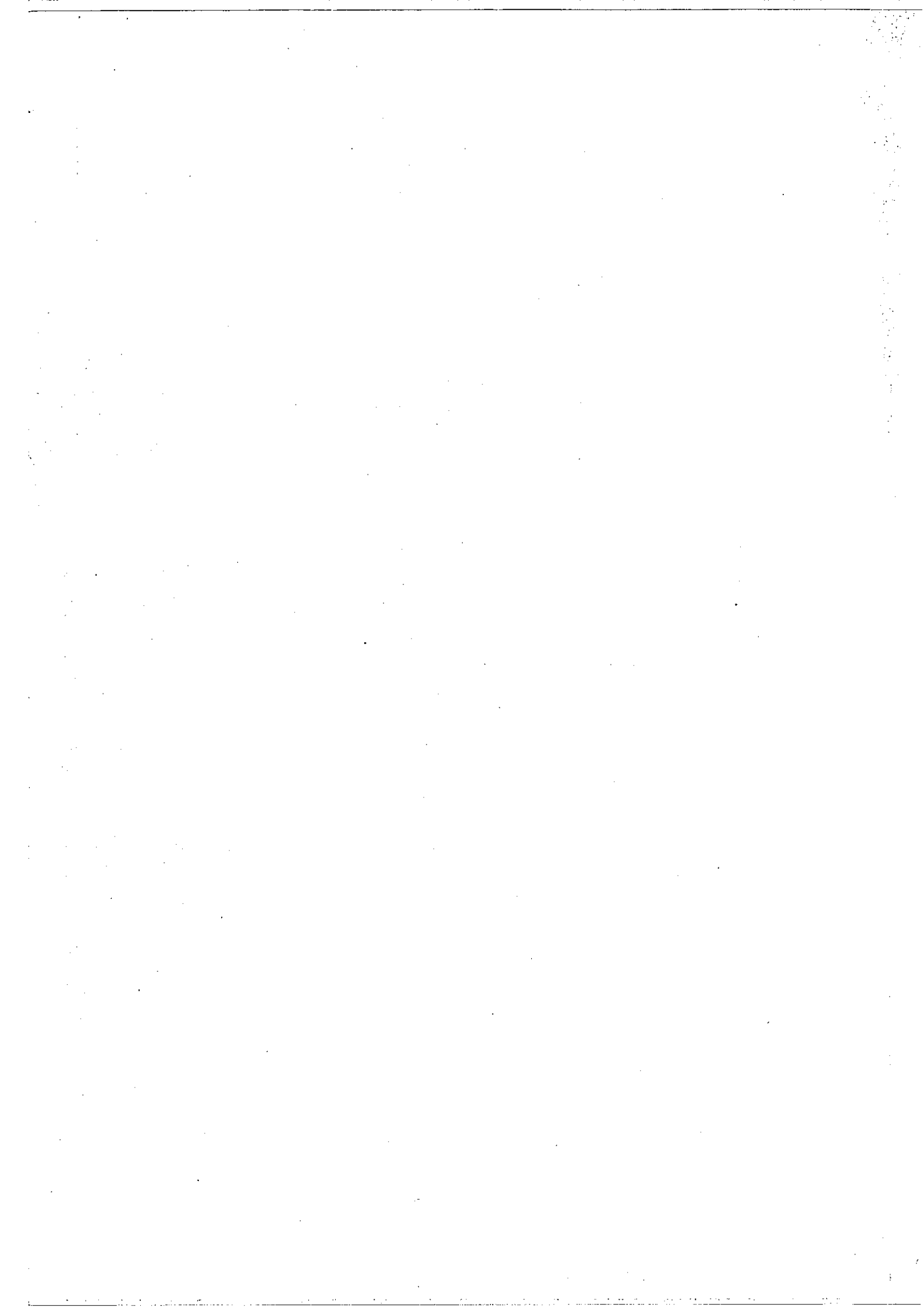
Lisbon, 6 de Maio de 1986

A meus Pais,

A São,

A Mafalda e ao Tio.

Luís de Oliveira



SOBRE A
AVALIAÇÃO DE PARAMETROS DE QUALIDADE DE AGUA DO MAR
POR DETECÇÃO REMOTA: SUSPENSÕES

RESUMO

No âmbito de um projecto de investigação intitulado "Caracterização de Formações Estuárias e do Meio Marítimo Litoral por Técnicas de Detecção Remota", insere-se o estudo da avaliação de suspensões na água do mar com recurso à aplicação de técnicas de detecção remota como meio de caracterização de parâmetros de qualidade de água. O trabalho que se apresenta foi desenvolvido com os seguintes objectivos:

- 1- Desenvolvimento de metodologias de análise e quantificação de suspensões na água do mar a partir de dados de satélite;
- 2- Implementação sob forma de programas para computador de modelos de quantificação de suspensões orgânicas e inorgânicas na água do mar, a aplicar aos dados do radiómetro CZCS do satélite NIMBUS-7;
- 3- Aplicação e verificação do modelo ao litoral português.

Com vista à consecução destes objectivos, começa-se por apresentar uma extensa análise das formas de abordagem do problema, enumerando-se os diversos métodos actualmente seguidos, nomeadamente o Empírico, o Teórico e, neste, os métodos microscópico e macroscópico.

Com base nesta análise, propõe-se um modelo numérico de quantificação das suspensões a partir dos dados do radiómetro CZCS do satélite NIMBUS-7, o qual, embora empírico na sua formulação como a maioria dos actualmente existentes, se apoia no comportamento radiométrico da água do mar e dos seus constituintes típicos, cujas características se apresentam também.

A implementação prática do modelo exige a filtragem da componente atmosférica presente nos dados radiométricos. Com este objectivo, apresenta-se um modelo baseado na metodologia correntemente utilizada. Consiste na consideração da difusão simples, causada pelos constituintes básicos da atmosfera (moléculas gasosas, aerossóis e ozono) na gama de comprimentos de onda considerada (440, 520, 550 e 670nm). Esta metodologia conduz, porém, a um sistema de equações indeterminado e que é resolvido pela consideração de uma equação "exterior" ao processo de transferência radiativa que tem lugar na atmosfera. Para este efeito, utilizou-se a equação de Smith e Wilson por ser a mais divulgada, ressalvando-se, contudo, a necessidade de verificação da sua efectiva aplicação às águas do litoral português, o que não foi possível concretizar dada a inexistência de dados.

Os programas desenvolvidos na linha preconizada pelo 2o. objectivo são apresentados passo a passo, descrevendo-se pormenorizadamente as fases de cálculo mais importantes, particularmente a referente ao processo de correcção atmosférica. Na sua elaboração, utilizou-se uma metodologia de programação modular que se apresenta ao utilizador como uma sequência de menus correspondentes a opções de cálculo apropriadamente encadeadas até à obtenção do resultado procurado. Considera-se ser, não só uma das formas de programação mais actuais, como a que permite o melhor aproveitamento das capacidades do equipamento disponível e o desenvolvimento futuro dos algoritmos sem modificações apreciáveis da estrutura básica. Além disso, oferece ao utilizador flexibilidade e segurança na sua utilização, requisitos tomados como essenciais na sua concepção.

A fundamentação do modelo proposto não pôde ser comprovada pela não disponibilidade atempada dos dados radiométricos, que, por sua vez, impediu a satisfação do 3o. objectivo. Por esse motivo, as conclusões do trabalho apontam para a necessidade de prosseguimento de actuações futuras neste domínio. Nesta perspectiva, salienta-se a conveniência da realização de campanhas de observações radiométricas para caracterização das águas litorais portuguesas.

Na especificação dos trabalhos subsequentes, a necessidade da cooperação inter-institucional é particularmente evidenciada, como forma de aproveitamento eficaz dos recursos humanos e materiais existentes e utilização adequada das capacidades e vocações estabelecidas.

Completa este documento um conjunto de cinco textos de apoio ao trabalho apresentado, sobre Princípios Físico-Matemáticos da Detecção Remota; Sistemas de Coordenadas Celestes e Terrestres; O Tempo; Mecânica Orbital dos Satélites de Detecção Remota; O Satélite Nimbus-7; o Radiómetro CZCS e os Dados CRT; e um Glossário de siglas e termos correntemente utilizados nesta especialidade.

ON THE ASSESSMENT OF SEA WATER QUALITY PARAMETERS
BY REMOTE SENSING: SUSPENSIONS

ABSTRACT

A numeric model for the evaluation of organic (chlorophyll *a*) and inorganic (sediment) suspended load in coastal waters has been developed as a subproject of a research programme presently being carried out at the Estuaries Division of LNEC for the use of remote sensing techniques in the marine environment.

The objectives of this work were:

- 1- Development of the appropriate methodology for the analysis and quantitative assessment of suspended load in sea water, from satellite data;
- 2- Development of computer programs for the quantitative assessment of organic and inorganic suspended load in sea water, to be applied to Nimbus-7 CZCS CRT data;
- 3- Application and verification of the model developed in Portuguese coastal waters.

For the completion of these aims, an extensive review of the state-of-art in this subject is firstly presented, through the listing of current approaches, namely the Empirical method, the Theoretical method and, regarding this last one, the microscopic and the macroscopic models, according to Nicodemus classification as referred to by Holzer.

Based upon this analysis and the radiometric behaviour of sea water and of typical constituents (suspended load), which characteristics are also studied, a "power law" model for the quantitative assessment of both organic and inorganic suspensions is proposed. Although empirical in its formulation, like most of similar present models, a thorough discussion of the proposed explicative variable is also presented, as adequate radiometric data have not been provided in time for the model calibration.

To achieve practical implementation of the model as a set of computer programs, the atmospheric correction of the radiometric data must be previously performed. In this regard, current methodology is discussed (single scattering theory, position and wavelength independency of the phase function, and proportionality of the aerosol radiance in two wave bands are assumed). The radiative transfer equations in the first four CZCS wavelengths are solved through the application of Smith and Wilson 1980 equation, although its appropriate applicability to the Portuguese coastal waters should be confirmed.

The computer programs are presented in a stepwise basis, including detailed description of the most relevant phases of the computations, particularly the process of atmospheric correction. A modular programming methodology was chosen when designing the computer

programs. In this way, best achievement of the available equipment characteristics (PDP11/34A) is attained, enabling, furthermore, future developments of the algorithms without significant modification of the basic framework. This methodology turned out into a "menu" like sequence of several alternative options, giving the user an appropriate choice to follow up as the computation proceeds.

Convenient verification of the proposed model was not possible to achieve due to lack of radiometric data, which disabled, as well, accomplishment of 3rd objective. Hence, conclusion of the work performed points out the need for appropriate field measurements, which will then enable the characterization of Portuguese coastal waters, and, henceforth, the dully calibration of the model.

As far as perspective of subsequent studies are concerned, the need for inter-institutional cooperation is stressed, as a way to achieve adequate management of present human and equipment resources ascribed to remote sensing and related field activities, taking advantage of the available capabilities and institutionalised specialization.

This document is completed with a set of five reports written in support of the work being presented. The subjects are: The Physics and Mathematics Principles of Remote Sensing; Celestial and Terrestrial Coordinate Systems. Time; Orbital Mechanics of Remote Sensing Satellites; Nimbus-7 Satellite, CZCS Radiometer and CRT Data; and a Glossary of logos and terms currently used in this specialised field.

INDICE

SOBRE A AVALIAÇÃO DE PARAMETROS DE QUALIDADE DE AGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA: SUSPENSÕES

CAPITULO 1 : INTRODUÇÃO

1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	BREVE DESCRIÇÃO DO TRABALHO	2
1.2.1	Antecedentes. Motivação	2
1.2.2	Opções Tomadas	6
1.2.3	Objectivos	8
1.2.4	Resultados Alcançados	9
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	9
1.4	NOTA FINAL	11
1.4.1	Sobre a Terminologia Usada	11
1.4.2	Outros Aspectos Formais	12
1.4.2.1	Agradecimentos	12

CAPITULO 2 : AVALIAÇÃO DE PARAMETROS DE QUALIDADE DA AGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA

2.1	INTRODUÇÃO	17
2.1.1	Considerações Prévias	17
2.1.2	Posição do Problema	19
2.2	ABORDAGEM DO PROBLEMA	21
2.2.1	O Método Empírico.	22
2.2.1.1	Análise Crítica do Método.	22
2.2.1.2	Correcção de Alguns dos Inconvenientes do Método.	23
2.2.1.3	Tipos de Algoritmos do Método Empírico.	27
2.2.1.4	A Questão da Universalidade dos Algoritmos.	31

2.2.2	O Método Teórico ou Racional	32
2.2.2.1	Modelo Macroscópico	34
2.2.2.2	Modelo Microscópico	39
2.2.2.3	Análise Comparativa dos Dois Métodos Teóricos	45
2.2.2.4	Os Algoritmos do Método Teórico	46
2.3	PROPOSTA DE MODELO DE AVALIAÇÃO DE SUSPENSÕES DA ÁGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA	50
2.3.1	Considerações Prévias	50
2.3.2	Análise do Comportamento Óptico da Água do Mar	52
2.3.3	O Modelo Proposto	55
2.3.3.1	Razões de uma Escolha	56
2.3.3.2	Apresentação de Alguns Modelos Conhecidos	63
2.4	OPERACÕES DE CORRECÇÃO ATMOSFÉRICA NOS DADOS OBTIDOS POR DETECÇÃO REMOTA	65
2.4.1	Considerações Gerais	65
2.4.2	Descrição do Processo Físico	66
2.4.3	Modelo de Correção Atmosférica	71
2.4.3.1	Cálculo dos Coeficientes $K(\lambda_i, \lambda_o)$	73
2.4.3.2	Cálculo da Radiação Devida à Difusão de Rayleigh	75
2.4.3.3	Análise Crítica do Método de Correção Atmosférica	78
2.4.4	Proposta de Modelo de Correção Atmosférica	81

CAPÍTULO 3 : PROGRAMA DE CÁLCULO DE SUSPENSÕES NA ÁGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA

3.1	INTRODUÇÃO	89
3.1.1	Ideias-Base que Presidiram ao Desenvolvimento do Algoritmo	89
3.1.1.1	Objectivos Visados	90
3.1.1.2	Características dos Dados	90
3.1.1.3	Forma de Apresentação dos Resultados	91
3.1.1.4	Modo de Utilização e/ou Exploração dos Programas	91
3.1.1.5	Equipamento Disponível	92
3.1.2	Caracterização dos Dados Utilizados	93
3.1.2.1	Generalidades	93
3.1.2.2	O Radiómetro CZCS	95
3.1.2.3	Os Dados CZCS CRT	97
3.1.3	Caracterização do Sistema de Processamento Digital Utilizado	98
3.1.4	Apresentação Genérica dos Programas.	101

3.1.4.1	Programas de Apresentação, de Descrição dos Dados e de Inicialização	101
3.1.4.2	Programas de Correção Atmosférica	103
3.1.4.3	Programas de Cálculo de Suspensões.	103
3.2	DESCRIÇÃO DO ALGORITMO	104
3.2.1	Programas de Inicialização e Listagem do Conteúdo da Banda Magnética	104
3.2.2	Programas de Seleção da Zona da Imagem a Processar	106
3.2.2.1	Visualização da Imagem	106
3.2.2.2	Identificação da Zona a Processar	108
3.2.2.3	Identificação e Supressão das 'Classes' 'Continente' e 'Nuvens',	109
3.2.2.4	Constituição dos Ficheiros da Zona a Processar.	110
3.2.2.5	Coefficientes de Calibração, ou como Recuperar os Valores Radiométricos Observados	111
3.2.3	Programas de Correção Atmosférica	117
3.2.3.1	Cálculo dos Elementos Geométricos	119
3.2.3.2	Cálculo da Radiação de Rayleigh	129
3.2.3.3	Cálculo do Coeficiente de Proporcionalidade, $K(\lambda_i, \lambda_o)$	130
3.2.3.4	Conversão dos Valores Codificados das Radiações Captadas pelo Radiómetro	130
3.2.3.5	Cálculo da Transmissividade Atmosférica Total	131
3.2.3.6	Cálculo da Radiação Emergente da Asua	131
3.2.3.7	Cálculo da Radiação da Asua nos Pixels não Localizados	132
3.2.3.8	Cálculo da Irradiância	133
3.2.3.9	Cálculo da Reflectância	134
3.2.3.10	Constituição dos Ficheiros Corridos	135
3.2.3.11	Descrição do Organograma do Algoritmo de Correção Atmosférica	140
3.2.4	Programas de Cálculo das Suspensões e de Apresentação de Resultados	141
3.2.4.1	Cálculo de Suspensões Orgânicas	142
3.2.4.2	Cálculo de Suspensões Inorgânicas	144
3.2.4.3	Modelos Implementados para o Cálculo de Suspensões	144
3.3	MODO DE OPERAÇÃO	145
3.3.1	Apresentação Genérica	145
3.3.2	Os Menus	146
3.3.2.1	Seleção das Opções de Base (Menu 1)	146
3.3.2.2	Seleção do Tipo de Resultado da Correção Atmosférica (Menu 2.1)	147

3.3.2.3	Seleccão do Tipo de Suspensões a Calcular (Menu 3.1)	147
3.3.2.4	Seleccão dos Modelos de Cálculo (Menus 3.1.1 e 3.1.2)	147
3.3.3	Introduccão de Parâmetros	148
3.3.4	Considerações Finais	149

CAPITULO 4 : CONCLUSOES. PERSPECTIVAS FUTURAS

4.1	APRECIACAO CRITICA DO TRABALHO REALIZADO	153
4.1.1	Revisão dos Objectivos Preconizados	153
4.1.2	Apreciação Crítica do Trabalho Realizado	154
4.2	PERSPECTIVAS DE ACTUACAO FUTURA	156
4.2.1	Prosseguimento do Trabalho de Investisacção neste Dominio	156
4.2.1.1	Estudo da Viabilidade do Modelo Proposto	156
4.2.1.2	Estudo do Comportamento Radiométrico da Atmosfera	157
4.2.1.3	Aplicacção da Metodologia a Outros Tipos de Dados	158
4.2.2	Estudo de Outros Parâmetros de Qualidade de Agua por Deteccão Remota	159
4.2.3	Prosseguimento dos Estudos de Aplicacção de Técnicas de Deteccão Remota no Meio Marítimo e nos Estuários	161
4.3	OBSERVACOES FINAIS	163

APENDICE A : PRINCIPIOS FISICO-MATEMATICOS DA DETECCAO REMOTA

A.1	A RADIAÇÃO ELECTROMAGNETICA	A-1
A.1.1	Definições e Conceitos	A-1
A.1.1.1	Grandezas Básicas e Nomenclatura	A-2
A.1.1.2	O Espectro Electromagnético	A-4
A.1.2	Propriedades da Radiação Electromagnética	A-6
A.1.2.1	Polarização	A-6
A.1.2.2	Reflexão	A-7
A.1.2.3	Efeito de Doppler	A-9
A.1.2.4	Outras Propriedades	A-10
A.1.3	Fontes de Radiação Electromagnética	A-11
A.1.3.1	Radiação Electromagnética de Orisem Atómica e Molecular	A-12
A.1.3.2	Radiação Electromagnética Produzida pelos Corpos	A-13

A.1.4	Corpo Negro. Leis Gerais da Radiação	A-14
A.1.5	A Radiação Solar	A-18
A.2	INTERACÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR COM A ATMOSFERA	A-21
A.2.1	Composição da Atmosfera	A-22
A.2.2	Propagação da Radiação Solar na Atmosfera	A-24
A.2.2.1	Equação da Transferência Radiativa	A-24
A.2.2.2	Parâmetros Característicos	A-25
A.2.2.3	A Absorção na Atmosfera em Aplicações de Detecção Remota	A-27
A.2.2.4	A Difusão na Atmosfera em Aplicações de Detecção Remota	A-28

APENDICE B : SISTEMAS DE COORDENADAS CELESTES E TERRESTRES. O TEMPO

B.1	NOÇÃO DE ESFERA CELESTE	B-1
B.1.1	Elementos Referenciais da Esfera Celeste	B-2
B.2	SISTEMAS DE COORDENADAS CELESTES	B-4
B.2.1	Sistema de Coordenadas Horizontais	B-4
B.2.2	Sistema de Coordenadas Equatoriais	B-5
B.2.2.1	Coordenadas Equatoriais Horárias	B-5
B.2.2.2	Coordenadas Equatoriais Uranográficas	B-6
B.2.3	Sistema de Coordenadas Eclípticas	B-8
B.2.4	Sistemas de Coordenadas Orbitais	B-9
B.3	SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRES	B-10
B.3.1	Forma e Dimensões da Terra	B-10
B.3.2	Coordenadas Terrestres	B-12
B.4	O TEMPO	B-14
B.4.1	Generalidades	B-14
B.4.2	Sistemas de Unidades do Tempo	B-15
B.4.2.1	Unidades Fundamentais	B-16
B.4.2.2	Tempo Solar Verdadeiro	B-18
B.4.2.3	Tempo Solar Médio	B-19
B.4.2.4	Equação do Tempo	B-20
B.4.2.5	Tempo Local	B-20
B.4.2.6	Tempo Universal e Tempo Legal. Os Fusos Horários	B-21
B.4.3	Importância da Noção de Tempo em Estudos de Detecção Remota . . .	B-22

APENDICE C : MECANICA ORBITAL DOS SATELITES DE DETECCAO REMOTA

C.1	INTRODUCAO	C-1
C.1.1	Elementos Geométricos	C-2
C.1.2	Parâmetros Característicos de uma Órbita	C-4
C.1.3	Parâmetros de Posição de um Satélite	C-5
C.1.4	Atitude de um Satélite. Parâmetros de Atitude	C-8
C.2	ERUAÇÕES GERAIS DO MOVIMENTO ORBITAL	C-11
C.2.1	Leis Fundamentais	C-11
C.2.1.1	Leis de Kepler	C-11
C.2.1.2	Leis de Newton	C-11
C.2.2	Condições de Equilíbrio ou do Movimento	C-12
C.3	SISTEMAS DE COORDENADAS	C-13
C.3.1	Sistemas de Eixos	C-14
C.3.1.1	No Plano Orbital	C-14
C.3.1.2	Referencial Terrestre	C-14
C.3.2	Transformação de Coordenadas	C-16
C.3.3	Coordenadas Geográficas do Nadir	C-16
C.4	ESTUDO DO MOVIMENTO ORBITAL	C-18
C.4.1	Ações e Efeitos Perturbadores	C-19
C.4.2	Análise de Algumas Órbitas Particulares	C-22
C.4.2.1	Órbitas Circulares	C-22
C.4.2.2	Órbitas Geostacionárias	C-23
C.4.2.3	Órbitas Hélio-síncronas	C-23
C.4.3	Padrões de Repetição da Passagem sobre um Local	C-25

APENDICE D : O SATELITE NIMBUS-7, O RADIOMETRO CZCS E OS DADOS CRT

D.1	O SATELITE NIMBUS-7	D-1
D.1.1	Características Gerais	D-1
D.1.2	Parâmetros e Características Orbitais	D-3
D.1.3	Objectivos da Missão Nimbus-7	D-4
D.1.4	Equipamentos de Detecção Remota Instalados no Satélite Nimbus-7	D-6
D.2	O RADIOMETRO CZCS	D-7

D.2.1	Objectivos do Radiómetro CZCS	D-8
D.2.2	Características Radiométricas	D-9
D.2.3	Características Gerais	D-9
D.3	OS DADOS CZCS CRT	D-11
D.3.1	Estações de Recepção e de Distribuição de Dados CZCS CRT	D-11
D.3.2	Organização dos Dados CZCS CRT nas Bandas Magnéticas	D-12
D.3.2.1	Conceito de Imagem numa Banda CZCS CRT	D-12
D.3.2.2	Esquema da Organização de Dados numa Banda Magnética	D-14
D.3.2.3	O Ficheiro Identificador	D-15
D.3.2.4	O Ficheiro de Dados	D-16

APENDICE E : GLOSSARIO

E.1	SIGLAS DE INSTITUIÇÕES	E-1
E.2	SIGLAS DE PROGRAMAS INTERNACIONAIS	E-3
E.3	SIGLAS DE EQUIPAMENTOS, SATELITES E OUTROS	E-3
E.4	TERMS, DEFINIÇÕES E CONCEITOS	E-7
E.5	CONSTANTES	E-20

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

- 2.1 Esquema da Observação da Superfície Oceânica por Satélite
- 2.2 Interligação dos Modelos Microscópico e Macroscópico
- 2.3 Espectro de Difusão e de Absorção da Água do Mar Pura
- 2.4 Espectro de Reflectância de Águas de Tipo I
- 2.5 Espectro de Reflectância de Águas de Tipo II
- 2.6 Espectro de Reflectância da Substância Amarela

CAPITULO 3

- 3.1 O Sistema de Processamento Digital de Imagens do LNEC
- 3.2 Curvas de Calibração Intervenientes na Conversão de Valores
- 3.3 Coeficientes de Calibração da Curva 'Volt vs Valores Digitais DN'
- 3.4 Identificação dos Pixels de uma Linha e Tipo de Correção Atmosférica Aplicada
- 3.5 Posições do Sol e do Meridiano de Greenwich Durante os 2 Minutos de Observação da Cena
- 3.6 Geometria das Posições Ocupadas pelo Satélite
- 3.7 Geometria de Iluminação e de Observação dos Pixels Localizados, PL
- 3.8 Definição do Ângulo Azimutal Relativo ($\theta-\theta_0$) em PL
- 3.9 Fluxograma de Execução do Programa e Identificação dos Menus

APENDICE A

- A.1 Espectro Electromagnético
- A.3 Espectro da Radiação Solar
- A.4 Variação Anual e em Latitude da Irradiância Solar no Topo da Atmosfera
- A.5 Difusão de Rayleigh
- A.5 Verificação da Fórmula de Angström. Opacidade dos Aerosóis

APENDICE B

- B.1 Elementos Referenciais da Esfera Celeste
- B.2 Coordenadas Equatoriais de um Astro

APENDICE C

- C.1 Elementos Geométricos da Elipse
- C.2 Elementos Orbitais
- C.3 Parâmetros de Atitude
- C.4 Efeitos da Atitude Diferencial nas Linhas Observadas
- C.5 Sistemas de Coordenadas
- C.6 Coordenadas Instantâneas de Posição
- C.7 Órbitas Hélio-síncronas
- C.8 Padrões de Repetição de Órbitas Hélio-síncronas

APENDICE D

- D.1 O Satélite NIMBUS-7
- D.2 Curvas de Sensibilidade Espectral dos Canais 1 a 4 do CZCS
- D.3 Estações da ESA de Recepção de Dados CZCS e Respectivo Horizonte de Recepção
- D.4 Esquema de Organização dos Ficheiros numa Banda Magnética CZCS CRT

LISTA DE QUADROS

CAPITULO 2

- 2-I Espectro de Reflectância da Água do Mar Puro (segundo Morel, Prieur, Johnson e Munday)

CAPITULO 3

- 3-I Características das Imagens CZCS Contidas numa Banda Magnética
- 3-II Coeficiente $M(\lambda)$ da Variação da Calibração do CZCS

APENDICE A

- A-I Grandezas Características da Radiação Electromagnética
- A-II Opacidade Espectral Equivalente do Ozono

APENDICE B

- B-I Sistemas de Coordenadas Celestes

APENDICE D

- D-I Parâmetros Orbitais de Alguns Satélites
- D-II Características Radiométricas do CZCS
- D-III Características Gerais do CZCS
- D-IV Descrição do Ficheiro de Identificação (Header File) na Banda Magnética
- D-V Descrição do Registo de Documentação (Documentation Record) na Banda Magnética
- D-VI Descrição do Registo de Localização (Image Location Record) na Banda Magnética
- D-VII Identificação dos Pixeis Coordenados (Anchor Points)
- D-VIII Descrição dos Registos de Dados (Data Records) na Banda Magnética

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Este trabalho é apresentado no âmbito do disposto na Lei Orgânica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil e no Regulamento da Carreira de Investigação desta Instituição, particularmente no que respeita à obtenção do grau de Investigador Auxiliar e de Especialista do LNEC.

Pretende-se deste modo ver terminado um longo período de estágio decorrido no Núcleo de Estuários (NET) do Departamento de Hidráulica (DH), durante o qual houve oportunidade para tomar conhecimento e participar activamente nos trabalhos que ali têm sido realizados.

Foi esta participação activa e de entrega interessada e dedicada a actividades de índole tão diversa como estudos de carácter experimental (estudos em modelos reduzidos), desenvolvimento de metodologias específicas para a resolução de determinados problemas técnicos (programas de tratamento de dados em computadores; técnicas de cronofotografia em modelos reduzidos de estuários, etc.) e participação em comissões de estudo e/ou de representação da Instituição (Comissão Cultural de Engenharia Civil da Ordem dos Engenheiros; Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (APRH); Comissão Permanente de Estudo do Espaço Exterior (CPEEE); Associação Europeia dos Laboratórios de Detecção Remota (EARSEL); entre outras), que conduziram naturalmente à escolha de um campo de especialização de que este relatório pretende dar conta.

1.2 BREVE DESCRICAO DO TRABALHO

1.2.1 Antecedentes. Motivação

Em 1974, teve-se a oportunidade de participar informalmente no "Estudo Piloto de Aplicação de Técnicas de Detecção Remota aos Recursos Hídricos" a decorrer no Núcleo de Hidrologia e Hidráulica Fluvial do Departamento de Hidráulica, tendo consistido na obtenção e análise sumária de planos aerofotográficos com a utilização de filmes infravermelhos coloridos e a preto e branco, sobre algumas zonas seleccionadas no rio Tejo, nomeadamente, em Vila Velha do Ródão, na zona aluvionar a jusante de Santarém e no estuário, junto à margem esquerda, em colaboração com a Força Aérea Portuguesa (FAP) e a firma Kodak Portuguesa.

Da experiência vivida e dos resultados qualitativos alcançados, ficou sempre a vontade de explorar a técnica que, de acordo com as primeiras publicações que dela faziam relatos e a que se teve acesso, tudo indicava poder suprir algumas das limitações encontradas em trabalhos nos quais o autor participava, nomeadamente, o do conhecimento espacial e temporal de certas grandezas hidráulicas.

As perspectivas de poder concretizar esta intenção ampliam-se com a chegada das primeiras imagens de satélite sob forma digitalizada, em banda magnética, adquiridas sobre o território nacional pelo(s) satélite(s) LANDSAT, na sequência de um curso organizado pela CPEEE, com a colaboração da (então) Comissão Nacional do Ambiente (CNA) e do LNEC, e no qual se teve oportunidade de participar também.

Neste curso (I Curso de Aplicação das Técnicas de Detecção Remota e do Processamento Digital de Imagens na Gestão dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente, JNICT/CPEEE, Lisboa, LNEC, Outubro de 1979), foram pela primeira vez introduzidas em Portugal as técnicas de processamento digital de imagens obtidas por detecção remota, pela mão de uma equipa de técnicos franceses liderada pelo Professor Fernand Verser, Director do Laboratoire de Géographie de Montrouse, a qual, durante a década de 70, realizara uma série notável de trabalhos de aplicação dos dados de satélite na caracterização da fisionomia do litoral francês.

Estava, pois, lançada a semente que iria dar origem a um longo processo de aquisição de conhecimentos, de identificação de áreas de interesse de aplicação, tanto num contexto nacional (no âmbito das actividades da CPEEE), como no do LNEC, enfim, de formação numa disciplina que, na sua expressão

moderna; pouca experiência havia no País.

Na fase contemplativa, also passiva, de 'observação do que se fazia lá fora' nestes domínios, passou-se a uma fase bem mais estimulante a que os resultados da aplicação dos primeiros programas de processamento em computador sobre as imagens disponíveis permitiram chegar, na sequência daquele curso e de outras acções de formação neste campo (p.ex. Summer School on Remote Sensing in Oceanography, Hydrology and Meteorology, University of Dundee, Escócia, Setembro de 1980).

Com a realização do 'Estudo Piloto de Processamento e Interpretação de Dados Obtidos por Satélite sobre Portugal, com vista ao Ordenamento do Território e à Protecção do Meio Ambiente', entre Dezembro de 1980 e Julho de 1981 nas instalações do Centro de Informática do LNEC, no qual participaram cerca de 21 técnicos da Administração Pública e das Universidades, do sector das Ciências da Terra, atinge-se uma 3a. fase deste processo de envolvimento progressivo em actividades de detecção remota. Foi a fase da consciencialização da importância real que estas podem ter em vários sectores de actividade do País e do contributo que, a este respeito, se sente poder e dever dar.

O entusiasmo evidenciado pelos participantes naquele Estudo Piloto, alguns dos quais tomavam contacto com o processamento em computador pela primeira vez, suscitou a necessidade de uma dinamização da actividade, para que a experiência levada a cabo tivesse continuidade e não fosse um mero acontecimento para recordar.

No seio da CPEEE, e em conjunto com representantes de outros organismos membros, promoveu-se uma ampla discussão sobre a conveniência da reestruturação daquela Comissão, pelo menos da componente Detecção Remota, para fazer face ao previsível aumento de aplicações na sequência das diversas acções de formação e informação realizadas no País (3 Seminários, 2 Cursos, Estudo Piloto, Sessões de Divulgação, Exposições, etc.) e da aquisição de um radiómetro de 2 canais a ser operado pela FAP.

Não tendo a CPEEE uma vocação executiva, entendiam, porém, os promotores e proponentes desta reestruturação, que a multidisciplinaridade inerente da actividade e a necessidade de gestão parcimoniosa dos recursos disponíveis (em matéria de equipamento, tanto de aquisição de dados como de processamento, p.ex.) iriam exigir uma estreita coordenação das iniciativas a apoiar, devendo a Comissão constituir-se no 'forum' adequado para a análise e incentivo de

projectos, e proporcionar o enquadramento institucional àqueles que envolvessem vários organismos.

No LNEC, os responsáveis directos pelo desenvolvimento da Detecção Remota promoveram uma análise detalhada sobre as acções a empreender para que, por um lado, a Instituição dominasse a matéria nos seus aspectos científicos e técnicos essenciais, em particular nas aplicações mais directamente relacionadas com a actividade da Instituição, como sejam a Hidráulica e os Recursos Hídricos, a Geologia e o Planeamento Urbanístico e Regional e, por outro lado, pudesse corresponder às solicitações do exterior, nomeadamente, as provenientes da CPEEE, da qual se tinha recebido a incumbência de promover o desenvolvimento do processamento digital de imagens.

Desta análise resultaram as seguintes conclusões:

- 1- necessidade de identificação e conveniência de realização de alguns projectos de investigação em domínios específicos.
- 2- necessidade de formação especializada dos técnicos do LNEC nas aplicações de detecção remota.
- 3- necessidade de aquisição de um sistema dedicado ao processamento digital dos dados de detecção remota.

Tendo em conta o facto de os responsáveis pelo desenvolvimento da Detecção Remota no LNEC terem formação em Hidráulica, naturalmente que os primeiros projectos de investigação apresentados se situaram neste domínio e a formação especializada foi orientada também para as aplicações em Hidráulica e Recursos Hídricos, a que se juntou uma disciplina fundamental, designada por Processamento Digital de Imagens.

De entre os projectos de investigação inventariados, destaca-se o denominado por "Caracterização de Formações Estuárias e do Meio Marítimo Litoral por Técnicas de Detecção Remota", a decorrer no Núcleo de Estuários, após aprovação e integração no Plano de Investigação e Desenvolvimento da Administração Central (PIDAC), e que se pretendeu orientado na procura do conhecimento

científico do território que naquele Núcleo vem sendo seguida.

Para a sua execução, entendeu-se subdividi-lo em subprojectos, identificados por objectivos ou por técnicas que àqueles conduzem.

De entre estes destacam-se os seguintes:

- 1- Caracterização e quantificação de parâmetros de qualidade de águas em estuários e no meio litoral adjacente;
- 2- Avaliação e caracterização de estados de mar a partir de dados de satélite;
- 3- Caracterização fisiográfica das formações estuárias;
- 4- Caracterização e quantificação do estado térmico superficial das águas;
- 5- Avaliação de parâmetros hidrodinâmicos de estuários.

Globalmente, o objectivo é o de dominar e explorar as potencialidades de todas as formas de detecção remota em cada um destes campos de aplicação.

O projecto iniciou-se pelo primeiro acima enumerado, em resultado do aliciamento que a tal levava a observação de suspensões nas águas de estuários e das zonas marítimas evidenciadas nas imagens disponíveis, pela experiência progressivamente adquirida na sua manipulação.

O contacto estreito que havia com o Laboratoire de Géographie de Montrouze, onde decorriam trabalhos de intensa idêntica, conduziu à realização de um estágio de 6 meses aproximadamente, naquela Instituição, para o que se beneficiou de uma bolsa de estudo concedida pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT).

Esta estadia permitiu a aquisição de conhecimentos teóricos e das metodologias adequadas à abordagem do problema, sob a forma de identificação das linhas de

investigação corrente, de formulação teórica subjacente e de um melhor conhecimento das aplicações das técnicas de detecção remota no meio aquático, particularmente o marítimo (em equipamentos, dados, técnicas de processamento, etc.).

Dela resultou, pois, uma clarificação dos objectivos pretendidos e, em parte, o trabalho que agora se apresenta.

1.2.2 Opções Tomadas

Caracterizar e quantificar parâmetros de qualidade de água a partir de dados de satélite impõe, naturalmente, que se identifiquem quais os parâmetros a caracterizar e a quantificar.

Neste trabalho, os parâmetros de qualidade de água são as suspensões.

Inicialmente, o objectivo pretendido foi o de se desenvolver um método que permitisse a obtenção de uma cartografia quantificada da distribuição horizontal dos sedimentos (matéria inorgânica) em suspensão nas águas de estuários (quaisquer) e/ou do litoral adjacente, a partir de dados de satélite.

Dispun-se-ia, assim, de um utensílio de inesável interesse para o conhecimento do transporte sólido em suspensão, fundamental no projecto de algumas obras marítimas, de protecção costeira ou de melhoria das condições de acesso a zonas portuárias.

Mais ainda, a disponibilidade de um tal "instrumento" possibilitaria um melhor conhecimento da hidrodinâmica destas unidades fisiográficas, pela sua aplicação "sistemática" às imagens que periodicamente se obtivessem sobre os estuários, explorando a visão sinóptica que proporcionam em si mesmas de toda a extensão geográfica em estudo, e aproveitando a capacidade "traçadora" dos sedimentos em suspensão, fornecendo preciosas indicações sobre as direcções preferenciais do escoamento.

A formação adquirida nesta matéria, por um lado, as capacidades resolventes dos radiómetros em operação, por outro, e o tempo imposto para a apresentação deste trabalho levaram a alterações ligeiras nos objectivos anteriormente formulados.

Assim, apesar das operações de realce de contraste efectuadas sobre as imagens

de estuários obtidas pelo(s) satélite(s) LANDSAT e disponíveis no LNEC evidenciam a presença de material sólido em suspensão; não tem o radiómetro MSE a resolução nem a sensibilidade radiométricas suficientes para a quantificação desejada dessa presença.

Por outro lado, se o radiómetro CZCS do satélite NIMBUS-7 possibilita este requisito, a sua resolução geométrica não se mostra adequada à aplicação em zonas de extensão/largura limitada, como são, em geral, as dos estuários, mas "apenas" a zonas mais extensas onde a variabilidade horizontal dos teores de matérias em suspensão é menos problemática.

Numa fase em que a apropriação de conhecimentos sobre a resolução do problema conduzia à aplicação dos dados obtidos por este último radiómetro, tomou-se a decisão de orientar o trabalho no sentido de desenvolver um modelo que se aplicasse aos dados do radiómetro CZCS, apesar das limitações apresentadas, i.e., de se acabar por se obter um resultado mais indicado para aplicações oceanográficas.

Porém, oferecem os dados CZCS a vantagem de se poderem aplicar na quantificação de outros tipos de suspensões, nomeadamente de substâncias orgânicas.

Pensa-se, pois, que, apesar de não conduzir à caracterização das suspensões em estuários como inicialmente desejado (pelo menos nos estuários Portugueses), o trabalho desenvolvido poderá ser do interesse de outras instituições cuja actividade se oriente para o mar, como sejam as ligadas à indústria da pesca, as de investigação e as de controlo, vigilância e observação dos recursos marítimos.

No entanto, na sua formulação teórica, o modelo é aplicável a quaisquer dados radiométricos desde que obtidos nas bandas espectrais adequadas (ou previstas na sua implementação), nomeadamente, nas bandas de absorção e reflexão máximas e mínimas dos principais constituintes da água do mar, as suspensões orgânicas e inorgânicas.

Algumas modificações serão certamente necessárias, na sua versão para computador, para fazer face ao formato por que se apresentam, ou a determinados parâmetros essenciais, porventura ausentes (coordenadas da fonte iluminante, dos pontos observados, dos instantes de observação, etc.).

Dada a evolução tecnológica que se tem verificado, também neste campo da detecção remota aplicada aos recursos marítimos, é de esperar que em futuro

próximo se possa dispor de dados radiométricos obtidos a partir do espaço capazes de permitirem a cartografia dos sedimentos em suspensão no interior dos estuários, ou mesmo de outras unidades fisiográficas de menores dimensões, como albufeiras e lagos, concretizando-se, deste modo, os objectivos inicialmente formulados.

O lançamento recente para o espaço do radiómetro TM (Thematic Mapper) é disso testemunho.

Na altura em que este trabalho foi preparado, não houve oportunidade de se avaliar as potencialidades da sua aplicação ao(s) modelo(s) desenvolvido(s), nomeadamente no que respeita à resolução e sensibilidades radiométricas, já que a geométrica (30m) é tentadora.

1.2.3 Objectivos

Apesar das opções e decisões tomadas terem provocado um desvio relativamente ao campo de aplicação inicialmente previsto, os objectivos inerentes ao desenvolvimento do projecto (do subprojecto, para ser mais preciso) mantiveram-se inteiramente.

Assim, os objectivos deste trabalho são:

- 1- desenvolvimento de uma metodologia que permita a quantificação de suspensões da água do mar, e tanto quanto possível exclusivamente a partir de dados de satélite;
- 2- implementação sob forma de programa(s) para computador do(s) modelo(s) teórico(s) desenvolvido(s), e aplicar aos dados do radiómetro CZCS do satélite Nimbus-7.
- 3- aplicação e verificação do(s) modelo(s) numa zona do litoral Português.

1.2.4 Resultados Alcançados

Resumidamente, porque em outro local deste texto se dá conta mais detalhadamente, pode desde já dizer-se que os objectivos expressos nos números 1 e 2 do parágrafo anterior foram cumpridos, de acordo com as hipóteses formuladas.

Não foi possível levar a bom termo o número 3 por razões alheias ao autor. De facto, tendo o modelo sido desenvolvido para aplicação aos dados CZCS, numa primeira fase, desde o regresso de França que se tem procurado obter, das fontes de distribuição destes dados (NOAA, nos Estados Unidos da América, e ESA/EARTHNET, em Itália), as referências das imagens obtidas sobre o litoral Português por este radiómetro, que se sabe existirem, para se proceder atempadamente à sua aquisição.

Somente em Junho de 1985 se conseguiu uma resposta positiva da Agência Especial Europeia (ESA) sobre a informação pretendida, não chegando, porém, a tempo da sua aplicação a este trabalho, o que se lamenta.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Ao que se julga saber, este será dos primeiros trabalhos apresentados no País sobre processamento digital de dados de detecção remota obtidos a partir de plataformas espaciais e com vista a uma aplicação específica.

Por este motivo, entendeu-se dever apresentar o trabalho de um modo que permitisse uma leitura diferenciada consoante o interesse manifestado pelo leitor, sequenciando os temas expostos desde uma "generalidade" até à profundidade possível do seu tratamento, e remetendo para Apêndices, sempre que oportuno, a descrição de algo complementar ou colateral, evitando-se assim interrupções constantes na sequência da exposição.

Deste modo, o Capítulo 2, "Avaliação de Parâmetros de Qualidade de Água do Mar por Detecção Remota", apresenta o que se considerou ser mais relevante para a compreensão das aplicações desta técnica neste domínio, resumem-se os principais trabalhos feitos e de que se tem conhecimento, analisam-se os métodos seguidos e perspectiva-se o modelo seguido e implementado no Capítulo seguinte.

O Capítulo 3, 'Programa de Cálculo de Suspensões na Água do Mar por Detecção Remota', apresenta o algoritmo desenvolvido com base nas considerações do Capítulo anterior e no tipo de dados a que se aplica, CZCS CRT do satélite Nimbus-7.

O Capítulo 4, 'Conclusões, Perspectivas Futuras', termina o trabalho, tendo sido estruturado em duas partes algo distintas. Numa primeira parte, faz-se uma análise crítica ao trabalho desenvolvido e descrito nos capítulos anteriores, analisando-se as limitações e validade das aplicações. A segunda parte do Capítulo é dedicada à perspetivação das actividades de detecção remota no LNEC, face à evolução verificada tanto pela aquisição recente do equipamento dedicado ao processamento digital de imagens, como pela evolução que se espera vir a operar-se no País com a progressiva utilização de meios semelhantes ou, tão somente, desta técnica nas mais diversas actividades em que pode ser de utilidade não igualável por outras.

Como se disse anteriormente, remeteram-se para Apêndices todos os assuntos que, se inseridos no interior do texto dos capítulos, distrairiam da percepção dos aspectos essenciais, ou por demasiado detalhados (se bem que necessário num trabalho desta índole), ou por constituírem matéria colateral à essência do trabalho.

Assim, o Apêndice A descreve os princípios físico-matemáticos que constituem o suporte científico da detecção remota.

Seguem-se-lhe os Apêndices B, C e D, respectivamente, 'Sistemas de Coordenadas Celestes e Terrestres. O Tempo', 'Mecânica Orbital dos Satélites de Detecção Remota' e 'O Satélite Nimbus-7, o Radiómetro CZCS e os Dados CRT', em apoio dos Capítulos 3 e 4.

Entendeu-se que seria igualmente útil completar este conjunto de Apêndices com um Glossário de termos, de siglas e de constantes utilizados no texto e correntes na literatura da especialidade.

No que respeita à bibliografia, optou-se por colocar no fim de cada capítulo o conjunto de referências que lhe são relativas.

1.4 NOTA FINAL

1.4.1 Sobre a Terminologia Usada

Ao elaborar-se a redacção do presente trabalho, uma dificuldade desde logo se derarou em resultado da intenção de se escrever um texto em Português, sobre uma matéria cujas fontes de informação foram e são de origem anglo-saxónica, com uma "forte" componente Americana.

Procurou-se, pois, sempre que possível utilizar os termos que, em Português, ou correspondiam à tradução correcta do termo (p.ex. "backscatter coefficient" por "coeficiente de retrodifusão"), ou, no desconhecimento deste, pelos que melhor traduzissem a ideia expressa na língua original (p.ex. "forward scattering" por "difusão no sentido da propagação").

Mas, conhecida que é uma certa "liberdade" gramatical e filológica da língua Americana, onde dificilmente se distingue um "calão técnico" (technical jargon, lingo) da designação científica correcta (quando existente!), várias vezes se ficou com dúvidas sobre se a tradução proposta corresponderia ao que o termo original exprime (p.ex. como traduzir "housekeeping data", ou "Major-Frames"?), sobretudo recorrendo ao menor número de palavras para o efeito. Nestes casos, optou-se por acrescentar de seguida a designação original entre parêntesis (p.ex. "cor verdadeira (true color)").

Por outro lado, são várias as palavras de língua Inglesa do léxico técnico que passaram a ser correntemente utilizadas em Português, sem qualquer transformação ortográfica, mesmo quando alguns dos caracteres que utilizam não têm correspondência em Português (p.ex. "byte"), ou quando, na língua original, são resultado da aslutinação de palavras (p.ex. "pixel", de "picture element", ou "bit", de "binary digit"). Nestes casos, encontrar-se-á no texto um uso indistinto do termo original e da tradução "proposta" ("pixeis" por "elementos de imagem").

Enfim, embora não se considere ser um problema limitativo no diálogo entre os técnicos portugueses, julga-se haver lugar a uma reflexão conjunta entre estes e os filólogos da língua Portuguesa no sentido de, a ter que haver tradução dos termos técnicos, esta se faça de acordo com as regras estabelecidas neste âmbito, para se evitar a degradação de um dos símbolos identificadores de um Povo e da sua cultura.

1.4.2 Outros Aspectos Formais

A organização da bibliografia apresentada no final de cada Capítulo é feita por ordem alfabética dos autores e, dentro desta, por ordem cronológica, não sendo, porém, numerada.

Deste modo, a citação de uma publicação no texto é feita por nome do seu autor e da data daquela, pois considerou-se que se facilitaria assim a referência mental daquele trabalho por parte dos leitores de algum modo familiarizados com estas matérias, o que não aconteceria se a citação fosse referenciada por um qualquer número de ordem de apresentação na listagem bibliográfica.

São também frequentes as chamadas a 'pé de página' no decorrer do texto. Estas são identificadas por (*) e o número de asteriscos representa o número de ordem de aparecimento na página.

Refere-se que, para melhor compreensão do texto, os termos técnicos que tenham sido objecto de definição são apresentados como se de substantivos próprios se tratassem (a primeira letra em maiúsculas, p.ex. Atitude, se referida à atitude de um satélite).

Finalmente, no que respeita à notação científica dos números, optou-se por os escrever tal como é usual em linguagem computacional. Assim, será frequente encontrarem-se no texto valores como $6.63E-34$ (constante de Planck, em Js), significando '6 vírgula 63 que multiplica a potência de 10 elevada ao expoente -34'. Pelos mesmos motivos, a vírgula decimal foi substituída pelo 'ponto (.)', como utilizado na linguagem anglo-saxónica.

1.4.2.1 Agradecimentos

Um trabalho da índole do que agora é submetido à apreciação é o resultado de alguns anos de trabalho intenso, caracterizados por uma grande diversidade de preocupações, resultantes obviamente da grande diversidade de problemas que se teve de enfrentar, não somente durante a fase de estásio, como, recentemente e em suposta fase de preparação para este trabalho, com a recepção, instalação, operação e desenvolvimento dos primeiros programas de aplicação no sistema de processamento digital de imagens do LNEC.

Naturalmente que tal situação, embora pontualmente, prejudicou a normal

sequência do desenvolvimento, aprofundamento e implementação deste projecto. Serão certamente visíveis as marcas deixadas.

Porém, não se quer deixar de referir o apoio recebido e a compreensão manifestada pela hierarquia do LNEC, e que se traduziram por frequentes e oportunas intervenções pessoais com vista à superação de problemas de índole diversa entretanto surtidos.

Pelo entusiasmo e empenho que sempre demonstrou nas sucessivas fases de "implantação" da detecção remota no LNEC, e que culmina com a aquisição e instalação do sistema dedicado ao processamento digital de imagens, ainda no seu mandato, expressa-se ao Sr. Eng. Ferris Borges o apreço de quem muito deve pelo incentivo recebido e confiança depositada para se chegar aonde se chegou hoje.

Ao Sr. Eng. Fernando Abecasis se dirige cumprimento idêntico, a que se acrescenta o reconhecimento pelas suas qualidades de competência técnica e de relacionamento humano, que muito contribuíram para a adequada formação de todos os que tiveram a oportunidade (e gosto) de trabalhar sob a sua chefia.

A actual Direcção do LNEC se expressa também reconhecimento pelo apoio concedido ao prosseguimento das actividades de detecção remota no LNEC, as quais, em certa medida agora começam. E firme desejo da pequena unidade de detecção remota contribuir com o seu esforço, dedicação e aperfeiçoamento continuado, para que esta actividade se alie decisivamente a tantas outras que, por mérito dos seus responsáveis, sunderam a Instituição ao prestígio de que disfruta.

Aos três Chefes do Núcleo de Estoários, sob cujas ordens se tem trabalhado nestes anos, Enss. Reis de Carvalho, Júlio Barceló e Pires Elias, se manifesta igualmente uma palavra de agradecimento pelo contributo dado na formação necessária ao desempenho das funções atribuídas no âmbito das actividades do Núcleo e, se permitido é, pela amizade sempre demonstrada e que é retribuída.

Aos colegas do Centro de Informática, nas pessoas do seu Chefe, Dr. Carlos Moraes, pelo apoio, incentivo e colaboração prestados numa fase bem crítica do desenvolvimento da detecção remota no LNEC, da Dra. Maria João Roquete, dos Enss. João Cunha, Luís Arriaga da Cunha e João Oliveira, do ex-holseiro Salvador Pinto de Abreu e do programador de sistemas António Mota, e dos técnicos Moreira Cunha e Luís Aurélio, pelo contributo que sempre deram na formação neste domínio novo e aliciante que é a Informática, e particularmente no apoio

ao 'arranque' do processamento digital de imagens no LNEC, e na instalação e resolução dos 'pequenos/grandes' problemas do sistema dedicado a este fim. Seria injusto não incluir os operadores dos computadores, pela atenção e espírito de colaboração que a todos os utilizadores, e ao autor em particular, têm sempre dispensado.

A Junta Nacional de Investição Científica e Tecnológica e à Comissão INVOTAN se agradece a concessão de duas bolsas de estudo para a realização de um estágio em França e para a frequência de um curso nos Estados Unidos, respectivamente, e que muito contribuíram para a formação necessária neste domínio.

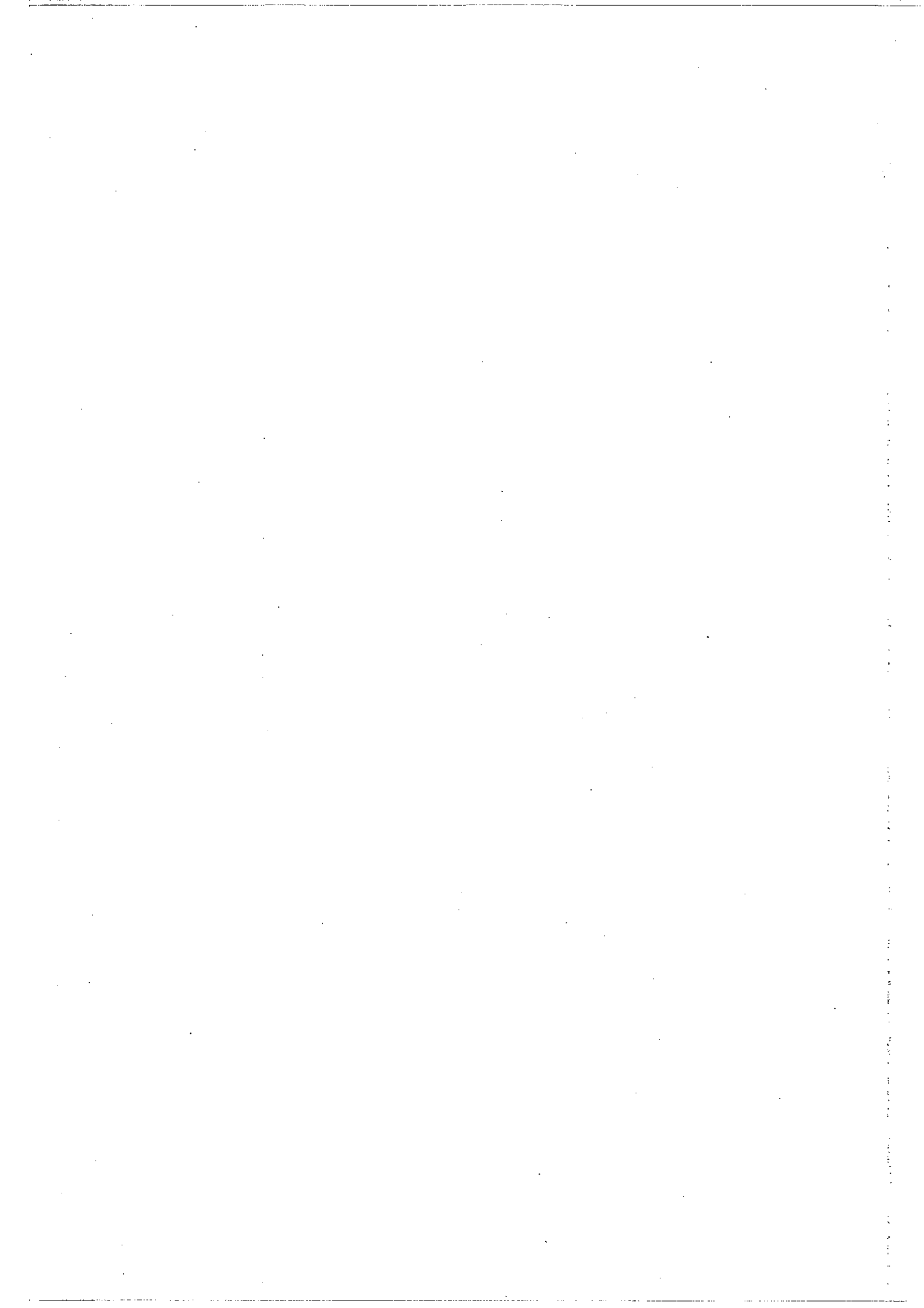
Ao Sr. Professor Fernand Verser, Director do Laboratoire de Géographie de Montrouze, de quem se receberam as 'primeiras letras' sobre o processamento digital das imagens de satélite, agradece-se o acolhimento oferecido durante a realização do estágio naquele Laboratório. Aos técnicos e colaboradores do Laboratoire de Géographie, nas pessoas das Drs. Résine Zbinden e Isabelle Sourbès, dos Drs. Yves Thomas, François Cua e Gérard Joly, do estagiário Dr. Hong-Rhyong Yoo e do Sr. Jean Claude Lovato, se agradece também a amizade e camaradagem proporcionados, bem como o acesso aos seus trabalhos e colaboração recebida.

Ao Sr. Director do Centre Océanologique de Bretagne (COR), em Brest, se agradece a possibilidade concedida de visitar e estagiar naquele Centro, durante cerca de três e meio, no decorrer do estágio em França. Desta estadia, regista-se com particular agrado o excelente clima de trabalho e de relacionamento pessoal proporcionado pelos colegas Enss. Lionel Loubersac, Gérard Belbéoque, Pierre le Hir e, de forma geral, os que trabalham no Service d'Exploitation des Ordinateurs (SEO), e que muito contribuíram para um frutuoso aproveitamento da missão realizada.

Agradece-se também aos Srs. Rafael Carrossio, Chefe da Sala de Desenho do Departamento de Hidráulica, e Desenhador José Reis, pelo trabalho de preparação dos desenhos e arranjo gráfico final.

Aos elementos da unidade de detecção remota do LNEC, Eng. Rui Gonçalves Henriques e Experimentadores Lourival Trovisco e Miguel Gamboa, dirijo, a finalizar, uma palavra de agradecimento, também, pelo estímulo e empenhamento que têm sabido manter e transmitir em todas as ocasiões, bem como o cuidado posto na revisão e preparação final deste texto. Ao colega Rui Gonçalves Henriques, em particular, manifesto o meu respeito e admiração pela capacidade que sempre

teve em encontrar, na diversidade das nossas opiniões, a convergência necessária para o desencadear da acção mais adequada à prossecução dos objectivos traçados. É, sem dúvida, ao seu arrojo e iniciativa permanentes que se deve muito do que, em detenção remota, se tem feito no LNEC, quicá no País.



CAPITULO 2

AVALIAÇÃO DE PARAMETROS DE QUALIDADE DA AGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA

A observação de manchas de tonalidades claras em algumas imagens de detecção remota sobre zonas litorais do globo terrestre, particularmente se próximas de formações estuárias em situação de maré vazante, em contraste nítido com a tonalidade tipicamente escura de massas de água, sugere que se trata de algo contido na água que lhe altera a densidade tonal.

Conhecida a dificuldade material e operacional da medição 'in situ' dos valores das grandezas que traduzem essa variação tonal, parecem justificadas as seguintes questões: será possível identificar-se esse conteúdo a partir das imagens? Será ainda possível quantificar-se essa presença?

Analisa-se este problema neste Capítulo, começando por uma apresentação do mesmo, dos diferentes modos de ser abordado, propondo-se, a finalizar, um modelo de cálculo das suspensões na água, implementado sob a forma de programas para computador, a descrever no Capítulo seguinte.

2.1 INTRODUÇÃO

2.1.1 Considerações Prévias

Vários autores se têm debruçado sobre o problema da identificação e quantificação de alguns dos constituintes das águas naturais por observação 'remota'.

É compreensível este interesse, dada, por um lado, a importância económica (geo-económica) dos recursos marítimos e, por outro lado, a dificuldade em caracterizar alguns dos seus parâmetros através de medições 'in situ', pela extensão geográfica e variabilidade temporal que manifestam, não permitindo a 'visão' sinóptica e periódica requeridas para uma compreensão efectiva dos fenómenos associados.

A capacidade das técnicas de detecção remota em providenciarem esta visão global justifica pois o considerável investimento tecnológico e científico verificado

ultimamente com vista à sua utilização também neste domínio oceanográfico.

Assim o provam os programas de investigação e desenvolvimento que têm sido levados a efeito pela NASA, em associação com diversos organismos e universidades americanas (Projecto CZCS da missão NIMBUS-7, programas dos satélites SEASAT, TIROS-N e da série NOAA), bem como da Agência Espacial Europeia (ESA), através do satélite ERS-1, particularmente orientado para estudos do mar por detecção remota, a lançar em futuro próximo, entre outros.

E que o potencial de pescado está naturalmente associado a determinadas características de qualidade das águas, representadas pela presença de certos constituintes, intervenientes em maior ou menor grau na cadeia alimentar dos cardumes. Não será alheia a este processo a própria hidrodinâmica oceânica, determinando os diversos tipos de correntes, estruturas térmicas e de densidade das águas (de que é exemplo o fenómeno de "upwellings"), porventura responsáveis por aquela presença.

Deste modo, a disponibilidade de uma "cartografia" da superfície do mar sobre a "qualidade" das águas(*), actual, mas, sobretudo, rapidamente actualizável, é instrumento de capital importância na gestão dos recursos marítimos de um País e do seu esforço de pesca (dimensão da frota pesqueira, serviços de apoio e de distribuição, indústria de frio, etc.), mas também para a sua preservação.

De facto, e no caso Português, o alargamento da Jurisdição marítima para as 200 milhas (Zona Económica Exclusiva, ZEE) dá dimensão adequada à necessidade de vigilância e observação permanente da sua orla marítima (que ultrapassa largamente a superfície continental, particularmente evidente nas Regiões Autónomas dos Arquipélagos da Madeira e dos Açores), onde se localizam algumas das rotas de navegação, de tráfego intenso, de e para o Norte da Europa.

Não é difícil imaginar a impossibilidade prática de se atingirem estes objectivos (conhecimento actualizado/actualizável e vigilância do território) por técnicas convencionais.

Estas, porém, não serão substituídas inteiramente pelas técnicas de detecção remota, pois, como se verá, não só os conhecimentos se encontram ainda no domínio exploratório, como não oferecem, em alguns casos, o rigor de resultados que aquelas pontualmente providenciam.

(*) - leia-se, transcrevendo a presença dos referidos constituintes, bem como a distribuição superficial da temperatura, ou mais exactamente, a localização das frentes térmicas oceânicas, e/ou outros parâmetros físico-químicos de qualidade.

Não se poderá perder de vista que, associado à detecção remota, estão os conceitos de resolução geométrica (que determina a extensão espacial mínima a que se refere o valor de uma grandeza medida/calculada por esta técnica), de resolução radiométrica (que determina a capacidade de distinção de dois valores radiométricos muito próximos entre si) e de resolução temporal (o termo é uma extensão abusiva do conceito de resolução, referindo-se à frequência com que uma região da superfície terrestre pode, teoricamente, ser observada a partir do espaço(*)).

As técnicas de detecção remota aqui aplicadas apresentam-se também como um instrumento de gestão adequada dos meios técnicos e humanos disponíveis, escassos e dispendiosos em algumas circunstâncias, para a observação pontual, atrás referida como "convencional". A partir da informação veiculada pela observação radiométrica que é possível obter-se, o detalhe necessário para a caracterização "definitiva" dos fenómenos em estudo é então realizado pelas equipas de campo, conduzidas aos locais indicados com objectivos determinados.

Em algumas situações, ambas as missões poderão ser realizadas em simultâneo, através de programação adequada, garantindo-se deste modo a conjugação temporal das observações, servindo quer de calibração mais eficiente deste ou daquele parâmetro, quer para suprir lacunas induzidas pela própria observação por detecção remota (junto à linha de costa, p.ex., onde a radiometria captada pelo radiómetro pode ser "corrompida" pela proximidade da superfície continental), quer ainda para medição de outros parâmetros dificilmente observáveis por esta técnica (a densidade das águas, p.ex.).

2.1.2 Posição do Problema

Seja um trecho de mar, suposto ilimitado na direcção horizontal e opticamente profundo, em cuja água se encontram dissolvidas e/ou em suspensão substâncias várias, orgânicas (fitoplâncton, algas, substâncias amarelas, etc.) e/ou inorgânicas (sedimentos).

Considere-se ainda que o Sol é a (única) fonte iluminante da superfície deste

(*) - Os dois primeiros são inerentes ao equipamento de medida utilizado (radiómetro), aos quais se junta o conceito de resolução espectral (conceito também abusivo quando aplicado a radiómetros instalados a bordo de satélites ou de aviões, referindo-se ao número de janelas/bandas espectrais em que opera (em geral 4 a 6), mas traduzindo o intervalo entre os comprimentos de onda representativos daquelas bandas espectrais). A resolução temporal, no caso da detecção remota por satélite, é inerente ao programa orbital deste, traduzindo pois o seu Padrão de Repetição.

trecho de mar, por via directa e/ou difusa, através de uma atmosfera composta de substâncias gasosas e/ou póeiras capazes de modificar as características de radiação incidente na superfície e dela emergente (Fig. 2.1).

Suponha-se que, acima da atmosfera, um radiómetro multiespectral apontado para a superfície terrestre mede a radiação proveniente desta através de uma coluna atmosférica subjacente e correspondente ao ângulo de abertura (IFOV, Instantaneous Field of View).

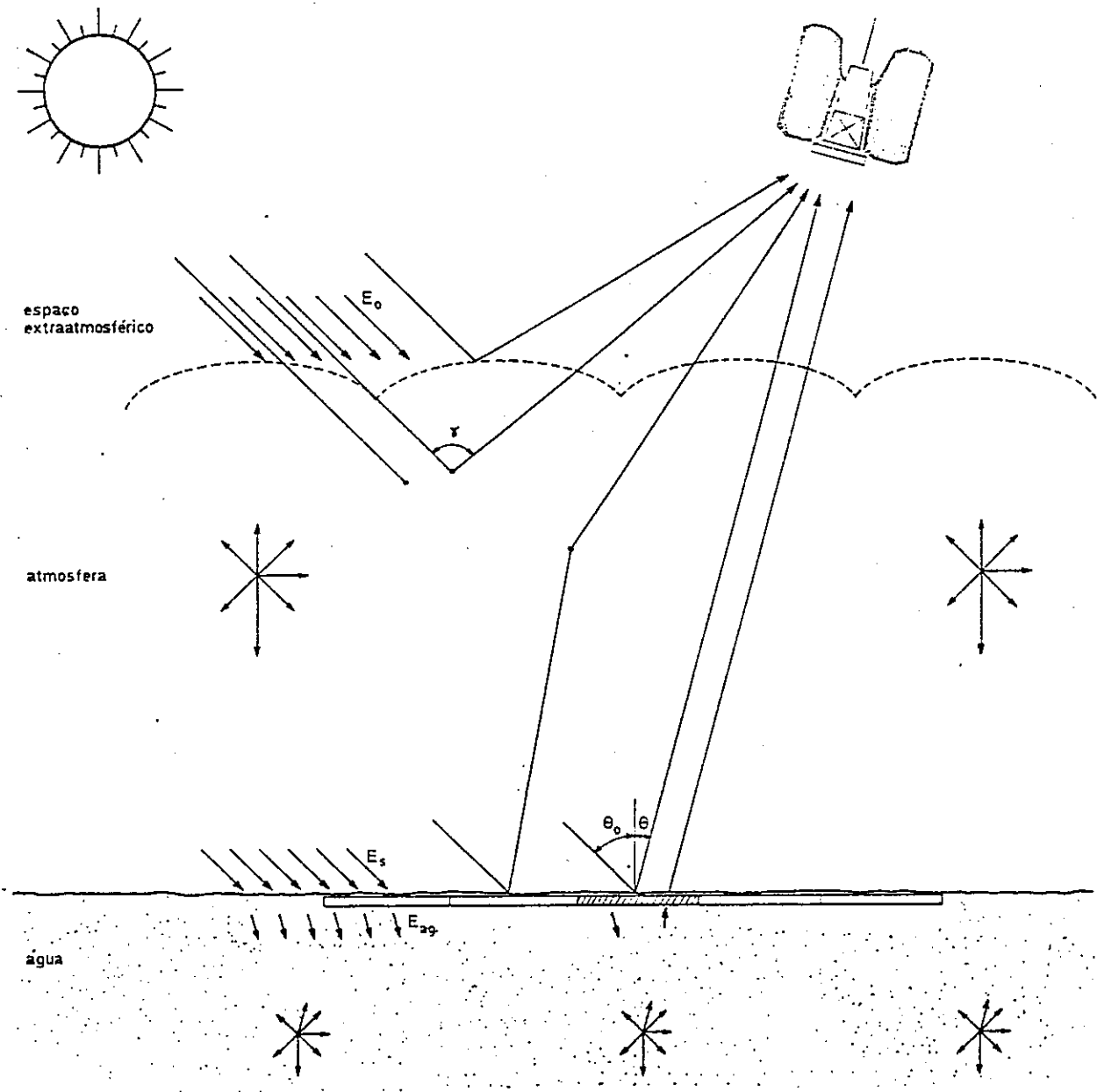


Figura 2.1

Esquema da Observação da Superfície Oceânica por Satélite

Pergunta-se:

Será possível identificar e quantificar apropriadamente os constituintes da água a partir da informação recolhida pelo radiómetro?

É esta questão que motiva o presente trabalho. Para a sua resposta, há que analisar os mecanismos intervenientes no processo de transmissão da radiação através da atmosfera (descendente ou incidente, ascendente ou refletida/emitida pela superfície (reflexão, transmissão, reemissão de novo para a atmosfera)) e do comportamento dos constituintes da água face à acção que sobre eles exerce a radiação que penetrou através da interface ar-água.

2.2 ABORDAGEM DO PROBLEMA

Dada a forma como o problema da avaliação de suspensões na água do mar a partir do espaço foi colocado no parágrafo anterior, vejamos como é abordado com vista à extração da informação relevante para aquele objectivo.

Nas aplicações de detecção remota sobre as superfícies continentais, pretende-se identificar, qualificar e, em certos casos, quantificar os objectos dispostos na superfície, com base na sua assinatura espectral (grasso-modo). O problema é, neste caso, basicamente bidimensional.

As aplicações sobre a água são, pelo contrário, eminentemente tridimensionais, pois a radiação captada pelo radiómetro contém a informação superficial, a atmosférica e também a emergente do interior da massa de água, onde penetrou a radiação incidente, onde foi absorvida, difundida e retrodifundida de novo para a atmosfera. Em todo este processo de transferência radiativa tiveram lugar fenómenos de difusão múltipla.

É a radiação emergente do interior da massa de água (upwelling radiance) que é portadora de informação relevante sobre a presença, em maior ou menor quantidade, dos constituintes.

A coerência ou a fidelidade dos resultados obtidos será pois fortemente dependente da compreensão e consideração do processo óptico que tem lugar no interior da água, qualquer que seja o modo ou o método que leva até àqueles.

Do conjunto de trabalhos a que se teve acesso através de bibliografia, podem considerar-se, basicamente, dois métodos de abordagem do problema da avaliação das suspensões na água do mar a partir de dados de detecção remota: o Método Empírico e o Método Teórico.

Analisam-se seguidamente ambos os métodos, procurando dar-se de cada um a ideia possível da sua aplicabilidade e das suas deficiências.

2.2.1 O Método Empírico.

O Método Empírico caracteriza-se pelo estabelecimento de relações entre dois tipos de observações diferentes, realizados simultaneamente num mesmo conjunto de pontos geográficos: por um lado, medem-se os valores da(s) grandeza(s) característica(s) em estudo; por outro, medem-se as radiancias desses pontos por um radiómetro sobrevoando o local.

Os pares de valores assim obtidos permitem o estabelecimento de uma relação entre aqueles dois conjuntos, com maior ou menor exactidão consoante o rigor das observações, dos métodos analíticos utilizados, etc.

O algoritmo assim obtido é depois aplicado aos restantes pontos da imagem radiométrica, obtendo-se assim a carta de distribuição espacial horizontal da(s) grandeza(s).

2.2.1.1 Análise Crítica do Método.

Tal como acima descrito, parece evidente que o método, condensa o seu utilizador a alguns erros.

De facto, apesar das relações entre a radiometria e a(s) grandeza(s) medida(s) "in situ" serem estabelecidas por métodos estatísticos(*), o número de valores utilizados para o seu estabelecimento é consideravelmente escasso comparado com aqueles a que, posteriormente, será aplicado, não havendo a garantia de que os seleccionados cubram significativamente, a gama de valores da grandeza em estudo realmente presente no espaço geográfico em questão; o que, a acontecer, provocará extrapolações incontroladas ou de resultados dificilmente críveis do

(*) - Em geral correlações simples, uni ou multiespectrais que adiante se arrementam, o que confere desde logo uma certa filtragem dos dados e uma margem de erro quantificável, neste caso.

algoritmo.

Por outro lado, e decorrente da descrição apresentada, nenhuma consideração é feita sobre as propriedades ópticas do meio, as quais, como se disse atrás, são determinantes para a fidelidade dos resultados obtidos.

Porém, é inesquecível a relativa simplicidade do método. E, aliás, devida a essa simplicidade que diversas tentativas têm sido feitas no sentido de se reduzirem alguns destes inconvenientes, por actuação simultânea nas técnicas de medição "in situ", nos radiómetros utilizados e, em alguns exemplos, nos próprios algoritmos.

2.2.1.2 Correção de Alguns dos Inconvenientes do Método.

2.2.1.2.1 A Nivel da Observação/Medição

Como se diz em outro local deste trabalho, a radiação captada pelo radiómetro, referente a uma parcela da superfície da água (pixel) é composta pela radiação reflectida por esta, pela retrodifundida pelas camadas onde penetrou a incidente, pela radiação retrodifundida pelas partículas da atmosfera, e que nunca atingiu a superfície, e pela radiação reflectida pelas parcelas vizinhas que, por difusão atmosférica, se interpõe na linha de visada do pixel em estudo (Fig. 2.1).

Eventualmente, poderá haver uma componente devida à reflexão especular do Sol na superfície da água. Porém, é, em geral, ignorada, por poder ser controlável a sua (não) presença, quer por escolha apropriada das condições de observação radiométrica (instante de observação, orientação do voo, etc.), quer por regulação apropriada do radiómetro, evitando-a.

A influência da atmosfera no sinal registado pelo radiómetro é considerada, para efeitos de aplicação do Método Empírico, do seguinte modo:

1- A nível do radiómetro utilizado:

Escolha de um radiómetro multi-espectral que:

- a) opere num número adequado de bandas de comprimentos de onda, e adequados estes, não só à(s) grandezas em estudo, como à caracterização da atmosfera;
- b) disponha de sensibilidade suficiente para detectar as intensidades radiométricas relativamente baixas provenientes da superfície da água e de uma resolução radiométrica capaz de detectar as pequenas variações espaciais daquelas mesmas intensidades, em cada banda espectral;
- c) disponha de um ângulo de abertura (IFOV) suficientemente pequeno para reduzir a probabilidade de captação da radiação de parcelas vizinhas, devida à difusão atmosférica.

2- A nível das técnicas de medição "in situ":

- a) medição da(s) grandeza(s) representativa(s) da qualidade da água em vários pontos correspondentes a um (suposto) mesmo pixel, para deles se extrair um valor médio, reduzindo a probabilidade de se utilizar um valor pontualmente anómalo relativamente à capacidade resolvente, geométrica e radiométrica, do radiómetro utilizado;
- b) (tentativa de) garantia de representatividade da soma de valores possíveis da(s) grandeza(s) em estudo na área de medição, de modo a se evitarem extrapolações na aplicação do algoritmo;
- c) medição da(s) grandeza(s) a diversas profundidades e até à profundidade de máxima penetração da radiação incidente de cada banda espectral em que opera o radiómetro, embora com maior densidade junto à superfície, em cada ponto geográfico seleccionado, o qual será caracterizado pela média ponderada das medições em profundidade;

d) medição num número suficientemente elevado de pontos, convenientemente distribuídos pela zona em estudo;

e) medição de uma grandeza que caracterize a atmosfera interposta entre o radiómetro e a superfície da água, nomeadamente a Transmissividade óptica espectral ou a Opacidade.

Como se depreende desta enumeração, não só se exige uma considerável disponibilidade de meios técnicos e humanos para a realizar (itens 2), como também um conhecimento razoável da distribuição espacial e sua variação no tempo (item 2d), para garantir algoritmos fiáveis.

2.2.1.2.2 Ao Nível do Processamento das Observações/Medições

Uma vez na posse deste conjunto de dados, radiométricos e da(s) grandeza(s) medida(s), procede-se à correcção atmosférica dos primeiros.

De facto, a radiação captada pelo radiómetro, e de acordo com o referido no início deste parágrafo, pode ser traduzida pela seguinte equação (simplificada):

$$L_{rad}(\lambda) = L_{atm}(\lambda) + T L_{ag}(\lambda) \quad (2-1)$$

com:

L_{rad} = Radiação captada pelo radiómetro;

L_{atm} = Radiação atmosférica (path radiance);

L_{ag} = Radiação proveniente da água (upwelling radiance);

T = Transmissividade atmosférica total (directa + difusa).

A correcção atmosférica no Método Empírico consiste na subtracção da parcela ' L_{atm} ' ao valor ' L_{rad} ', obtendo-se:

$$L'_{ag}(\lambda) = T L_{ag}(\lambda) = L_{rad}(\lambda) - L_{atm}(\lambda) \quad (2-2)$$

o que dá o valor da radiação da água tal como é 'observada' à altitude a que se encontra o radiómetro.

Aquela parcela (L_{atm}) pode ser obtida por um dos seguintes métodos:

- 1- através de um modelo adequado da atmosfera, a partir do(s) valor(es) característico(s) desta, medido(s) durante a campanha de medições 'in situ' (item 2e), em conjunto com outros dados meteorológicos e atmosféricos (composição de gases, poeiras, aerossóis, vapor de água, etc.).
- 2- Através do valor residual da radiação medida numa banda espectral em que a reflectância da água seja nula ou muito baixa (p.ex., na gama dos vermelhos ou infravermelhos próximos).

Neste último caso, que é o mais utilizado, procura-se no conjunto de pixels da imagem os que, naquela banda espectral, apresentam o valor mínimo. Este é o 'valor residual' atrás referido e que traduz a componente atmosférica NESTA banda espectral.

Para se determinar a componente atmosférica nas outras bandas espectrais (necessariamente de menor comprimento de onda, para serem portadoras de informação relativa aos constituintes da água) usa-se um dos seguintes processos:

- 1- considera-se que o 'valor residual' ou a radiação atmosférica é o valor (ou média dos valores) dos pixels homólogos dos que apresentam valor mínimo na banda espectral de baixa reflectância da água.
- 2- estabelecem-se correlações (em geral lineares) entre cada uma das bandas espectrais remanescentes (variáveis explicadas) e a banda espectral de baixa reflectância da água (variável explicativa).

O valor da radiação atmosférica de cada uma das bandas espectrais remanescentes é a ordenada na origem da recta de regressão assim obtida.

É óbvio que o processo correctivo acima descrito não pode ser aplicado a regiões extensas pois as condições atmosféricas podem não ser uniformes, não se apresentando convenientemente eficiente a correcção operada.

Argumentam alguns autores e defensores do método que o problema é contornado pela escolha adequada do algoritmo.

2.2.1.3 Tipos de Algoritmos do Método Empírico.

Uma vez efectuada a correcção do efeito atmosférico traduzido pela equação (2-2), estabelecem-se então relações entre as radiâncias corrigidas e os valores da(s) grandeza(s) medida(s) na água.

Dos algoritmos inicialmente desenvolvidos, não parece haver uma razão lógica, ou devidamente apoiada por considerações sobre os fenómenos físicos em estudo, que justifique a preferência por um modelo relativamente a qualquer outro.

Em geral, os modelos são estabelecidos de modo que:

- 1- a lei definida apresente a melhor correlação possível (coeficiente de correlação elevado);
- 2- a aplicação do algoritmo aos pixels da imagem providenciem a obtenção de uma boa separabilidade entre dois pixels vizinhos com valores da grandeza representada muito próximos.

Os algoritmos são em geral:

- 1- Combinações lineares das bandas espectrais do radiómetro utilizado, na forma:

$$G = a_0 + a_1 L(\lambda_1) + \dots + a_n L(\lambda_n) \quad (2-3)$$

em que:

G = valor da grandeza em estudo;

L = valores das radiâncias (corrigidas) medidas na banda espectral i ;

a_i = coeficientes determinados por um critério de melhor ajustamento;

n = número de bandas espectrais em que opera o radiómetro, ou inferior, convenientemente escolhidas.

2- Rácios entre conjuntos de duas bandas espectrais, ('i' e 'j') na forma:

a)

$$G = a_0 + a_1 \frac{L(\lambda_i)}{L(\lambda_j)} \quad (2-4)$$

b)

$$G = a_1 \left(\frac{L(\lambda_i)}{L(\lambda_j)} \right)^{a_2} \quad (2-5)$$

3- Combinações lineares dos rácios anteriormente referidos ou outros, nas formas:

a)

$$G = a_1 \frac{L(\lambda_1)}{L(\lambda_2)} + \dots + a_i \frac{L(\lambda_i)}{L(\lambda_{i+1})} + \dots + a_{n-1} \frac{L(\lambda_{n-1})}{L(\lambda_n)} \quad (2-6)$$

b)

$$G = \frac{a_1 L(\lambda_1) + \dots + a_n L(\lambda_n)}{\sum_{i=1}^n L(\lambda_i)} \quad (2-7)$$

c)

$$G = a \frac{L(\lambda_j)}{\sum_{i=1}^n L(\lambda_i)} \quad (2-8)$$

Neste tipo de lei, o quociente utilizado tem a designação de 'Rácio Normalizado', traduzindo a 'percentagem' de radiação da banda j relativamente ao albedo total.

d)

$$G = a_0 + a_1 \frac{\pi L(\lambda_i)}{E_{inc}(\lambda_i)} \quad (2-9)$$

e)

$$G = a_0 + a_1 \frac{\pi L(\lambda_j)}{\sum_{i=1}^n E_{inc}(\lambda_i)} \quad (2-10)$$

com $E_{inc}(\lambda_i)$ = irradiância espectral da banda i, incidente na superfície do mar.

Como se depreende, nestes dois últimos exemplos, o valor da grandeza é

expresso não em função do quociente entre duas bandas espectrais mas da reflectância ou do albedo espectral; como também pode ser designado o quociente ali indicado.

4- Outras combinações não lineares entre as bandas espectrais.

Aparentemente, e como refere McCLUNEY 1976, "...any reasonably well behaved mathematical function could be used".

Os algoritmos baseados nos quocientes entre reflectâncias de dois comprimentos de onda, permitem, no entanto, reduzir a dependência dos resultados das condições radiométricas incidentes, e, deste modo, "garantirem alguma "universalidade" aos mesmos".

O problema põe-se, porém, quando não existe, à priori, o conhecimento de qual o algoritmo mais adequado a aplicar. A este respeito, se o método das tentativas se mostra pouco sugestivo e moroso, é a consideração do processo físico da interacção "radiação - matéria (água, atmosfera)" que permitirá a utilização mais adequada do Método Empírico.

De facto, a partir das propriedades ópticas das águas naturais e do conhecimento do comportamento radiométrico da atmosfera, uma relação, embora empírica, foi estabelecida com bons resultados na avaliação da concentração de material sólido em suspensão (ob. citada):

$$C = a_1 \frac{L(\text{vermelho})}{L(\text{verde})} \frac{1 + a_2 L(\text{verde})}{1 + a_3 L(\text{vermelho})} \quad (2-11)$$

sendo C o valor da concentração do material sólido em suspensão e os restantes símbolos com o significado dado atrás. Porém, aquele autor não indica as unidades em que se exprimem.

Como se referiu anteriormente, nem todos os problemas são completamente resolvidos com o processo correctivo atrás citado. Alguns deles referem-se à não

uniformidade da atmosfera; outros à não consideração da interdependência dos diversos constituintes da água entre si (matéria orgânica e inorgânica) e destes com a radiação electromagnética resistada pelo radiómetro.

Para alguns autores, a solução reside na consideração de bandas espectrais segundo as quais aqueles constituintes têm uma resposta espectral característica.

A partir de observações radiométricas efectuadas em 4 canais (466, 525, 550, 600nm) a bordo de aviões voando a cerca de 100m de altitude, e de medições 'in situ' de concentrações de fitoplâncton, de substâncias amarelas e de sedimentos, efectuadas no Golfo da Guiné durante um período de ocorrência de 'upwelling', com estados atmosféricos de considerável e frequente nebulosidade (predominância da radiação difusa) VIOLLIER et al. 1978 verificaram que os efeitos devidos à reflexão pela superfície e resistados no radiómetro eram consideravelmente reduzidos se se procedesse a uma correlação que utilize a diferença da reflectância de bandas espectrais (VIOLLIER et al. 1978; SØRENSEN 1980).

Verificaram aqueles autores que:

- 1- O teor clorofiliano poderia ser razoavelmente quantificado por uma relação envolvendo a diferença das reflectâncias $P(466)$ e $P(525)$, i.e., entre a radiação azul e verde;

$$C=f[\rho(466)-\rho(525)] \quad (2-12)$$

Com esta relação, valores elevados da concentração de clorofila corresponderiam a valores negativos daquela diferença, sendo positivos mas relativamente baixos os valores da diferença da "intensidade" radiométrica reflectida naqueles 2 comprimentos de onda para teores baixos de clorofila.

- 2- A diferença entre as reflectâncias das regiões amarela e vermelha (550 e 600nm) constitui um bom índice de turbidez e da presença de matéria inorgânica em suspensão.

- 3- Uma relação entre as diferenças $\rho(466) - \rho(525)$ e $\rho(550) - \rho(600)$ mostra a dependência dos teores clorofilianos nas águas em função da maior ou menor concentração de matéria inorgânica, embora não universalmente aplicável.
- 4- Embora um algoritmo baseado na diferença de reflectâncias se tenha mostrado eficaz na eliminação dos efeitos de reflexão do céu e nuvens pela superfície do oceano, existe em contrapartida um elevado grau de exactidão no cálculo das reflectâncias espectrais (boa resolução radiométrica do radiómetro p.ex.).

2.2.1.4 A Questão da Universalidade dos Algoritmos.

Como foi referido, a forte dependência dos algoritmos descritos num grande número de factores, dificilmente controláveis (radiação incidente, presença de substâncias na água mutuamente dependentes, outros), torna crítica a sua aplicação "indiscriminada", mesmo para zonas restritas.

No entanto, continuam a desenvolver-se esforços no sentido de examinar a variabilidade (no tempo e no espaço) das relações "grandezas de qualidade de água vs. radiação captada por detecção remota" para se determinarem as condições a que devem obedecer os algoritmos a construir, de modo que estes possam ser aplicados num leque variado de situações, com exactidão suficiente.

De modo resumido, as conclusões a que se tem chegado são as seguintes:

- 1- As grandezas radiométricas a confrontar com as grandezas de qualidade de água devem ser, elas próprias, independentes das condições ambientais segundo as quais as observações foram efectuadas.

Neste sentido, "dá-se preferência" à Reflectância relativamente à Radiância (McCLUNEY 1978, VIOLLIER et al. 1978, HOLYER 1978, outros), e naquela, ao valor da relação entre a radiação emergente imediatamente abaixo da superfície das águas (que será resultante do processo óptico que teve lugar no interior do corpo de água em função dos constituintes presentes) e a radiação incidente.

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi L_{em}(\lambda)}{E_{inc}(\lambda)}$$

(2-13)

2- As grandezas radiométricas devem ser observadas em gamas de comprimentos de onda às quais correspondam comportamentos ópticos típicos da água e dos seus constituintes.

A este respeito, se as grandezas de qualidade de água a confrontar se podem traduzir pela presença de matéria orgânica, de substâncias amarelas e de sedimentos em suspensão, esta recomendação parece apontar para uma progressiva consideração dos aspectos físicos ligados ao comportamento óptico daquelas substâncias quando em solução ou suspensão na água.

Como se verá na abordagem do Método Teórico ou Racional, esta atitude 'aproxima' os dois métodos nesta fase do processamento.

3- As relações a estabelecer devem ser baseadas em dados correspondentes a um leque MUITO variado de condições ambientais (de luminosidade, de ângulos de incidência solar e outras; de teores de suspensões e respectivos tipos), observados em diversas regiões do globo (lagos interiores, rios, estuários e oceanos; McCLUNEY 1976), para que sejam representativas, constituindo um banco de dados óptico-oceanográfico mundial.

4- Os algoritmos a estabelecer devem explorar convenientemente os métodos estatísticos disponíveis, para que, não só se obtenham correlações significativas entre as variáveis presentes, como determinem, para cada grandeza, as variáveis radiométricas mais adequadas.

2.2.2 O Método Teórico ou Racional

Como a própria designação do método o indica, o problema da caracterização da qualidade de água por detecção remota é aqui abordado com recurso à teoria da propagação da radiação electromagnética na água do mar e na sua interacção com os constituintes desta, ou seja, as propriedades ópticas do conjunto.

Em termos quantitativos, são as propriedades ópticas da água e das substâncias dissolvidas e em suspensão que se relacionam matematicamente com a radiação emergente captada pelo sensor.

Por outras palavras, enquanto no Método Empírico se procura estabelecer uma relação ou um algoritmo entre uma grandeza característica de qualidade de água (p.ex., teor de suspensões) com as radiancias captadas pelo sensor, através de correlações entre aqueles dois conjuntos de dados 'simultaneamente' medidos; no Método Teórico procura-se chegar aos valores das grandezas de qualidade através das propriedades ópticas do meio e que podem ser observadas a partir das radiancias captadas. 'Pressupõe-se' que, variações nos valores correspondentes a uma 'água-padrão' (água pura, p.ex.), estejam relacionados com a presença de substâncias na água observada. Além disso, algumas 'combinações características' das diferenças de valores das propriedades ópticas entre a água observada e a água pura, permitem a identificação dos constituintes (matéria orgânica, matéria inorgânica, p.ex.).

Tal como no Método Empírico, a radiancia captada pelo sensor que interessa para o estudo da caracterização da qualidade da água é a radiancia da superfície (ou, como alguns autores o preferem, a imediatamente antes de emergir à superfície (subsurface upwelling radiance)), i.e., a que resulta da radiancia captada pelo sensor à altitude de sobrevôo da resição em estudo, depois de se lhe ter retirado a componente atmosférica.

Assim, admite-se, nas considerações que a seguir se apresentam, de que se dispõe já da radiancia emergente, sendo de momento irrelevante se se trata da subsuperficial, se da acima da superfície.

A exposição que resumidamente se apresenta sobre o Método Teórico baseia-se num artigo de McCLUNEY 1976, complementada com referências a outros trabalhos, de que se destacam ROBINSON 1985, STURM 1983, ARANUVACHAPUN 1981, HOLYER 1978, IVANOFF 1973 e MOREL 1973.

Segundo McCLUNEY, citando NICODEMUS (F.E. Nicodemus, "Radiance", Am. Journal of Phys., V31, 1963), no Modelo Teórico podem considerar-se ainda dois tipos de abordagem: a macroscópica e a microscópica.

2.2.2.1 Modelo Macroscópico

Nesta forma de abordagem do problema por via Teórica, Racional ou Analítica, é a partir da teoria da transferência radiativa no interior da água, que se obtém o valor da radiação emergente esperada, considerando os efeitos de difusão múltipla motivada pelos constituintes da água.

As propriedades espectrais da água do mar são traduzidas pelas grandezas: Coeficiente de Extinção ou de Atenuação espectral, $c(\lambda)$; Coeficiente de Absorção espectral, $a(\lambda)$; Coeficiente de Difusão espectral, $b(\lambda)$; Função de Difusão Espectral Volumétrica $\beta(\lambda, \theta)$, ou Função de Fase de Difusão $p(\lambda, \theta)$ e Albedo de Difusão $\omega(\lambda)$.

Entre estes, podem estabelecer-se as seguintes relações:

$$\omega(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{c(\lambda)} \quad (2-14a)$$

$$p(\lambda, \theta) = \frac{\beta(\lambda, \theta)}{b(\lambda)} \quad (2-14b)$$

$$\beta(\lambda, \theta) = c(\lambda) \omega(\lambda) p(\lambda, \theta) \quad (2-14c)$$

Vários modelos, no contexto do Modelo Macroscópico, foram desenvolvidos com vista à solução do problema. Assim, conhecidos que sejam aqueles parâmetros e a radiação incidente, obtidos por via experimental (medição "in situ" ou em laboratório) ou deduzidas teoricamente, distinguem-se os seguintes modelos, correspondendo a determinadas simplificações e hipóteses:

1- Modelo de difusão simples:

É o modelo mais simples, aplicado a corpos de água homogêneos na dimensão horizontal, mas estratificados na direcção vertical, e opticamente profundos (não há reflexão do fundo).

Algumas limitações se lhe apontam, nomeadamente, o ser apenas aplicável a águas pouco turvas e na gama de comprimentos de onda dos azuis e verdes ($\omega < 0.4$, $\lambda < 550\text{nm}$), não sendo pois adequado ao cálculo da radiação emergente na totalidade do espectro visível.

2- Modelo de quasi-difusão simples:

É uma modificação do anterior, simulando alguns aspectos da difusão

múltipla, cujo tratamento analítico-numérico é complicado.

Baseia-se na consideração de um coeficiente de extinção que tem em conta a forte intensidade de difusão ($b(\lambda)$ elevado) na direcção de propagação que as águas naturais manifestam, dado por:

$$c^-(\lambda) = c(\lambda) (1 - \omega(\lambda)b^+(\lambda)) \quad (2-15a)$$

em que:

$$b^+(\lambda) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} d\theta [\beta(\lambda, \theta) \sin(\theta)] \quad (2-15b)$$

é o Coeficiente de Difusão na direcção de propagação e

$$b^-(\lambda) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\pi/2}^{\pi} d\theta [\beta(\lambda, \theta) \sin(\theta)] \quad (2-15c)$$

é o Coeficiente de Retrodifusão.

Neste caso, a radiancia emergente é dada por (GORDON 1975):

$$L_{ag}(\lambda) = \frac{k}{\pi} E_{inc}(\lambda) \frac{\omega(\lambda) b^-(\lambda)}{(1 - \omega(\lambda)(1 - b^-(\lambda)))} \quad (2-16)$$

com $E_{inc}(\lambda)$ = irradiancia espectral incidente na superfície.

Esta aproximação já permite a sua aplicação a águas mais turvas e a todo o espectro visível. Porém, não se aplica a águas pouco profundas, e/ou

límpidas, nas quais o fundo contribui, com a sua reflexão, para o valor da radiancia emergente.

3- Modelos Analíticos ou Matemáticos:

Pretendem aplicar a equação de transferência radiativa e dela obter a solução procurada.

Esta equação pode exprimir-se por:

$$\frac{d}{dz} L(z, \lambda, \theta, \phi) = -c(z, \lambda) L(z, \lambda, \theta, \phi) + \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^\pi d\theta' [L(z, \lambda, \theta, \phi, \theta', \phi') \beta(\lambda, \theta, \phi, \theta', \phi') \text{sen}(\theta')] \quad (2-17)$$

A solução desta equação (expressão da radiancia em cada ponto (z, θ, ϕ) em função das propriedades ópticas da água) é difícil de se obter por via analítica. Vários métodos têm sido propostos, baseando-se cada um em algumas hipóteses simplificativas. De entre estas, distinguem-se:

- a) Representação da função de difusão volumétrica por uma série de polinómios de Legendre $(P_n(\theta))$ da forma:

$$\beta(\theta) = \frac{b}{4\pi} \sum_{n=0}^N a_n P_n(\theta) \quad (2-18a)$$

tendo LENOBLE (in JERLOV 1973) retido os 3 primeiros termos obtendo:

$$\beta(\theta) = \frac{b}{2\pi} [1 + 1.73 P_1(\theta) + P_2(\theta)] \quad (2-18b)$$

- b) Modelo de Preisendorfer ou da "solução natural":

Supondo conhecida a radiancia imediatamente abaixo da superfície, invariante no tempo e da posição horizontal, variando a 2a. parcela da equação (2-17) apenas na vertical de acordo com a seguinte lei:

$$L^*(z, \theta, \phi) = L(0, \theta, \phi) e^{-kz} \quad (2-19)$$

Sendo 'k' um coeficiente de atenuação, o modelo de Preisendorfer define a Radiação em cada ponto pela expressão:

$$L(z, \theta, \phi) = L(0, \theta, \phi) e^{-cz} + L(0, \theta, \phi) e^{-kz} \frac{1 - e^{-[c+k \cos(\theta)]z}}{c+k \cos(\theta)} \quad (2-20)$$

Neste modelo, a radiação retrodifundida (L^-) é dada por:

$$L^-(z, \theta, \phi) = \frac{1}{c+k \cos(\theta)} L(0, \theta, \phi) e^{-kz} \quad (2-21)$$

Verificaram alguns autores que a forte anisotropia da função de difusão volumétrica $\beta(\lambda, \theta)$, é porém razoavelmente invariante com os diversos tipos de águas naturais em que foi observada, pelo que estas podem ser caracterizadas adequadamente pela relação $b(\lambda)/c(\lambda)$, o Albedo de Difusão, $w(\lambda)$.

4- Métodos Numéricos:

Nestes, é o método de Monte Carlo o mais utilizado, com a vantagem da flexibilidade que lhe é reconhecida em outras aplicações.

O método consiste em "acompanhar a marcha" de um grande número de fotões interagindo com as partículas em suspensão e as moléculas de água, "sofrendo" assim os fenómenos de absorção, de difusão, de reflexão, etc. Estes fenómenos de interacção são, neste modelo, descritos por leis de probabilidade, atribuindo-se inicialmente a cada fotão um factor de ponderação que varia ao "longo do tempo" em função da acção sofrida. O resultado é, então, uma distribuição probabilística da radiação.

O desenvolvimento deste tipo de metodologia conduziu à definição de alguns modelos que relacionam a radiação emergente com as propriedades ópticas da água do mar.

Da bibliografia consultada, podem distinguir-se os seguintes:

1- Modelo de Gordon:

$$\rho = k \frac{b^-/a}{1+b^-/a} \cong k \frac{\omega b^-}{1-\omega(1-b^-)} \quad (2-22)$$

onde o coeficiente 'k' pode tomar os valores 0.3244 a 0.3687 consoante o estado atmosférico: limpo ou encoberto, respectivamente, ou, por outras palavras, com predominância da radiação directa ou difusa.

2- Modelo de Viollier:

$$\rho = k_1 \frac{b_{ag}}{a} + k_2 \frac{b_p}{a} \quad (2-23)$$

com 'k1' e 'k2' a tomarem os valores 7.55E-2 e 0.227E-2, respectivamente.

3- Modelo de Morel e Prieur:

$$\rho = 0.33 \frac{b^-}{a} \quad (2-24)$$

4- Modelo apresentado por STURM 1981, atribuído aos mesmos autores:

$$\rho = 0.307 \frac{0.5 b_{ag} + 0.012 b_p}{a_{ag} + a_c C + a_p + b_{ag} + b_p} = 0.307 \frac{b^-}{c} \quad (2-25)$$

Nestes Modelos, os diversos parâmetros intervenientes têm os seguintes significados:

- a = coeficiente de absorção da água do mar;
- a_{ag} = coeficiente de absorção da água do mar pura;
- a_c = coeficiente de absorção normalizado da Clorofila;
- a_p = coeficiente de absorção das partículas inorgânicas, dado por $a_p = a' b_p$ (550), com a' coeficiente de absorção normalizado das partículas;

- b_{aq} = coeficiente de difusão da água do mar pura;
- b = coeficiente de difusão da água do mar;
- b_p = coeficiente de difusão das partículas inorgânicas;
- C = teor de concentração de substâncias orgânicas clorofilianas.

2.2.2.2 Modelo Microscópico

Nesta forma de abordagem do Método Teórico, pressupõem-se conhecidos os valores das grandezas de qualidade, assim como algumas das propriedades ópticas individuais dos diversos constituintes. O objectivo é o de se determinar as propriedades ópticas do conjunto.

Também aqui se distinguem dois 'caminhos':

- 1- A via analítico-numérica, com recurso às teorias de absorção e difusão, como as de Lorenz-Mie e posteriormente desenvolvidas por outros autores (Von de HULST 1957, p.ex.);
- 2- A via experimental, na qual, através de medições controladas em laboratório, se procuram estabelecer relações entre as propriedades ópticas das substâncias em suspensão e/ou dissolvidas com o respectivo teor de presença.

De acordo com McCLUNEY, a via experimental parece oferecer vantagens relativamente à analítico-numérica, na medida em que, nesta, não são evitáveis operações de medição experimental dos parâmetros intervenientes.

Por outro lado, e segundo o mesmo autor, a via experimental permite a definição das características que devem ter os sistemas de detecção remota das propriedades ópticas da água do mar.

De facto, na medida em que o método consiste na observação e medição das propriedades difusoras e absorventes da radiação electromagnética dos constituintes típicos da água do mar, está pois em posição de poder indicar os requisitos técnicos dos equipamentos de detecção remota (sensibilidade ou definição dos valores mínimos detectáveis, resolução radiométrica, etc.), bem como dos

parâmetros que serão efectivamente observados e registados.

A aplicação da teoria de Mie ao meio acústico, no qual se supõe existirem partículas difusoras, esféricas de diâmetro D , caracterizadas por uma distribuição granulométrica e um índice de refração relativo à água n' , permite a definição de um Coeficiente de Difusão das partículas, b_p , dado pela expressão (THOMAS 1979):

$$b_p(\lambda, D, \eta') = \int_D [Q(\lambda, D, \eta') \cdot \frac{\pi D^2}{4} N(D)] dD \quad (2-26)$$

onde:

$N(D)$ = número de partículas de diâmetro D por unidade de volume;

$Q(\lambda, D, \eta')$ = Coeficiente de Eficácia, função da relação 'diâmetro/comprimento de onda' e do índice de refração relativo à água, $\eta' = \eta_p / \eta_{ág}$ (≈ 1.05 para partículas orgânicas e ≈ 1.25 para as inorgânicas).

A resolução da equação (2-26) pressupõe, assim, o conhecimento prévio da distribuição granulométrica, do respectivo índice de refração relativo e da densidade das partículas, para que se possa estabelecer uma relação entre a difusão e a respectiva massa, ou peso volumétrico, ou seja, o teor de suspensões.

O parâmetro Q traduz a relação da energia difundida por uma partícula sobre a energia incidente, e é dado por Von de HULST (THOMAS 1979, MOREL 1973):

$$Q(\lambda, D, \eta') = 2 - \frac{4}{s} \sin(s) + \frac{4}{s^2} (1 - \cos(s)) \quad (2-27)$$

onde 's' é um parâmetro que relaciona a dimensão das partículas com o comprimento de onda e o índice de refração relativo, dado por:

$$s = x|\eta' - 1| \quad (2-28a)$$

$$x = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (2-28b)$$

Quanto à distribuição granulométrica, a maioria dos autores refere que a observação de um grande número de amostras permite considerar a distribuição de JUNGE como uma boa aproximação, sendo dada por:

$$\frac{dN}{dD} \cong k x^{-m}$$

(2-29)

com $m=4$, como valor mais significativo, embora se tenham observado valores entre 3,8 e 4,4.

A análise da variabilidade dos diâmetros das partículas e dos comprimentos de onda, por aplicação das expressões atrás descritas, tem mostrado que o Coeficiente de Difusão das partículas é:

- 1- inversamente proporcional à 4a. potência do comprimento de onda, quando $x \ll 1$.

Corresponde, afinal, à difusão molecular descrita pela teoria de Rayleigh. Porém, para os comprimentos de onda geralmente utilizados na avaliação de parâmetros de qualidade de água por detecção remota (em geral na gama do visível) e para os diâmetros das partículas encontrados, não se aplica este resultado.

Por outras palavras, tal situação corresponderia a considerar-se a água em estudo como "pura", apenas contendo sais dissolvidos responsáveis pela difusão verificada.

- 2- inversamente proporcional ao comprimento de onda quando $x \neq 1$.

Nesta situação, é válida também a expressão que relaciona o coeficiente de difusão em dois comprimentos de onda, um dos quais é, geralmente, tomado como sendo de 550nm, por ser aquele a que a visão humana é particularmente sensível (gama dos verdes). Escreve-se então:

$$b_p(\lambda) = b_p(550) \left(\frac{550}{\lambda} \right) \quad (2-30)$$

- 3- não ser dependente do comprimento de onda quando $x \gg 1$.

Nesta situação diz-se estar-se presente uma difusão não selectiva, dependendo a tonalidade por que se apresentam as suspensões da presença de determinados compostos (minerais ferrosos, p.ex.).

Esta é a situação característica em zonas costeiras, junto a estuários em períodos de maré vazante.

Um dos interesses da determinação do Coeficiente de Difusão reside na possibilidade de dele se poder extrair uma informação rápida dos teores de suspensão.

Admitindo-se um diâmetro característico das partículas presentes, a expressão (2-26) poderá simplificar-se, escrevendo-se $b_p = NSQ$, sendo Q um Coeficiente de Eficácia médio das partículas presentes consideradas esféricas, todas com o mesmo diâmetro característico.

Os teores de suspensão são determinados pela relação directa que existe entre o número de partículas, o volume que ocupam (função da área ali expressa) e da densidade das partículas (massa ou peso volúmico).

MOREL 1980 (citado por STURM 1981) apresenta uma relação do tipo

$$b_p(550) = k S \quad (2-31a)$$

com S=teor de suspensões totais (mg/l) e 'k' variando entre 0.3 e 1.0 em águas onde coexistam matéria orgânica e inorgânica, entre as quais verificou poder estabelecer-se a correlação

$$S = aC^b \quad (2-31b)$$

com S e C (teor de Clorofila) em mg/l e $a=0.41$ e $b=0.78$, obtidos por um ajustamento por mínimos quadrados.

Neste tipo de águas, aquele autor verificou igualmente poder estabelecer-se a seguinte relação entre o coeficiente de difusão e a concentração de fitoplâncton (Clorofila):

$$b_p(550) = u C^v \quad (2-31c)$$

com 'u' variando entre 0.12 e 0.42 e $v=0.63$.

Para águas onde não possa ser estabelecida uma relação do tipo (2-31b) (águas costeiras, p.ex.), IVANOFF 1973 apresenta um trabalho desenvolvido por COPIN-MONTEGUT sobre a relação entre o parâmetro óptico (coeficiente de difusão) e o parâmetro de qualidade (teor de suspensões). Nesse trabalho, salienta-se que, para a mesma quantidade de suspensões, o coeficiente de difusão é menor nas águas costeiras do que nas águas do largo, justificado pela presença, neste tipo de águas, de partículas de menores dimensões mas de maiores densidades.

Porém, o estabelecimento de uma lei que relacione aqueles dois parâmetros (como na equação (2-31a)) impõe a consideração de hipóteses adicionais de validade não confirmada.

Como se diz em outro local deste trabalho, a presença de partículas em suspensão induz uma forma particular à função de difusão volumétrica, $\beta(\lambda, \theta)$, a qual apresenta forte assimetria com um pico acentuado na direcção de propagação da luz. Tal situação conduz a valores muito baixos do coeficiente de retrodifusão, e que MOREL e PRIEUR 1980 cifram em 1,2% do coeficiente de difusão total das partículas.

Para o estudo da difusão da luz no conjunto 'água + constituintes' aqueles autores realizaram um extenso trabalho de caracterização da água do mar pura.

Neste meio, a difusão é sobretudo provocada pelos sais dissolvidos (difusão molecular ou de Rayleigh), para a qual seria válida a conhecida lei de proporcionalidade inversa do coeficiente de difusão com a 4a. potência do comprimento de onda.

Aqueles autores, porém, verificaram que para um meio denso como a água do mar, o expoente mais adequado para o estabelecimento daquela relação é -4,3, exprimindo-se o Coeficiente de Difusão por:

$$b_{ag}(\lambda) = b_{ag}(550) \left(\frac{550}{\lambda} \right)^{4.3} \quad (2-32)$$

com $b_{ag}(550) = 0.0015/m$.

Pela simetria da função de difusão volumétrica verificada na água pura, o Coeficiente de Retrodifusão deste meio é 50% do respectivo valor total.

O Coeficiente de Retrodifusão total do meio (água + constituintes) é, então, dado por:

$$b^-(\lambda) = b_{ag}^-(\lambda) + b_p^-(\lambda) = 0.5 b_{ag}(\lambda) + 0.012 b_p(\lambda) \quad (2-33)$$

sendo os coeficientes de difusão presentes no último membro da equação dados pelas relações (2-32) e (2-30).

As propriedades ópticas do meio não ficariam suficientemente caracterizadas sem a consideração da absorção que as substâncias em suspensão manifestam, em particular na gama dos azuis (a tonalidade esverdeada de algumas águas é disso prova evidente).

JOHNSON 1983 e THOMAS 1979 apresentam a seguinte relação para a absorção devida às substâncias orgânicas:

$$a_c(\lambda) = a_c(\lambda_0) e^{-0.0145(\lambda - \lambda_0)} \quad (2-34)$$

expressa por unidade de concentração ($/(m^2/m^3)$).

Para $\lambda_0 = 450nm$, o valor de ' $a_c(450)$ ' varia consoante os autores, julgando-se poderem as diferenças encontradas ser atribuíveis a diversos tipos de substâncias orgânicas presentes nas amostras utilizadas para análise deste parâmetro. Naquele comprimento de onda, encontram-se os seguintes valores: 0,212/ $m^2/(mg/m^3)$ (JOHNSON 1983), 0,0531 (DESCHAMPS et al. 1980) e 0,022 (PRIEUR 1977).

Quanto às restantes partículas, a absorção por elas manifestada é traduzida pela expressão:

$$a_p(\lambda) = a'(\lambda) b_p(550) \quad (2-35)$$

onde $a'(\lambda)$ é um Coeficiente de Absorção determinado pelo ('normalizado ao') Coeficiente de Difusão das partículas a 550nm, por convenção, estando tabelado em resultado de trabalhos experimentais de diversos autores (DESCHAMPS et al. 1980).

O terceiro componente absorvedor é a água pura do mar, que, como é sabido, manifesta crescente e forte capacidade absorvente com o comprimento de onda (o mínimo situa-se na gama dos azuis).

A absorção do conjunto é assim dada por:

$$a(\lambda) = a_{ag}(\lambda) + a_c(\lambda) C + a'(\lambda) b_p(550) \quad (2-36)$$

2.2.2.3 Análise Comparativa dos Dois Métodos Teóricos

De acordo com o exposto, é aparente a complementaridade dos métodos. Como se viu, os resultados do método Microscópico (caracterização das propriedades óticas das águas expressas nos Coeficientes de Difusão, de Absorção, da Função de Difusão Volumétrica, etc.) constituem os "dados" (input) do modelo Macroscópico, a partir do qual se obtêm as radiancias emergentes ou outros parâmetros radiométricos, necessariamente funções das condições iluminantes e dos constituintes.

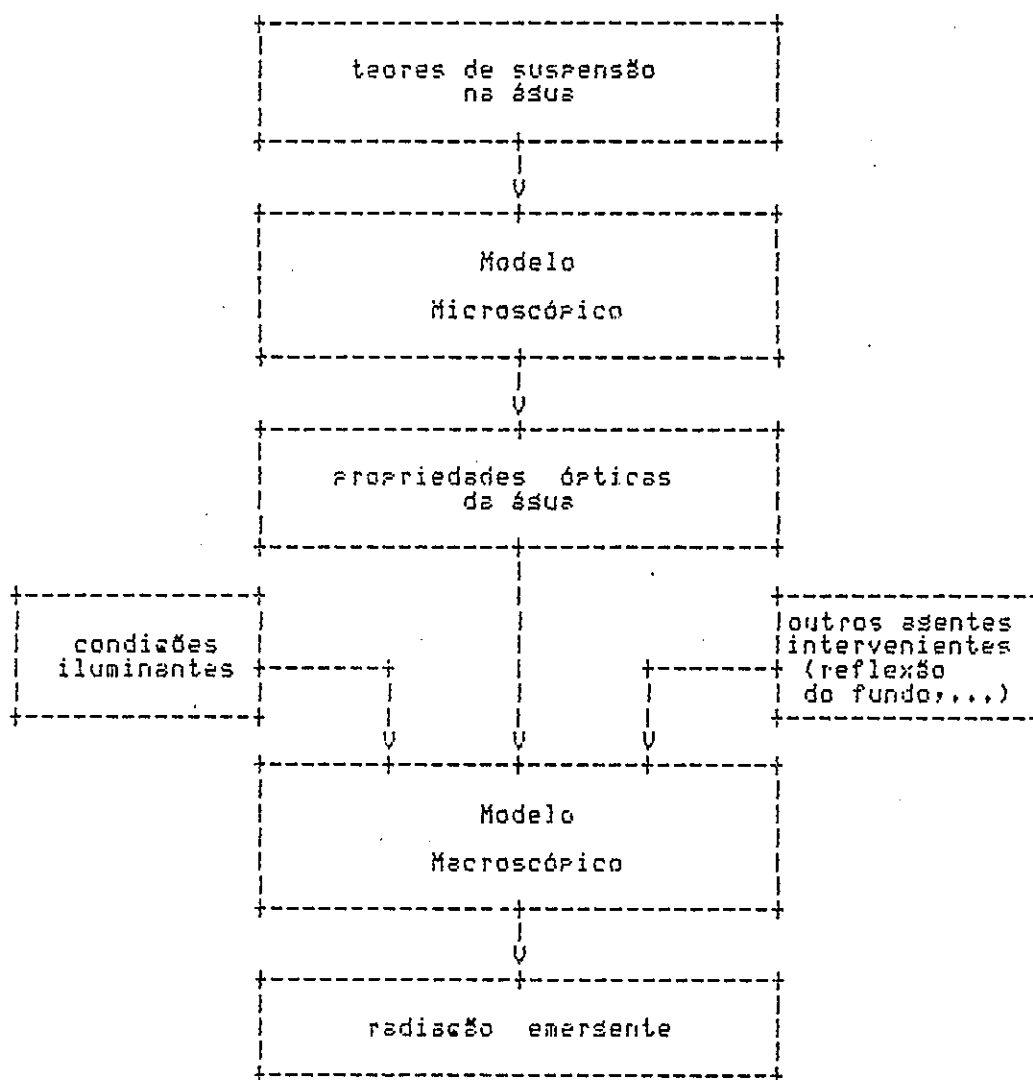


Figura 2.2

Interligação dos Modelos Microscópico e Macroscópico

A Figura 2.2 ilustra este encadeamento lógico, o qual pode ser resumido pelas

seguintes relações esquemáticas:

$$\begin{aligned} \text{Propriedades Ópticas da Água} = & \\ = f(\text{constituintes, propriedades ópticas dos constituintes}) & \end{aligned} \quad (2-37a)$$

$$\begin{aligned} \text{Propriedades Radiométricas Emergentes} = & \\ = g(\text{propriedades ópticas da água, condições iluminantes}) & \end{aligned} \quad (2-37b)$$

E destas relações, esquematicamente expressas, que se inferirão os algoritmos que relacionam os teores de suspensões com a radiação emergente, por exemplo:

$$\text{Teor de Suspensões} = h(\text{radiometria emergente}) \quad (2-37c)$$

2.2.2.4 Os Algoritmos do Método Teórico

Por definição, o método Teórico deveria conduzir à relação procurada entre a quantidade de substâncias em suspensão na água e a radiação emergente.

Duas razões há para que, na realidade, tal não suceda. Por um lado, a solução da equação de transferência radiativa aplicada ao meio aquático não é fácil de se obter sem a consideração de algumas hipóteses simplificativas. Por outro lado, dado o valor excepcionalmente baixo do coeficiente de retrodifusão, este não se apresenta como o parâmetro óptico mais adequado ao seu relacionamento com a matéria em suspensão a partir dos valores de radiação captada por um radiómetro multiespectral aerotransportado ou no espaço.

Por estes motivos, os algoritmos do método Teórico acabam por constituir antes uma base de trabalho para análise do comportamento óptico de "uma água" em estudo, e não como instrumento quantitativo da presença dos seus constituintes.

Nesse sentido, definidos os parâmetros ópticos de uma água, o parâmetro radiométrico preferido para essa análise é a Reflectância (ρ) subsuperficial, dada por:

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi L^-(\lambda)}{E_{inc}(\lambda)} \quad (2-38)$$

Como se viu na abordagem do modelo Macroscópico, vários autores exprimem este parâmetro em função dos parâmetros ópticos da água atrás mencionados,

genericamente (equações (2-22) e (2-25)):

$$\rho = f\left(\frac{b^-}{a}\right) = g\left(\frac{b^-}{c}\right) \quad (2-39)$$

No entanto, dado que a radiancia captada pelo radiómetro se refere à superficial (L_{em}, Radiancia emergente), a qual se relaciona com a subsuperficial (L_{asc}, Radiancia ascendente) pela relação:

$$L_{em}(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)}{\eta^2(\lambda)} L_{asc}(\lambda) \quad (2-40)$$

com:

$\tau(\lambda)$ = Transmissividade na interface ar-água;

$\eta(\lambda)$ = Índice de refração da água;

dá-se ainda preferência a um outro parâmetro que permite, como se verá, uma melhor análise das diversas 'nuances' do comportamento radiométrico dos diversos constituintes. Este novo parâmetro é designado por 'Quociente de Reflectâncias Espectrais' ou, simplesmente, 'Rácio de Reflectâncias' (spectral reflectance ratio):

$$R(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\rho(\lambda_1)}{\rho(\lambda_2)} \cong \frac{L_{em}(\lambda_1) \eta^2(\lambda_1) \tau(\lambda_2)}{L_{em}(\lambda_2) \eta^2(\lambda_2) \tau(\lambda_1)} \cong \frac{b^-(\lambda_1) c(\lambda_2)}{b^-(\lambda_2) c(\lambda_1)} \quad (2-41)$$

Este parâmetro apresenta as seguintes vantagens:

- 1- Dispensa a consideração do valor efectivo do índice de refração da água em estudo, bem como da Transmissividade da interface ar-água (suposta não absorvedora e reflectindo segundo as leis de Fresnel).

De facto, qualquer daqueles dois parâmetros é dependente do teor de salinidade e do comprimento de onda, embora vários autores tenham mostrado ser fraca essa dependência.

A sua consideração na expressão (2-40) obrigaría, no entanto à atribuição

de um valor, necessariamente dependente do valor real da salinidade da água, parâmetro que não é disponível nos dados radiométricos obtidos por satélite para os estudos de qualidade de água (radiómetros passivos, operando na gama do visível e do infravermelho próximo, apenas).

Dada a fraca dependência daqueles parâmetros com o comprimento de onda, sobretudo porque o quociente expresso na equação (2-41) se realiza entre dois comprimentos de onda muito próximos, o Rácio de Reflectância elimina, deste modo, a sua consideração, reduzindo o número de variáveis em análise.

- 2- Ao exprimir-se como o quociente entre as reflectâncias de duas bandas espectrais, permite a análise de sensibilidade espectral (spectral sensitivity analysis) dos constituintes da água, conduzindo, eventualmente, à sua identificação através do estudo da variabilidade de R com os coeficientes de retrodifusão e de extinção (por associação, o de absorção também), tal como se mostra no último termo da equação (2-41).

De facto, se se considerar somente o parâmetro 'Reflectância', dado pela equação (2-39), ou pelas equações (2-22) e (2-25), verifica-se que:

- a) Em princípio, quanto maior o Coeficiente de Retrodifusão, maior a Reflectância (aquele coeficiente aparece no numerador da expressão);
- b) Porém, um valor relativamente baixo da absorção (expressões (2-23) e (2-24)) não conduz, necessariamente a um valor elevado da Reflectância, pois será necessário, neste caso, que haja constituintes difusores (suspensões).

Por outras palavras, tanto a água pura, como a água turba contendo suspensões muito absorvedoras, apresentariam baixos valores de Reflectância, e, como tal, ... indistintos!

Esta 'inconsistência' é menos provável de ocorrer pela consideração do 'Rácio de Reflectâncias'.

Num trabalho apresentado por ARANUVACHAPUN 1981, realizado em águas com predominância de substâncias orgânicas, mostra-se precisamente a adequabilidade deste parâmetro para a análise de sensibilidade atrás referida.

Escolhendo para comprimentos de onda a utilizar na análise os de máxima e mínima absorção manifestada pelos pigmentos clorofilianos (440 e 520nm, respectivamente), aquele autor verificou:

1- em águas de elevado teor de clorofila, a retrodifusão é a componente significativa naquele Rácio.

Nesta situação, aquele parâmetro apresentar-se-ia com um valor relativamente baixo ($b(520) > b(440)$, $R \ll 1$).

2- em águas de baixo teor de clorofila, é a componente absorvedora a dominante ($a(440) > a(520)$), apresentando R um valor baixo mas superior ao anterior.

3- Em águas relativamente límpidas, é a retrodifusão da água na gama dos azuis ($b(440)$) que é dominante, manifestando R um valor relativamente elevado.

Aquele autor conclui que o Rácio em consideração deverá, pois, ser inversamente proporcional ao teor de clorofila das águas.

Ao aplicar esta metodologia em águas nas quais se registava a presença de substância amarela (selbststoff), aquele autor verificou manter-se esta mesma conclusão, porquanto o máximo de absorção coincide com o da clorofila (420nm), não havendo desvio significativo da retrodifusão na gama dos 520nm, acrescentando que a repercussão em R se registava por um decréscimo do valor encontrado para as águas 'clorofilianas'. Pensa-se, porém, que esta análise se deveria ter efectuado também na gama de comprimentos de onda de máxima difusão (mínimo de absorção), 550nm, onde se acentuaria a conclusão apresentada.

Em águas costeiras, onde predominam sedimentos inorgânicos, estes não manifestam absorção significativa na gama dos azuis (420nm), mas, ao contrário, há considerável retrodifusão no 2o. comprimento de onda considerado (o autor não refere qual, deduzindo-se ser o mesmo, 520nm, o que se nos apresenta

incorrecto. Deveria ser de novo 550nm, ou 620nm).

A aplicação do Rácio neste caso confirmaria a regra anteriormente citada: diminuição considerável do valor de R com o aumento de turbidez. Porém, acrescenta que a proporcionalidade inversa também encontrada já não seria linear.

Em suma, o método Teórico de abordagem do problema da quantificação de parâmetros de qualidade de água é, não o método que permite o estabelecimento da relação 'suspensões vs. radiometria' (porque a complexidade dos processos ópticos que têm lugar no oceano e na atmosfera torna impossível a definição da relação procurada), mas tão somente o suporte teórico para a construção de algoritmos empíricos.

Citando ROBINSON 1985, todos os modelos requerem em maior ou menor grau uma componente empírica, p.ex., na calibração paramétrica de modelos analíticos, teóricos, comprovados.

A vantagem da consideração de uma análise teórica (i.e., baseada em considerações como as atrás exemplificadas sobre o método Teórico) está na confiança oferecida pelo modelo, embora empiricamente construído, na sua aplicação em situações diferentes das que serviram de base à sua construção e/ou calibração.

2.3 PROPOSTA DE MODELO DE AVALIAÇÃO DE SUSPENSÕES DA ÁGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA

2.3.1 Considerações Prévias

A apresentação das diversas formas de abordagem do problema de avaliação de parâmetros de qualidade de água a partir de dados radiométricos, salientou a dificuldade em se dispor de um modelo universal com esta finalidade.

De facto, se os modelos empíricos pecam por serem reduzidos à sua aplicabilidade ao conjunto de dados que serviram de base ao seu estabelecimento, os modelos teóricos não oferecem, até ao momento, senão uma base de trabalho de análise explicativa ou interpretativa dos processos ópticos que têm lugar no meio

aquático. As incertezas e/ou as simplificações tomadas na obtenção dos valores de absorção e de retrodifusão espectrais para o estabelecimento das relações (2-22) a (2-25), (2-38) e (2-41) disso são prova, devido à complexidade do comportamento óptico dos constituintes básicos da água.

A solução para o problema tem sido tomada seguindo uma via mista: RACIONAL ou TEÓRICA para a definição (empírica) do algoritmo, tendo em conta os conhecimentos disponíveis sobre o comportamento óptico das águas e seus constituintes, e EMPÍRICA, para a definição dos parâmetros adequados ao modelo.

Por outras palavras, o algoritmo estabelecido entre uma grandeza de qualidade e uma grandeza radiométrica é definido empiricamente, baseado, contudo, numa análise racional do comportamento óptico das águas; os parâmetros que exprimem finalmente o algoritmo são obtidos por análise de regressão, confrontando dois conjuntos de dados, de qualidade e radiométricos, simultaneamente observados.

Alguns autores salientam ainda que, na definição empírica dos algoritmos, deve procurar-se que estes sejam insensíveis às incertezas do algoritmo de correção atmosférica, e, tanto quanto possível, a outras matérias presentes na água.

De facto, este último aspecto acentua a diferença entre a avaliação quantitativa de quaisquer parâmetros no meio aquático e no meio continental, a partir de dados de detecção remota, pois, no primeiro dos domínios referidos, podem coexistir no mesmo pixel vários constituintes que se pretendem identificar e quantificar, o que não acontece, em geral, no segundo.

ROBINSON 1985 cita, a este respeito, um trabalho de RUKATA et al. 1981 o qual demonstra haver a possibilidade de combinações de teores de clorofila e de sedimentos em suspensão não distinguíveis, pela similitude dos respectivos espectros de absorção e de difusão, o que ilustra a dificuldade em se encontrar uma solução única entre a expressão óptica dos constituintes da água em estudo e os respectivos parâmetros de qualidade.

Porém, para a realização deste trabalho, na falta de dados concretos que permitissem 'levantar' a ambiguidade referida, não se encontrou outra via para a resolução do problema senão a de analisar criteriosamente o comportamento óptico da água a partir das referências disponíveis (de certo modo retratadas nos parágrafos 2.2) e propor a metodologia que se apresenta de seguida para a construção do modelo.

2.3.2 Análise do Comportamento Óptico da Água do Mar

Referiu-se anteriormente que a assinatura espectral da água do mar pura constitui a base de referência a partir da qual se deduzem as características espectrais de outros tipos de águas, isto é, nos quais a presença de substâncias em solução e/ou em suspensão provocam alteração do espectro de absorção e de difusão.

Na figura 2.3, mostra-se este espectro para o caso da água pura do mar, na qual se salienta o comportamento inverso do Coeficiente de Difusão relativamente ao de Absorção, em função do comprimento de onda. É, aliás, este comportamento que traduz a cor azul típica do oceano.

Para se proceder à análise do comportamento óptico da água do mar, é usual considerar-se esta subdividida em dois tipos fundamentais (ROBINSON 1985, STURM 1983, outros), embora em Oceanografia Física esta subdivisão seja insuficiente (JERLOV 1976):

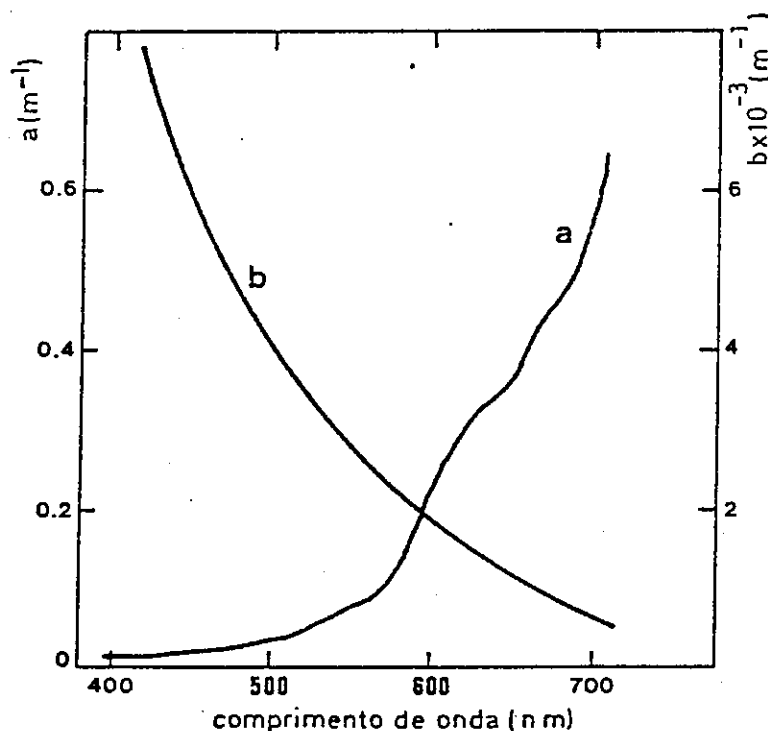


Figura 2.3

Espectro de Difusão e de Absorção da Água do Mar Pura
(in ROBINSON 1985)

- 1- Águas cujas propriedades ópticas são dominadas pela presença de fitoplâncton e produtos derivados da sua decomposição (Tipo I);

2- Águas em que predominam suspensões minerais, não correlacionáveis com matéria orgânica, ou substâncias amarelas não provenientes da decomposição de fitoplâncton (Tipo II).

De facto, são estes os três constituintes fundamentais da água do mar, os quais se pretendem quantificar a partir de dados radiométricos obtidos do espaço.

Resumem-se de seguida os aspectos relevantes das propriedades ópticas de cada um, para a formulação de um algoritmo quantificador da respectiva presença.

Na figura 2.4 ilustra-se um espectro de Reflectância típico de águas de Tipo I. A curva a traço interrompido corresponde à água do mar pura, e a seta indica o modo como varia o espectro com o aumento do teor de clorofila.

A combinação da absorção e da difusão das partículas clorofilianas faz baixar o espectro de Reflectância abaixo do da água pura em comprimentos de onda inferiores a 540nm, aproximadamente, sendo ligeiramente superior àquele em comprimentos de onda superiores. O aumento da quantidade de clorofila presente na água acentua este efeito, com um mínimo claramente definido na zona dos azuis (440nm), causado pela absorção.

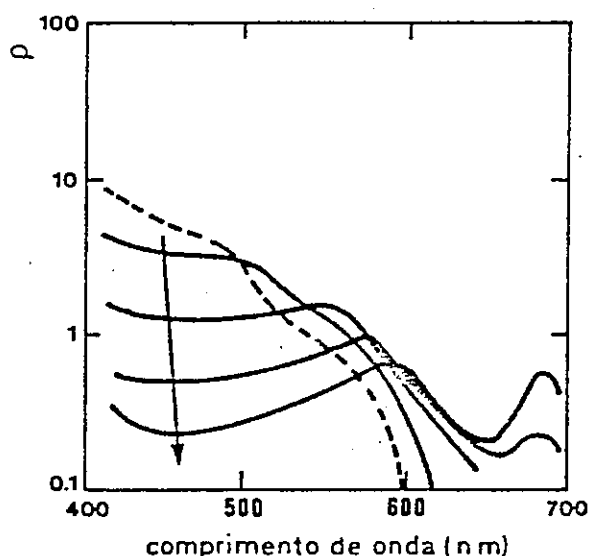


Figura 2.4
Espectro de Reflectância de Águas de Tipo I
(in ROBINSON 1985)

Um outro mínimo situado nos 660nm poderá 'mascarar' um efeito de fluorescência

manifestado por esta substância, a qual apresenta um pico de reflectância em 685nm.

Embora os valores absolutos das reflectâncias possam variar com as espécies de fitoplâncton, a forma espectral apresentada na figura e a sua relação com os teores em presença mantêm-se semelhantes. É notória uma aparente "rotação" no sentido contrário ao dos ponteiros de um relógio, em torno de 550nm (hinge point) com o aumento da concentração, o que suscita que um algoritmo baseado num rácio de reflectâncias nos comprimentos de onda de absorção (440nm) e no que se apresenta como "charneira" (550nm) poderia proporcionar uma boa separabilidade entre os valores de concentração a que se refeririam.

Na figura 2.5 apresenta-se um espectro de reflectâncias semelhante ao anterior mas referente a águas de Tipo II, onde predominam suspensões minerais, ou seja, águas costeiras.

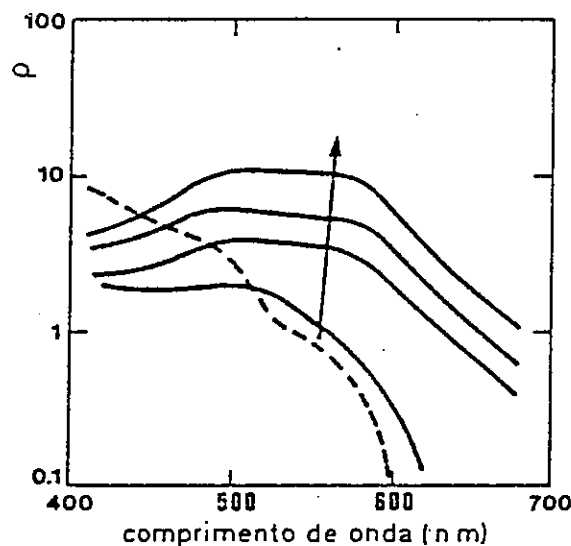


Figura 2.5
Espectro de Reflectância de Águas de Tipo II
(in ROBINSON 1985)

O Coeficiente de Retrodifusão dos sedimentos provoca um espectro de reflectância elevado nos comprimentos de onda da gama dos amarelos e vermelhos. Nos pequenos comprimentos de onda, a presença, mesmo em pequenas quantidades, de substâncias orgânicas é responsável por valores menos elevados daquele parâmetro. Neste caso, não é tão aparente o efeito de rotação atrás mencionado, mas um aumento generalizado do espectro de reflectância com o teor de sedimentos.

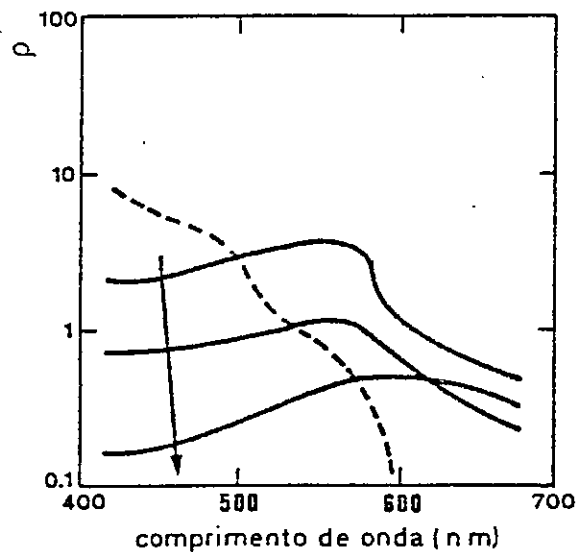


Figura 2.6
Espectro de Reflectância da Substância Amarela
(in ROBINSON 1985)

Quanto às substâncias amarelas, cujo espectro de Reflectância se mostra na figura 2.6, é aparente a sua semelhança com o da clorofila, embora o pico se situe agora em 550-600nm, pelo que um algoritmo semelhante ao da clorofila poderia ser aqui aplicado.

2.3.3 O Modelo Proposto

A maioria dos modelos de quantificação de parâmetros de qualidade de água construídos sobre uma base racional (embora sempre empíricos, como se referiu), é do tipo 'Função Potência', de expressão genérica:

$$Y = aX^b \quad (2-42)$$

com:

Y - parâmetro de qualidade de água (concentração das suspensões, p.ex.);

X - Variável radiométrica, a qual pode ser 'simples' (Radiância, p.ex.), ou 'composta' (rácio de Reflectâncias, p.ex.);

a, b - coeficientes determinados por regressão simples.

A variedade dos modelos existentes com esta forma difere na expressão de X, e nos valores que a 'a' e 'b' são atribuídos.

No presente trabalho, propõe-se que a variável X se exprima por:

$$X = Z_o(\lambda) - Z(\lambda) = \frac{\rho_o(440) - \rho_o(520)}{\rho_o(550) - \rho_o(670)} \frac{\rho(440) - \rho(520)}{\rho(550) - \rho(670)} \quad (2-43)$$

em que o termo $Z_o(\lambda)$, dado pelo quociente das diferenças de Reflectância da 1a. parcela é um valor constante, traduzindo o comportamento radiométrico da água do mar pura.

Pretendendo-se calcular o teor de suspensões de matéria orgânica e de matéria inorgânica, estão a considerar-se, implicitamente dois modelos, um para cada tipo de substância. Os dois modelos são, porém, formalmente idênticos, e dados pelas expressões (2-42) e (2-43), diferindo obviamente nos valores que a 'a' e a 'b' serão atribuídos quando da sua calibração num e noutro caso. Os dois modelos podem, pois, explicitar-se como sendo:

$$C = a_c X^{b_c} \quad (2-44a)$$

$$S = a_s X^{b_s} \quad (2-44b)$$

onde C representa e referencia o cálculo de suspensões orgânicas e S o cálculo de suspensões inorgânicas.

2.3.3.1 Razões de uma Escolha

Foram já descritos em parágrafos anteriores alguns dos critérios que devem presidir à elaboração de um algoritmo empírico, embora baseado em considerações teóricas ou racionais, relacionadas com o comportamento óptico das águas. No que respeita ao algoritmo que se acaba de propor, descrevem-se de seguida as razões que conduziram à formulação apresentada.

1- Sobre a variável explicativa ou independente, X:

A experiência de autores de modelos similares conhecidos mostra que os algoritmos baseados em quocientes confere razoável sensibilidade aos modelos, sendo, pois aliciente a consideração de uma variável independente expressa

pelo quociente de grandezas radiométricas.

Porém, as hipóteses simplificativas tomadas em linha de conta no processo de correcção atmosférica aplicado aos dados radiométricos colhidos a partir de plataformas espaciais, sobretudo devidas à imprevisibilidade da ocorrência dos aerossóis na atmosfera, aliados à conveniência em se "garantir independência" relativamente às condições de iluminação e de observação, pesaram significativamente na escolha de uma variável capaz de minimizar os inconvenientes do primeiro "contraste" e de otimizar o 2º, aspecto mencionado.

a) Sobre a minimização das incertezas do processo de correcção atmosférica:

Como se verá em parágrafo adiante, o processo de correcção atmosférica apoia-se num conjunto de hipóteses simplificativas, sendo aplicado aos dados radiométricos de forma iterativa.

Embora o algoritmo de correcção atmosférica implementado neste trabalho seja dos mais actuais e efectivos, é razoável pensar-se que os valores radiométricos "corrigidos" conterão sempre uma pequena percentagem da radiação devida à atmosfera interposta entre o radiómetro e a superfície da água:

$$L_{corr}(\lambda) = L_{real}(\lambda) + \varepsilon(\lambda) \quad (2-45)$$

Neste modo, um quociente de Radiancias seria sempre afectado pela presença da componente $\varepsilon(\lambda)$, de que resultaria uma redução do contraste:

$$R(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{L_{corr}(\lambda_1)}{L_{corr}(\lambda_2)} = \frac{L_{real}(\lambda_1) + \varepsilon(\lambda_1)}{L_{real}(\lambda_2) + \varepsilon(\lambda_2)} \neq \frac{L_{real}(\lambda_1)}{L_{real}(\lambda_2)} \quad (2-46)$$

Aquele "erro remanescente" do processo de correcção atmosférica é naturalmente função do comprimento de onda, podendo, no entanto, supor-se que se trate de uma "fraca dependência", visto serem sempre pequenas quantidades.

Uma variável explicativa que considere a diferença de valores

radiométricos em 2 comprimentos de onda providenciar a eliminação da 'parcela atmosférica' ainda remanescente nos valores saídos do algoritmo de correcção:

$$D(\lambda_1, \lambda_2) = L_{corr}(\lambda_1) - L_{corr}(\lambda_2) = [L_{real}(\lambda_1) - L_{real}(\lambda_2)] + [\varepsilon(\lambda_1) - \varepsilon(\lambda_2)] \cong L_{real}(\lambda_1) - L_{real}(\lambda_2) \quad (2-47)$$

Por este motivo, optou-se por a variável explicativa a considerar no modelo ser descrita pela diferença entre valores de uma grandeza radiométrica em dois comprimentos de onda.

b) Sobre a independência das condições de iluminação e de observação:

Um dos objectivos mais 'perseguidos' na elaboração de modelos de quantificação de parâmetros de qualidade da água é o da 'universalidade', pretendendo-se com esta designação que o modelo possa ser utilizado, sem modificações significativas, em situações diferentes das que serviram de base ao seu estabelecimento e calibração.

Os conhecimentos actuais e a própria tecnologia de observação não permitem garantir esse objectivo, mas é possível enumerar ou distinguir alguns casos em que uma 'pseudo-universalidade' pode ser considerada:

- i. circunscrição da aplicação do modelo a uma zona geográfica limitada, de comportamento hidrodinâmico conhecido;
- ii. consideração de variáveis radiométricas que garantam independência relativamente às condições de iluminação e de observação.

E deste último caso que trata a questão em análise. Da própria definição, é a Reflectividade ou Reflectância a variável radiométrica que melhor traduz essa independência, razão porque se consideraram diferenças e quocientes (pelos motivos atrás expostos) entre valores espectrais assumidos por esta variável na definição de X.

Porém, a Reflectância considerada no modelo presente é a Reflectância imediatamente acima da superfície da água e não, como é preferido pela

maioria dos autores (e também pelo autor do presente trabalho, acrescenta-se), pela Reflectância imediatamente abaixo da superfície (subsurface irradiance reflectance).

A razão desta tomada de posição reside no facto de o cálculo desta última depender do valor do índice de refração da água, 'n'. Se é verdade que este índice é fracamente dependente da densidade da água do mar e do comprimento de onda da radiação em estudo (pelo menos para as aplicações do tipo da que se descreve neste trabalho), o mesmo não se poderá dizer se a água em estudo revelar teores elevados de turbidez. Não se conhecem trabalhos que explicitem a variação do índice de refração da água com a concentração das suspensões, para a sua utilização correcta nos modelos de quantificação.

c) Sobre a soma de comprimentos de onda considerados:

A consideração dos comprimentos de onda que 'figuram' na expressão do modelo apresentado atrás baseou-se no seguinte:

i. comportamento óptico da água do mar e dos constituintes nela presentes:

Como se viu na análise do comportamento óptico da água do mar (parágrafo 2.3.2., e figuras 2.4 a 2.6), o espectro de Reflectância nos 4 comprimentos de onda referidos ditava não só a qualidade das suspensões, como a própria quantidade.

ii. disponibilidade das bandas espectrais no radiómetro utilizado:

Referiu-se oportunamente que o modelo se aplicaria a dados do radiómetro CZCS do satélite NIMBUS-7, e este opera precisamente nas bandas espectrais incluídas no modelo, segundo as quais se pode evidenciar o comportamento óptico da água e dos seus constituintes.

iii. Autores há que definem os seus modelos de quantificação dos parâmetros de qualidade da água utilizando apenas alguns dos 4 comprimentos de onda do radiómetro, em função do tipo de substância a quantificar, ou outro critério.

Na definição do modelo que se apresenta considerou-se que é da assinatura espectral (leia-se, valores radiométricos nos 4 comprimentos de onda disponíveis) que se inferirá não só a qualidade (tipo de substâncias presentes) como a quantidade.

De facto, se em águas de conteúdo predominantemente orgânico, o espectro de Reflectância na gama amarela e vermelha se pode desprezar (por menos informativos quanto à substâncias em análise), ou o inverso, no caso de águas de conteúdo predominantemente inorgânico, o caso mais geral e que o modelo deve contemplar, é o de águas em que ambas as substâncias poderão coexistir... e no mesmo pixel!

Na falta de dados reais que permitissem justificar uma atitude diferente, considerou-se ser este o critério mais correcto para a definição da variável explicativa.

d) Sobre o termo constante, $Z_0(\lambda)$:

Ao apreciar-se o conjunto de trabalhos efectuados por outros autores nesta área, referiu-se que a diferença entre os espectros de uma amostra de água do mar pura e de uma amostra de um outro tipo de água do mar se relacionaria com o conteúdo desta última.

Por outro lado, parece lógico pensar-se que um decréscimo progressivo dos teores de suspensões presentes nas águas tenderá para uma água pura, ou seja, de teor de suspensões nulo.

Curiosamente, não se encontrou este modo de formulação de modelos em nenhum dos autores estudados ou consultados, o que se poderá dever às seguintes razões:

- i. Não ser fácil quantificar os valores radiométricos espectrais característicos da água do mar pura.
- ii. Pela razão anterior, aqueles valores poderão ser considerados como "assimptóticos", i.e., traduzindo, eventualmente, o facto de não haver "na realidade" água do mar pura, para ela "tendendo", no caso limite, as águas de teores de suspensão progressivamente decrescentes.

Porém, a partir de trabalhos experimentais de Morel e Prieur, Johnson e Munday, entre outros, encontraram-se alguns valores que permitiram estabelecer o espectro de reflectância da água do mar "pura", apresentado no Quadro 2-I.

Quadro 2-I
Espectro de Reflectância da Água do Mar Pura
(segundo Morel, Prieur, Johnson e Munday)

λ (nm)	$R(\lambda)$ (%)
440	2.3532
520	0.9098
550	0.6116
670	0.0396

2- Sobre a função potência:

A escolha de um modelo do tipo "Função Potência", como o da equação (2-42), baseou-se em considerações de natureza empírica. A experiência tem mostrado ser a que melhor descreve o fenómeno em estudo, aliada à simplicidade da sua formulação.

Uma análise de sensibilidade do modelo mostraria, de facto, a capacidade de

resposta desta face às variações da variável explicativa, X:

$$\frac{1}{Y} dY = b \frac{1}{X} dX = -b \frac{1}{(Z_0 - Z)} dZ \quad (2-48)$$

A expressão (2-48) evidencia um requisito importante nos modelos deste tipo de aplicações: proporcionalidade constante, dada pelo expoente 'b', entre as variações unitárias das variáveis explicativa e explicada, em qualquer ponto do domínio da primeira daquelas. Nos diversos modelos possíveis, somente o modelo linear de ordenada na origem nula manifesta comportamento semelhante, mas este é, afinal, um caso particular da função potência.

A continuação daquela análise mostra ainda que, a menos do coeficiente 'b', às variações positivas da variável Z, corresponderão variações negativas na variável Y, i.e., a acréscimos de Z corresponderão decréscimos para Y, e vice-versa. Repare-se, por exemplo, que, da expressão de Z (segunda parcela do último membro da equação (2-43), que define X), uma variação positiva para Z equivale a uma diminuição dos teores de concentração (de qualquer das substâncias), ou seja, uma 'aproximação' de Z aos valores de Z₀, às suas pure. Esta ocorrência tem sido comprovada na prática, como demonstraram as observações de VIOLLIER et al. 1978 no Golfo da Guiné, em comprimentos de onda aproximados ao do modelo presente, como descrito na revista que se apresentou em parágrafos anteriores de alguns trabalhos nesta matéria.

A não disponibilidade de dados reais não permite estender a análise da sensibilidade a outros aspectos que se consideram relevantes, como sejam:

- a) a capacidade de resposta do modelo (fundamentalmente da variável X) face à sua aplicação em águas onde ocorra a presença simultânea de substâncias orgânicas e inorgânicas.

De acordo com aqueles autores, uma relação entre os factores do numerador e do denominador permitiriam, em algumas circunstâncias, estabelecer uma relação de dependência dos teores clorofilianos face à maior ou menor concentração de matéria inorgânica (águas mistas de tipo I e II).

Este será um ponto a desenvolver em futuro próximo, com base em dados

concretos de observação 'in situ', pois permitirá o estabelecimento de 'fronteiras' entre diversos tipos de água, com evidentes reflexos na caracterização do ambiente marítimo: identificação de zonas de 'upwelling', de convergência, etc.

b) definição dos limites de validade do modelo:

Por 'limite de validade do modelo', entende-se, por um lado, a margem de confiança esperada para os valores de 'a' e 'b' calculados a partir de um conjunto de dados suficientemente significativo, e por outro, o maior valor de concentração de suspensões que o modelo é capaz de reproduzir, com fidelidade, a partir dos valores radiométricos correspondentes.

Relativamente a este último ponto, justificam-se alguns receios de que o modelo, baseado em Reflectâncias espectrais, não responda adequadamente à ocorrência de valores elevados dos teores de suspensões (em partículas de matéria inorgânica, junto do litoral e de embocaduras de estuários e lagoas). De acordo com opinião manifestada por alguns autores (ROBINSON 1985, THOMAS 1984), nestas situações, é um modelo baseado nas radiações espectrais que parece ser mais indicado. Interessaria pois saber quais os valores limites para que uma implementação do modelo sob forma de programa para computador promovesse a 'mudança' automática de modelo, durante a fase de cálculo.

2.3.3.2 Apresentação de Alguns Modelos Conhecidos

Como se disse, a maioria dos modelos são do tipo 'função potência', diferindo na variável explicativa que utilizam. Da bibliografia consultada, seleccionaram-se os seguintes modelos, considerados os mais representativos (conhecidos/utilizados):

1- De avaliação de pigmentos clorofilianos (mg/m³):

a) MOREL 1980:

$$C = 1.92 \left[\frac{\rho(440)}{\rho(550)} \right]^{-1.8} \quad (2-49a)$$

b) GORDON e CLARK 1978:

$$C = 0.5 \left[\frac{L(440)}{L(550)} \right]^{-1.3} \quad (2-49b)$$

c) GORDON 1980:

$$C = 0.8 \left[\frac{L(520)}{L(550)} \right]^{-4.0} \quad (2-49c)$$

d) NASA 1981:

i. para $C < 1.5 \text{ mg/m}^3$:

$$C = 1.13 \left[\frac{L(440)}{L(550)} \right]^{-1.71} \quad (2-49d1)$$

ii. para $C > 1.5 \text{ mg/m}^3$:

$$C = 3.326 \left[\frac{L(520)}{L(550)} \right]^{-2.439} \quad (2-49d2)$$

2- De avaliação de sedimentos (mg/m^3):

a) STURM 1983:

Este autor apresenta uma grande variedade de modelos e fórmulas que tem vindo a desenvolver no JRC (Joint Research Center, Ispra, Itália), a partir de numerosos trabalhos de campo, nos mares Báltico e Adriático. Algumas dessas fórmulas são:

i.

$$S = a_s Y^{b_s} Z^{c_s} \quad (2-50a1)$$

com Y e Z variáveis explicativas dadas por:

$$Y = \frac{a_0 + a_1 \rho(\lambda_1) + a_2 \rho(\lambda_2) + a_3 \rho(\lambda_3) + a_4 \rho(\lambda_4)}{b_0 + b_1 \rho(\lambda_1) + b_2 \rho(\lambda_2) + b_3 \rho(\lambda_3) + b_4 \rho(\lambda_4)} \quad (2-50a2)$$

$$Z = c_0 + c_1 \rho(\lambda_1) + c_2 \rho(\lambda_2) + c_3 \rho(\lambda_3) + c_4 \rho(\lambda_4) \quad (2-50a3)$$

ii.

$$S = 146.55 \left[[(\rho(550) - \rho(670)) \frac{\rho(550)}{\rho(520)}]^{0.991} \right] \quad (2-50b)$$

sendo $\rho(\lambda_i)$ as Reflectâncias nos comprimentos de onda λ_i .

b) THOMAS 1984:

$$\log(S) = 12.78 \rho(550) - 0.27 \quad (2-50c)$$

2.4 OPERAÇÕES DE CORRECÇÃO ATMOSFÉRICA NOS DADOS OBTIDOS POR DETECÇÃO REMOTA

2.4.1 Considerações Gerais

A correcta avaliação das substâncias em suspensão na água do mar a partir de dados radiométricos captados a grande altitude é, de certo modo, dificultada pela presença da atmosfera; ou, mais exactamente, pela interferência desta no sinal captado pelos radiómetros.

Esta interferência consiste basicamente nos efeitos de difusão (de tipo Rayleigh e Mie) e de absorção pelo ozono (O₃).

Estima-se que cerca de 80% da radiação captada na região vermelha do espectro e 90 a 95% na região azul é resultante desta interferência atmosférica.

E pois necessário remover os efeitos atmosféricos dos dados radiométricos para se obter a 'informação útil' sobre os constituintes da água e que se exprime apenas pelos 10 a 20% da radiação captada.

Ao processo de remoção dos efeitos atmosféricos dos sinais registados pelos radiómetros chama-se 'Correcção Atmosférica'. É um processo orientado para a selecção da informação das características da água e não da atmosfera propriamente dita.

A Correção Atmosférica pode ser realizada segundo um de dois métodos:

- 1- baseados exclusivamente nos dados registados pelos radiómetros, ou
- 2- baseados em dados atmosféricos adicionais.

No presente trabalho, entendeu-se "construir um modelo" todo ele baseado nos dados constantes dos registos magnéticos adquiridos, reduzindo a intervenção do operador a um mínimo indispensável.

Porém, e como se verá no Capítulo seguinte, não se deixou de considerar a faculdade daquele poder intervir no processo de correção atmosférica se os resultados em que se baseia o método não merecerem a sua confiança, após uma primeira execução do programa.

2.4.2 Descrição do Processo Físico

Podem distinguir-se os seguintes componentes no sinal captado (Fig. 2.1):

- 1- radiação solar reflectida ou retrodifundida pela atmosfera directamente para o radiómetro, sem nunca ter atingido a superfície oceânica;
- 2- radiação solar reflectida pela superfície;
- 3- radiação solar emergente da água, em cujo interior sofreu processos de difusão e de absorção devidos à presença de substâncias dissolvidas e em suspensão;
- 4- radiação idêntica às duas anteriores, mas proveniente de regiões vizinhas à que está sendo observada no instante, e que, por difusão atmosférica, é colocada no campo de visão do radiómetro.

Destas 4 componentes, somente a número 3 é portadora de informação relevante para o cálculo dos parâmetros ópticos da água do mar, sendo todas as outras consideradas "ruído".

Um radiómetro operando em N bandas espectrais captará, assim, uma Radiação espectral $L(\lambda)$, que é dada pela expressão:

$$L(\lambda) = L_p(\lambda) + T L_s(\lambda) \quad (2-51)$$

traduzindo a primeira parcela do segundo membro os efeitos atmosféricos, conhecidos por 'Radiação de Percurso (path radiance)'. Na segunda parcela, ' $T(\lambda)$ ' é a Transmissividade Atmosférica e ' $L_s(\lambda)$ ' a Radiação proveniente da água.

Esta é composta pela soma da Radiação reflectida pela superfície (L_r) e pela Radiação emergente do interior da água (L_w).

Se a atmosfera fosse homogénea, o coeficiente T seria expresso pela Lei de extinção de Beer (Transmissividade directa):

$$T(\lambda) = e^{-\frac{1}{\cos(\theta)}\tau(\lambda)} \quad (2-52)$$

em que $\tau(\lambda)$ é a 'Opacidade' atmosférica (optical depth ou optical thickness).

Porém, não só não é homogénea como a interacção da radiação electromagnética é diferenciada consoante os constituintes presentes.

De entre estes destacam-se, genericamente, os seguintes:

- 1- partículas de diâmetro muito pequeno quando comparado com o comprimento de onda de radiação em estudo.

Estas são responsáveis pelo processo de difusão molecular ou de Rayleigh. São as moléculas gasosas dos constituintes da atmosfera.

- 2- partículas de dimensões da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda em estudo.

São as poeiras, gases e gotículas de água presentes na atmosfera, também designados por Aerosóis, e que provocam uma difusão segundo as leis de Mie.

3- o ozono (O₃), que desempenha um papel importante na atmosfera, absorvendo as ondas muito curtas, constituindo como que um escudo à radiação solar ultravioleta incidente. Também desempenha um papel importante de absorção em outros comprimentos de onda na gama do visível (400-600nm).

Alguns autores reclamam a necessidade de se incluir ainda a componente 4, devida à radiação emergente de pixels vizinhos (background radiation) e, deste modo, a equação (2-51) escrever-se-ia:

$$L(\lambda) = L_p(\lambda) + T L_s(\lambda) + L_{viz}(\lambda) \quad (2-53)$$

Neste caso, se a radiação 'Lviz' não for muito diferente da do pixel em estudo, tem-se:

$$L(\lambda) = L_p(\lambda) + L_s(\lambda) \left[e^{-\frac{1}{\cos(\theta)} \tau} + t(\theta) \right] \quad (2-54)$$

expressando $t(\theta)$ uma Transmissividade difusa, função da atmosfera interposta e da posição dos pixels vizinhos relativamente à direcção de observação do pixel em estudo. Assim, a Transmissividade total será dada pelo termo entre parêntesis e não apenas pela lei de extinção de Beer.

Fisicamente, a Transmissividade difusa traduz a Radiação que chega ao topo da atmosfera quando esta é 'iluminada' por uma radiação isotrópica desde a superfície da água. É função da opacidade dos 3 componentes básicos da atmosfera, responsáveis pelos fenómenos de absorção e difusão: as moléculas gasosas, os aerossóis e o ozono.

Embora a Transmissividade directa descreva correctamente a perda de radiação por efeito de difusão, a inclusão no campo de visão de parte da radiação de pixels vizinhos, originando um acréscimo da radiação captada para o pixel em estudo, obriga à consideração desta componente difusa.

A Transmissividade total pode então exprimir-se, com suficiente precisão para os estudos de detecção remota, pela expressão (ROBINSON 1985, DESCHAMPS et al. 1983):

$$T(\lambda, \theta) = e^{-\frac{1}{\cos(\theta)} (0.5 \tau_M + \alpha \tau_A + \tau_O)} \quad (2-55)$$

em que as opacidades nela expressas se referem às componentes moleculares (M), dos aerossóis (A) e do ozono (O₃) com ' α ' tomando valores entre 0,05 e 0,08 em atmosferas marítimas e 0,16 em atmosferas continentais.

A consideração de uma componente difusa na Transmissividade faz supor que a superfície oceânica se comporta como um difusor Lambertiano. De facto, no processamento de dados radiométricos sobre o oceano, excluem-se as zonas das 'imagens' em que se observa reflexão especular do Sol, por esta mascarar por completo a informação radiométrica proveniente do interior, por muito intensa.

O radiómetro CZCS tem mesmo um dispositivo que permite a inclinação relativamente à vertical, do plano de varrimento do espelho colector, de modo a evitar aquela reflexão especular. Pode pois considerar-se, à partida, que a componente de radiação captada pelo radiómetro devida à reflexão na superfície (L_s, na expressão (2-51)) é uma reflexão difusa do hemisfério que lhe é superior (sky diffuse reflectance), e já integrada na Radiação de Percurso, ou seja uma componente difundida pela atmosfera.

Justifica-se esta atitude pela dificuldade em considerar os efeitos da rugosidade da superfície do oceano na radiação captada pelo sensor (presença de agitação marítima, com ou sem 'espuma' devido a eventual rebentação, os 'carneirinhos').

A modelação analítica da parcela referente à Radiação de Percurso requer o conhecimento do processo de difusão em todas as direcções e em todas as altitudes, do Coeficiente de Difusão diferencial (i.e. da função de fase) e da Transmissividade atmosférica.

O desconhecimento das propriedades da atmosfera decorrentes da presença aleatória de aerossóis, responsáveis pela complexidade do processo de difusão múltipla de aerossóis, impede esta modelação analítica.

Experiências realizadas por alguns autores (GORDON 1978, 1981), em que a atmosfera é simulada pela presença de constituintes gasosos e de aerossóis em proporções típicas e o processo de propagação da radiação modelado pelo método de Monte Carlo, permitiram concluir que a abordagem da correcção atmosférica das imagens de detecção remota se tenha que efectuar com o recurso a algumas hipóteses simplificativas:

- 1- a radiancia devida à atmosfera, integrada no sinal captado pelo radiómetro, é decomposta nas radiancias devidas à difusão molecular (ou de Rayleigh), 'LR' e à difusão pelos aerossóis, 'LA';
- 2- estas duas componentes são susceptíveis de tratamento independente;
- 3- o processo de difusão que tem lugar na atmosfera é convenientemente descrito por um modelo de difusão simples (single-scattering theory):
 - a) a função de fase ou função de difusão volumétrica é independente do comprimento de onda e da localização no espaço observado;
 - b) o quociente da opacidade dos aerossóis em dois comprimentos de onda é independente da localização;
 - c) o quociente das radiancias devidas aos aerossóis, em dois comprimentos de onda, é independente da localização;
- 4- a absorção devida ao ozono é simulada por uma Transmissividade "equivalente" (e uma Opacidade "equivalente", em consequência), que afecta todas as componentes do sinal captado pelo radiómetro.

Estas conclusões traduzem-se pelas expressões seguintes:

$$L(\lambda) = T_{O_3}(\lambda) [L_R(\lambda) + L_A(\lambda) + T' L_w(\lambda)] \quad (2-56)$$

$$L_A(\lambda_2) = K(\lambda_1, \lambda_2) L_A(\lambda_1) \quad (2-57)$$

$$\tau_A(\lambda) = A\lambda^{-B} \quad (2-58)$$

$$p(\gamma) = \frac{3}{4} [1 + \cos^2(\gamma)] \quad (2-59)$$

E a partir destas conclusões e do formulário citado que se construiu o modelo de correção atmosférica descrito nos parágrafos seguintes.

2.4.3 Modelo de Correção Atmosférica

O objectivo da correção atmosférica é a extração da componente do sinal dada por 'L_w', radiancia emergente da água, presente na expressão (2-56).

Supondo então as premissas anteriormente enunciadas (difusão simples, superfície oceânica Lambertiana e radiometrias da água com gradientes de valor reduzido na direcção horizontal), a expressão (2-56), para os comprimentos de onda λ_1 e λ_2 , pode escrever-se como:

$$L(\lambda_1) = L_R(\lambda_1) + L_A(\lambda_1) + T'L_w(\lambda_1) \quad (2-60a)$$

$$L(\lambda_2) = L_R(\lambda_2) + L_A(\lambda_2) + T'L_w(\lambda_2) \quad (2-60b)$$

onde se integrou a Transmissividade do ozono em cada uma das parcelas do 2o. membro, por simplicidade.

A equação (2-57) permite, por outro lado, obter-se:

$$T'L_w(\lambda_2) = L(\lambda_2) - L_R(\lambda_2) - K(\lambda_2, \lambda_1) [L(\lambda_1) - L_R(\lambda_1) - T'L_w(\lambda_1)] \quad (2-61)$$

da qual se extrai os valores 'L_w(λ_i)' procurados.

Nesta expressão, são conhecidos e/ou calculáveis os valores das seguintes variáveis:

- L(λ_2), L(λ_1), Radiancias captadas pelo sensor;
- L_R(λ_2), L_R(λ_1), Radiancias devidas à difusão de Rayleigh, obtida por cálculo;
- T', Transmissividade total da atmosfera, dada pela expressão (2-55).

São incógnitas os valores de L_w(λ_i) e K(λ_i, λ_j), coeficiente de proporcionalidade entre as radiancias dos aerossóis nos comprimentos de onda λ_i e λ_j .

Para um radiómetro que opere em N bandas espectrais, a equação (2-61)

desdobra-se num sistema de $N-1$ equações a $2N-1$ incógnitas: os $L_w(\lambda_i)$ e os coeficientes $K(\lambda_i, \lambda_j)$.

Para resolver este sistema de equações, é necessário adicionar outras equações e considerar algumas hipóteses simplificadoras para o determinarem:

1- Das N bandas espectrais do radiómetro, uma haverá que não será portadora de informação sobre o conteúdo da água, o que se traduz por $L_w(\lambda_0)=0$.

Esta hipótese só é válida desde que:

a) alguma das bandas espectrais do radiómetro se situe na gama dos infravermelhos próximos do espectro electro-magnético. De facto, das propriedades radiométricas da água, sabe-se que nesta gama de comprimentos de onda, a totalidade de energia nela incidente é absorvida.

b) O conteúdo de matérias em suspensão na água (e que se pretende determinar) é suficientemente baixo para que a retrodifusão induzida seja ainda nula ou desprezável neste comprimento de onda.

2- Os coeficientes $K(\lambda_i, \lambda_j)$ são determináveis a partir das propriedades ópticas dos aerossóis, supondo, como se disse atrás que, apesar da não homogeneidade da atmosfera na direcção horizontal, o quociente das Opacidades dos aerossóis, nos dois comprimentos de onda, λ_i e λ_j , é independente da localização.

Esta hipótese implica que a função de fase dos aerossóis seja independente da localização e do comprimento de onda, não se considerando limitadora da validade dos cálculos.

Deste modo, admitindo conhecido o valor de $K(\lambda_i, \lambda_j)$ e que λ_0 é a banda espectral para a qual a radiancia da água é nula, o sistema de equações (2-60) transforma-se em:

$$T'L_w(\lambda_i) = L(\lambda_i) - L_R(\lambda_i) - K(\lambda_i, \lambda_o) [L(\lambda_o) - L_R(\lambda_o)] \quad (2-62)$$

com $i=1, 2, \dots, N-1$ bandas espectrais, ficando agora determinado.

Nos parágrafos que se seguem, descreve-se o processo de cálculo dos coeficientes K , bem como da radiancia devida à difusão de Rayleigh.

2.4.3.1 Cálculo dos Coeficientes $K(\lambda_i, \lambda_o)$

Segundo a teoria da difusão simples a radiancia devida aos aerossóis é proporcional ao produto da Opacidade pela função de fase, podendo exprimir-se do seguinte modo:

$$L_A(\lambda) = \frac{k}{\pi} E_o(\lambda) T_{O_3}(\lambda, \theta_o, \theta) \tau_A(\lambda) p(\theta_o, \theta) \quad (2-63)$$

onde ' E_o ' é a Irradiância solar no topo da atmosfera; ' T_{O_3} ' a Transmissividade 'equivalente' à atenuação da propagação da radiação provocada pela absorção do ozono nas camadas superiores da atmosfera; ' τ_A ', a Opacidade dos aerossóis; $p(\theta)$, a função de fase ou de difusão volumétrica dos aerossóis (dependente da respectiva composição e concentração, e só conhecida mediante observações específicas); θ_o , o ângulo zenital da incidência dos raios solares e θ , o ângulo zenital de observação.

A validade daquela expressão, restringe-se a valores de $\tau_A < 0.1$. Esta limitação é ultrapassável se se considerar que a função de fase é independente do comprimento de onda, como se tem vindo a referir, pelo que, o quociente das radiancias dos aerossóis em 2 comprimentos de onda, permite eliminar aquele factor na expressão (2-63).

Esta é a definição do coeficiente $K(\lambda_i, \lambda_j)$ e constitui um dos pontos fulcrais dos algoritmos da correcção atmosférica.

$$K(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{E_o(\lambda_i) T_{O_3}(\lambda_i, \theta_o, \theta) \tau_A(\lambda_i)}{E_o(\lambda_j) T_{O_3}(\lambda_j, \theta_o, \theta) \tau_A(\lambda_j)} \quad (2-64)$$

A completa determinação do valor de $K(\lambda_i, \lambda_j)$ é dependente dos valores das Opacidades dos aerossóis naqueles comprimentos de onda, $\tau_A(\lambda_i)$, $\tau_A(\lambda_j)$. Estes, no âmbito da aplicação da teoria da difusão simples, seguem uma lei

potência do tipo:

$$\tau_A(\lambda) = A\lambda^{-B} \quad (2-65a)$$

pelo que

$$\frac{\tau_A(\lambda_i)}{\tau_A(\lambda_j)} = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j}\right)^{-B} \quad (2-65b)$$

sendo 'B' designado por 'expoente de Angstrom' e tomando valores entre 0,8 e 1,5, de acordo com observações efectuadas em atmosferas continentais, que mostraram poder aplicar-se as leis de distribuição de Junse (ver Apêndice A) à concentração dos aerossóis.

Os valores que este expoente assume têm suscitado alguma controvérsia entre os especialistas da matéria, argumentando alguns que, no caso dos aerossóis marinhos, é discutível a gama de valores apresentada anteriormente.

Aproveitando um conjunto de dados apresentados por STURM 1983 resultantes de observações em ambiente marinho (mar Adriático) aplicou-se a lei genérica dada pela expressão (2-65a), obtendo-se para B o valor de -1,73 que será utilizado neste trabalho, na falta de melhor informação (ver Apêndice A).

Apesar da validade da equação (2-63) se restringir a valores da Opacidade dos aerossóis inferiores a 0,1, as experiências efectuadas por alguns autores em atmosferas típicas simuladas por modelos numéricos (cujas conclusões foram atrás enunciadas) permitiram garantir a legitimidade do processo que conduz à definição e cálculo de $K(\lambda_i, \lambda_j)$, para atmosferas cuja Opacidade dos aerossóis não exceda 0,6 na gama de comprimentos de onda dos azuis-verdes (440nm), com um erro inferior a 3%. Exceptuam-se os casos de iluminação próxima do Zénite e de observação próxima do Nadir, em que a reflexão especular do Sol (sun glint), por muito intensa, encobre a informação procurada. E, porém, uma situação de pouco interesse, por as imagens se apresentarem seriamente 'contaminadas' pelo reflexo do Sol e não serem, por isso, 'tratáveis'.

Quanto ao termo relativo à Transmissividade 'equivalente' do ozono, ' $TD3(\lambda, \theta_0, \theta)$ ', ele exprime a dupla passagem dos raios solares pela camada de ozono no topo da atmosfera, uma no sentido descendente até à sua interacção com os aerossóis, e outra, ascendente, até à sua captação pelo radiómetro, em órbita acima da atmosfera.

O valor da Transmissividade total que aquele termo exprime é então dado pelo produto das Transmissividades dos sentidos descendente e ascendente, tendo em conta os respectivos ângulos zenitais:

$$T_{O_3}(\lambda, \theta_o, \theta) = T_{O_3}(\lambda, \theta_o) T_{O_3}(\lambda, \theta) = e^{-\tau_{O_3} \left[\frac{1}{\cos(\theta_o)} + \frac{1}{\cos(\theta)} \right]} \quad (2-66)$$

De acordo com a premissa anteriormente estabelecida que considera λ_o como o comprimento de onda para o qual a radiação emergente da água é nula, $L_w(\lambda_o) = 0$, o coeficiente $K(\lambda_i, \lambda_o)$ pode finalmente exprimir-se por:

$$K(\lambda_i, \lambda_o) = \frac{E_o(\lambda_i)}{E_o(\lambda_o)} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} \right)^{-1.73} e^{-\left[\frac{1}{\cos(\theta_o)} + \frac{1}{\cos(\theta)} \right] \left[\tau_{O_3}(\lambda_i) - \tau_{O_3}(\lambda_o) \right]} \quad (2-67)$$

Os valores da Opacidade espectral "equivalente" do ozono são obtidos de tabelas construídas a partir de medições intensivas deste parâmetro realizadas por vários autores (p.ex., VIGROUX 1953, citado por STURM 1981), em latitudes e condições atmosféricas/climáticas diversas. No Apêndice A, apresentam-se alguns dos valores que serão utilizados neste trabalho.

2.4.3.2 Cálculo da Radiação Devida à Difusão de Rayleigh

Ao referir-se à inclusão da componente da reflexão difusa pela superfície do oceano na componente da Radiação de Percurso, a maioria dos autores dos algoritmos de correção atmosférica inclui-a na parcela devida à difusão de Rayleigh.

Tem-se, então, que a Radiação devida à difusão de Rayleigh é composta pelas seguintes parcelas:

$$L_R(\lambda) = L_{RR}(\lambda) + L_{RA}(\lambda) \quad (2-68)$$

A 1ª parcela é a radiação difusa devida às moléculas gasosas da composição do ar e que pode ser expressa, aproximadamente, mas com suficiente rigor para a aplicação pretendida, por (STURM 1981):

$$L_{RR}(\lambda) = L_{RR}^{\downarrow}(\lambda) + \rho_d(\theta_o) L_{RR}^{\uparrow} = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} T_{O_3}(\lambda, \theta_o) T_{O_3}(\lambda, \theta) \tau_R(\lambda) \left[p^{\downarrow}(\theta_o, \theta) + \rho_d(\theta_o) T(\lambda, \theta) p^{\uparrow}(\theta_o, \theta) \right] \quad (2-69)$$

em que $\tau_R(\lambda)$ é a Opacidade de Rayleigh; $T(\lambda, \theta)$ é a Transmissividade de Rayleigh na direcção do radiómetro (θ); $p^\uparrow(\theta_o, \theta)$ e $p^\downarrow(\theta_o, \theta)$ as funções de fase para os percursos ascendente e descendente da radiação, dependentes dos ângulos zenitais de incidência (θ_o) e de observação (θ); e $P(\theta_o)$ a Reflectividade de Fresnel na superfície da água (suposta plana, por simplicidade), devida à incidência da luz segundo a direcção (θ_o).

A 2a. parcela da expressão (2-68) é devida à difusão molecular da reflexão do hemisfério superior na superfície da água, na direcção de observação. É igualmente expressa, em primeira aproximação, por:

$$L_R(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} T_{O_3}(\lambda, \theta_o) T_{O_3}(\lambda, \theta) \tau_R(\lambda) \rho_d(\theta) p^\uparrow(\theta_o, \theta) T(\lambda, \theta) \quad (2-70)$$

onde $P(\theta)$ é de novo a Reflectividade de Fresnel, mas segundo a direcção de observação θ , mantendo os restantes símbolos o significado anteriormente referido.

A radiancia de Rayleigh total é então dada pelas somas das expressões (2-69) e (2-70), ou seja:

$$L_R(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} T_{O_3}(\lambda, \theta_o) T_{O_3}(\lambda, \theta) \tau_R(\lambda) [p^\downarrow(\theta_o, \theta) + p^\uparrow(\theta_o, \theta) T(\lambda, \theta) [\rho_d(\theta_o) + \rho_d(\theta)]] \quad (2-71)$$

As expressões por que se traduzem as duas componentes da função de fase (ascendente e descendente) são dependentes da geometria de iluminação e de observação. Admitindo sempre um processo de difusão simples, a função de fase é dada pela expressão (AUSTIN 1982):

$$p(\theta_o, \theta) = \frac{3}{4} [1 + \cos^2(\theta_o, \theta)] \quad (2-72a)$$

pelo que as funções de fase dos percursos ascendente e descendente se podem exprimir, respectivamente por:

$$p^\uparrow(\theta_o, \theta) = \frac{3}{4} [1 + \cos^2\uparrow(\theta_o, \theta)] \quad (2-72b)$$

$$p^\downarrow(\theta_o, \theta) = \frac{3}{4} [1 + \cos^2\downarrow(\theta_o, \theta)] \quad (2-72c)$$

com os cossenos entre as direcções θ_o e θ dados, respectivamente por:

$$\cos^{\dagger}(\theta_o, \theta) = \cos(\theta_o) \cos(\theta) + \text{sen}(\theta_o) \text{sen}(\theta) \cos(\phi - \phi_o) \quad (2-72d)$$

$$\cos^{\ddagger}(\theta_o, \theta) = -\cos(\theta_o) \cos(\theta) + \text{sen}(\theta_o) \text{sen}(\theta) \cos(\phi - \phi_o) \quad (2-72e)$$

onde $\theta - \theta_o$ representa o ângulo azimutal relativo das direcções de observação e de iluminação.

Quanto à Reflectividade de Fresnel presente na expressão (2-71), trata-se da Reflectividade difusa, dada por:

$$\rho_d(\alpha) = \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^{\pi/2} d\theta' [\rho_D(\alpha, \theta', \phi') \text{sen}(\theta')] \quad (2-73a)$$

em que $\rho_D(\alpha, \theta', \phi')$ é a Reflectividade directa dada pela expressão (A-13) - ver Apêndice A - difundida para todo o hemisfério $\theta' \in [0, \pi/2]$ e $\phi' \in [0, 2\pi]$; ' α ' é o ângulo zenital de iluminação, θ_o , ou o ângulo de observação, θ ; e θ' , θ' ,... ângulos, zenital e azimutal de difusão para todo o hemisfério superior.

A equipa de cientistas que tem vindo a acompanhar a evolução e o comportamento do radiómetro CZCS(*), e a utilizar os respectivos dados, propõe para a Reflectividade difusa, resultante da expressão (2-73a), a expressão seguinte:

$$\rho(\alpha) = 1 - 2xy\eta \left[\frac{1}{(x+\eta y)^2} + \frac{1}{(\eta x+y)^2} \right] \quad (2-73b)$$

com,

$$x = \cos(\alpha) \quad (2-73c)$$

$$y = \frac{1}{\eta} \sqrt{\eta^2 + \text{sn}^2(\alpha)} \quad (2-73d)$$

em que ' η ' é o índice de refração da água do mar relativo ao ar (1.343). Será esta a expressão que se utilizará no decorrer do presente trabalho.

(*) - NET, Nimbus Experiment Team

2.4.3.3 Análise Crítica do Método de Correção Atmosférica

Da descrição do modelo de Correção Atmosférica que tem vindo a ser apresentado pode concluir-se que assenta nas seguintes 2 hipóteses básicas:

- 1- A propagação da radiação na atmosfera, no que respeita à difusão, é simulada pela teoria da difusão-simples;
- 2- O radiómetro disponível regista informação de forma multiespectral em que, pelo menos para uma das bandas espectrais em que opera (a dos infravermelhos próximos), a radiação da água é nula.

A primeira hipótese implica, como se viu, que:

- 1- a componente atmosférica do sinal captado pelo radiómetro pode ser decomposta nas radiações difusas de Rayleigh e de Mie, sendo susceptíveis de tratamento independente;
- 2- o desconhecimento da composição real dos aerossóis presentes na atmosfera (e nos dados radiométricos colhidos) e da sua variabilidade no espaço (desde que não seja demasiado brusca) é superado pela consideração das seguintes outras hipóteses:
 - a) proporcionalidade entre as Radiações dos aerossóis em dois comprimentos de onda, por sua vez independente da localização;
 - b) proporcionalidade entre as Opacidades dos aerossóis, em dois comprimentos de onda, dada pelo respectivo quociente elevado ao 'Expoente de Angstrom' e que também é suposta ser independente da localização;

c) a função da fase, associada ao processo de difusão pelos aerosóis é independente do comprimento de onda e da localização.

Estas premissas, cuja validade tem sido comprovada em experiências realizadas, permitem a redução do número de incógnitas do sistema de equações (2-61).

E a consideração da segunda hipótese que permite, por último, eliminar a indeterminação remanescente naquele sistema de equações.

Ora, contrariamente à primeira hipótese, esta é válida apenas para um número limitado de situações de qualidade de água, nomeadamente para águas de reduzidos teores de suspensões. Somente neste caso, de facto, pode considerar-se praticamente nula a reflexão da água.

Mas a hipótese não pode ser tomada em consideração no caso de águas costeiras, ou próximas de embocaduras de estuários ou de formações lagunares, onde a dinâmica da circulação oceânica, fundamentalmente ditada pela agitação marítima e pelas correntes de maré, coloca em suspensão material sólido em quantidades tais que, mesmo nos comprimentos de onda em que a água se comporta como absorvedora, a respectiva Radiação de reflexão, ou Reflectividade, não é de facto nula.

Para a resolução do problema propõe-se um de dois métodos:

1- Procuram-se na imagem, zonas de águas límpidas (clear water pixels), para as quais a hipótese seja de facto válida.

Nestas zonas, a informação captada pelo radiómetro nesse comprimento de onda, traduz então, exclusivamente, a componente atmosférica. Pela aplicação das considerações resultantes da hipótese 1, atrás indicada, calculam-se as componentes atmosféricas nos outros comprimentos de onda, que são posteriormente eliminadas do sinal captado pelo radiómetro, nas restantes zonas da imagem.

Mas... e se a imagem não contiver zonas de águas límpidas, como no caso do mar do Norte, do canal da Mancha, ou junto a embocaduras, como se referiu?

A aplicação deste raciocínio revela-se pois incorrecta, sendo superado pelo segundo método que a seguir se descreve.

- 2- A indeterminação do sistema é eliminada pela consideração de uma relação entre as radiancias dos vários comprimentos de onda em que opera o radiómetro.

Para maior clareza: a partir de observações radiométricas multiespectrais, alguns autores verificaram poder definir-se relações entre as radiancias medidas em comprimentos de onda nos quais é corrente caracterizarem-se as propriedades ópticas da água e seus constituintes: azul, verde, laranja, vermelho e infravermelho próximo.

É a formalização destas relações que permite obter a equação que levanta a indeterminação do sistema, sem ferir a realidade do não anulamento efectivo da radiancia.

Seguem-se alguns exemplos de relações estabelecidas para aplicação a este segundo método:

- a) equação de SMITH e WILSON 1980:

$$L_w(670) = 0.0829 L_w(440) \left[\frac{L_w(440)}{L_w(550)} \right]^{-1.661} \quad (2-74a)$$

em que os comprimentos de onda nela expressos são três dos comprimentos de onda em que opera o radiómetro CZCS.

- b) equação de STURM 1983:

$$L_w(670) = L_w(520) \left[A \log \left(\frac{L_w(520)}{L_w(550)} \right) + B \right]^c \quad (2-74b)$$

- c) equação de VIOLLIER et al. (in THOMAS 1984):

$$\log(\rho(670)) = 18.54 \rho(550) - 3.21 \quad (2-74c)$$

Nos modelos enunciados, é óbvio que as diferenças residem nas

características das águas observadas e condições de observação, pelo que a escolha de algum deles depende necessariamente da semelhança entre as águas às quais se irá aplicar o modelo e as águas que originaram a sua definição.

Não dispondo de qualquer experiência sobre o comportamento óptico-radiométrico das águas do litoral português, neste trabalho optou-se pela fórmula de SMITH e WILSON, por ser a que, na literatura consultada, é considerada ser a que oferece mais confiança para a generalidade dos casos, sem prejuízo de, na continuação do desenvolvimento deste projecto, poder vir a definir-se uma relação mais adequada às condições naturais do litoral.

2.4.4 Proposta de Modelo de Correção Atmosférica

O modelo de correção atmosférica adoptado neste trabalho é, pois, traduzido pelo seguinte sistema de equações:

$$T'L_w(\lambda_i) = L(\lambda_i) - L_R(\lambda_i) - K(\lambda_i, \lambda_o) [L(\lambda_o) - L_R(\lambda_o) - T'L_w(\lambda_o)] \quad (2-75a)$$

$$L_w(\lambda_o) = 0.0829 L_w(440) \left[\frac{L_w(440)}{L_w(550)} \right]^{-1.661} \quad (2-75b)$$

$$K(\lambda_i, \lambda_o) = \frac{E_o(\lambda_i)}{E_o(\lambda_o)} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} \right)^{-1.73} e^{-\left[\frac{1}{\cos(\theta_o)} + \frac{1}{\cos(\theta)} \right] [\tau_{o_s}(\lambda_i) - \tau_{o_s}(\lambda_o)]} \quad (2-75c)$$

com $\lambda_o = 670$ nm e $\lambda_i = 440, 520$ e 550 nm, para $i = 1, 2$ e 3 , respectivamente.

$L_R(\lambda_j)$, com $j = 0, 1, 2, 3$, é dado pela expressão (2-71) e todos os restantes parâmetros dados pelas equações e tabelas atrás referidas.

BIBLIOGRAFIA

ABUQUDUM, A.A.; ADENIJI, H.A.

"Movement of Water Columns in Lake Kainji"
in Rem. Sens. of Env., V7, N3, 1978.

ALBEROTANZA, L.; BARALE, V.; BERGAMASCO, A.

"NIMBUS-7 CZCS Images as Inputs in Circulation Modelling of the Northern Adriatic Sea"
in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

ARANAVUCHAPUN, Sasithorn; LeBLOND, Paul H.

"Turbidity of Coastal Water Determined from LANDSAT"
in Rem. Sens. of Env., V11, N2, 1981.

ARANUVACHAPUN, Sasithorn; PERRY, R.I.

"Spectral Variations of Coastal Irradiance as a Measure of Phytoplankton Pigments"
in Int. Jour. Rem. Sens., V2, N4, 1981.

ARANUVACHAPUN, Sasithorn

"Variation of Atmospheric Optical Depth for Remote Sensing Radiance Calculation"
in Rem. Sens. of Env., V13, N2, 1983.

BARTOLUCCI, Luis A.; ROBINSON, Barrett F.; SILVA, LeRoy F.

"Field Measurements of the Spectral Response of Natural Waters"
in Photos. Eng. Rem. Sens., V43, N5, 1977.

BECKER, F.

"Physique Fondamentale de la Télédétection"
in Proceedings of Summer School of Space Physics, 18 Aug-15 Sep 1978, CNES, 1979.

BROWN, Otis B.; GORDON, Howard R.

"Size-Particulate Index Distribution of Clear Coastal Water Particulates from Light Scatterings"
in Applied Optics, V13, N12, 1974.

DUKATA, R.P.; BRUTON, J.E.; JEROME, J.H.

'Optical Water Quality Model of Lake Ontario. 2: Determination of Chlorophyll-a and Suspended Mineral Concentrations of Natural Waters from Submersible and Low Altitude Optical Sensors'
in Applied Optics, V20, N9, 1981.

DUKATA, R.P.; BRUTON, J.E.; JEROME, J.H.

'Use of Chromaticity in Remote Measurements of Water Quality'
in Rem. Sens. of Environment, V13, N2, 1983.

CAMAGNI, P.; PARATESI, S.G.; GILLOT, R.; STURM, B.; TASSAN, S. et al.

'Marine Remote Sensing Activities of JRC-Ispra'
in EARSaL/ESA Symp. on 'Rem. Sens. Applic. for Env. Studies', Brussels, 26-28 April 1983, ESA/ESTEC, Noordwijk (Holanda), 1983.

CHARLTON, J.A.

'Sea Truth Measurements for Remote Sensing Verification'
in Proceedings of Summer School in 'Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology', Dundee, Set1980, Ellis Horwood Series 'Environment Sciences', Chichester, 1981.

CRACKNELL, A.P.

'Background: The Physical Basis of Remote Sensing'
in Proceedings of Summer School in 'Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology', Dundee, Set1980, Ellis Horwood Series 'Environment Sciences', Chichester, 1981.

DESCHAMPS, P.Y.; HERMAN, M.; LENOBLE, J.; TANRE, D.; VIOLLIER, M.

'Atmospheric Effects in Remote Sensing of Ground and Ocean Reflectances'
in Rem. Sens. of Atmospheres and Oceans, Deerak Ed., Ac.Press, 1980.

DESCHAMPS, P.Y.; HERMAN, M.; TANRE, D.

'Definitions of Atmospheric Radiance and Transmittances in Remote Sensing'
in Rem. Sens. of Env., V13, N1, 1983.

DOZIER, Jeff; FREW, James

'Atmospheric Corrections to Satellite Data over Rugged Terrain'
in Rem. Sens. of Env., V11, N3, 1981.

FERRARI, G.M.; PARATESI, S.R. Galli et al.

"Remote Monitoring of Sediments and Chlorophyll as Tracers of Pollutant Movements in a Mediterranean Coastal Area"

in Proceedings of IGARSS 84 Symp., Strasbourg 27-30 Aug 1984, ESA SP-215, 1984.

FISCHER, J.

"Indirect Measurements of Sediment, Phytoplankton and Yellow Substances"

in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

GAGLIARDINI, D.A.; KARSZENBAUM, H.; LEHECKIS, R.; KLEMAS, V.

"Application of LANDSAT MSS, NOAA/TIRDS AVHRR and NIMBUS CZCS to Study the La Plata River and its Interaction with the Ocean"

in Rem. Sens. of Environment, V15, N1, 1984.

GORDON, Howard R.; BROWN, Otis B.

"Influence of Bottom Depth and Albedo on the Diffuse Reflectance of a Flat Homogeneous Ocean"

in Applied Optics, V13, N9, 1974.

GORDON, Howard R.; McCLUNEY, W.R.

"Estimation of Depth of Sunlight Penetration in the Sea for Remote Sensing"

in Applied Optics, V14, N2, 1975.

GORDON, Howard R.; BROWN, Otis B.; JACOBS, Michael M.

"Computed Relationships Between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean"

in Applied Optics, V14, N2, 1975.

GORDON, Howard R.

"Removal of Atmospheric Effects from Satellite Imagery of the Oceans"

in Applied Optics, V17, N10, 1978.

GORDON, Howard R.; MUELLER, James L.; WRIGLEY, Robert C.

"Atmospheric Correction of NIMBUS-7 CZCS Imagery"

in Rem. Sens. of Atmospheres and Oceans, Deepak Ed., Ac. Press, 1980.

CORDON, Howard R.; CLARK, Dennis K.; BROWN, James W.; BROWN, Otis B. et al.
'Phytoplankton Pigment Concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison
of Ship Determinations and CZCS Estimates'
in Applied Optics, V22, N1, 1983.

HOLYER, Ronald
'Toward Universal Multispectral Suspended Sediment Algorithms'
in Rem. Sens. of Env., V7, N4, 1978.

HOLYER, Ronald
'Comments on 'Turbidity of Coastal Water Determined from LANDSAT''
in Rem. Sens. of Env., V12, N3, 1982.

JERLOV, N.G.
'Marine Optics'
Elsevier, New York, 1976.

JOHNSON, Robert W.; HARRISS, Robert C.
'Remote Sensing of Water Quality and Biological Measurements in Coastal Waters'
in Photos. Eng. Rem. Sens., V46, N1, 1980.

KLEMAS, V.; POLIS, D.F.
'Remote Sensing of Estuarine Fronts and their Effects on Pollutants'
in Photos. Eng. Rem. Sens., V43, N5, 1977.

KHORRAM, Siamak
'Use of Ocean Color Scanner Data in Water Quality Mapping'
in Photos. Eng. Rem. Sens., V47, N5, 1981.

MARACCI, G.; GUZZI, R.
'Atmospheric Field Measurements for Interpretation of CZCS Data'
in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern
Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

McCLUNEY, W. R.
'Ocean Color Spectrum Calculations'
in Applied Optics, V3, N10, 1974.

McCLUNEY, M. R.

'Remote Measurement of Water Color'
in Rem. Sens. of Env., V5, N1, 1976.

MOREL, André

'Diffusion de la Lumière par les Eaux de Mer. Résultats Expérimentaux et Approche Théorique'
in 'Optics of the Sea', AGARD Lectures Series N. 61, NATO, 1973.

NYKJAER, L.

'The Northern Adriatic Sea in 1982 as Seen by CZCS'
in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

DOMS, M.C.

'Sea-Truth Measurements for Interpretation of CZCS Data'
in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

PEIXOTO, José P.

'A Radiação Solar e o Ambiente'
Comissão Nacional do Ambiente, C01. 'O Ambiente e o Homem', Lisboa, 1981.

PIECH, Kenneth R.; SCHOTT, John R.; STEWART, Kenton M.

'The Blue to Green Reflectance Ratio and Lake Water Quality'
in Photos. Eng. Rem. Sens., V44, N10, 1978.

PIRAZZOLI, Paolo A.

'Cartographie des Hauts Fonds par Télédétection dans l'Archipel des Gambier (Polynésie Française)'
in L'Espace Géographique, V13, N3, Juin/Sept 1984.

RITCHIE, Jerry C.; SCHIEBE, Frank R.; McHENRY, J. Roder

'Remote Sensing of Suspended Sediment in Surface Waters'
in Photos. Eng. Rem. Sens., V42, N12, 1976.

ROBINSON, I.S.

'Satellite Oceanography'
Ellis Horwood Series 'Marine Science', Chichester, 1985.

RUSSEO, M.C.

'A Study on the Inherent Optical Properties of Yellow Substance from the Northern Part of the Adriatic Sea'

in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

SCHLITTENHARDT, P.M.

'Remote Sensing for Monitoring of Coastal Pollution Movements. Introduction to the JRC Activity'

in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

SINGH, S.M.

'Normalization of Water Leaving Radiance Obtained from the CZCS Data'

in EARSEL/ESA Symp. on 'Rem. Sens. Applic. for Env. Studies', Brussels, 26-28 April 1983, ESA/ESTEC, Noordwijk (Holanda), 1983.

SØRENSEN, B. Møller

'Important Considerations Regarding Remote Sensing of Marine Water Quality'

in 'Coastal and Marine Applications of Remote Sensing', Ed. A.P. Cracknell, The Rem. Sens. Soc., Reading, 1980.

STURM B.

'The Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data and The Quantitative Determination of Suspended Matter in Marine Water Surface Layers'

in Proceedings of Summer School in 'Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology', Dundee, Sep 1980, Ellis Horwood Series 'Environment Sciences', Chichester, 1981.

STURM, B.; NYKJAER, L.

'Status Report on the CZCS Interpretation Algorithms for the Northern Adriatic Sea'

in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

STURM, B.; TASSAN, S.

'An Algorithm for Sediment Retrieval from CZCS Data with Low Sensitivity to the Atmospheric Correction Effects'

in Proceedings of Workshop on Rem. Sens. of Coastal Transport in the Northern Adriatic Sea, Ispra, 11-12 Oct 1983, Ed. P. M. Schlittenhardt, JRC, 1983.

THOMAS, Yves-F.

'Télédétection des Eaux Littorales'

I Curso de Tratam. e Gestão da Inf. Obtida por Det. Remota, CPEEE, LNEC, 1979.

THOMAS, Yves-F.

'Télédétection des Structures Turbides en Manche'

in L'Espace Géographique, V13, N3, Jui/Sep 1984.

VIEILLEFOSSE, M.

'Influence de l'Atmosphère sur l'Rayonnement Réfléchi ou Emis par la Terre: Diffusion-Absorption dans le Visible et Proche Infra-Rouge'

in Proceedings of Summer School of Space Physics, 18Ago-15Set 1978, CNES, 1979.

VIEILLEFOSSE, M.

'Observation de la Mer: Possibilités Ouvertes en Visible et Infra-Rouge'

in Proceedings of Summer School of Space Physics, 18Ago-15Set 1978, CNES, 1979.

VIOLLIER, M.; DESCHAMPS, P.Y.; LECOMTE, P.

'Airborne Remote Sensing of Chlorophyll Content under Cloudy Sky as Applied to the Tropical Waters in the Gulf of Guinea'

in Rem. Sens. of Env., V7, N3, 1978.

WHITLOCK, C.H.; WITIE, W.G.; USRY, J.W.; GURGANUS, E.A.

'Penetration Depth at Green Wavelengths in Turbid Waters'

in Photos. Eng. Rem. Sens., V44, N11, 1978.

WHITLOCK, Charles H.; KUO, Chin Y.; LeCROY, Stuart R.

'Criteria for the Use of Regression Analysis for Remote Sensing of Sediments and Pollutants'

in Rem. Sens. of Env., V12, N2, 1982.

ZBINDEN, Régina

'Les Suspensions de la Baie du Mont de St. Michel: Etude Microgranulométrique et Radiométrique'

Thèse 3ème. Cycle, Univ. Paris-I, Paris, 1981.

CAPITULO 3

PROGRAMA DE CALCULO DE SUSPENSÕES NA AGUA DO MAR POR DETECÇÃO REMOTA

No Capítulo anterior, apresentou-se desenvolvidamente o modelo matemático de cálculo de suspensões na água do mar a partir de dados de satélite.

Neste Capítulo, descreve-se o algoritmo que materializa esse cálculo, através de um conjunto de programas para computador, sequencialmente encadeados.

O algoritmo foi desenvolvido para o sistema de processamento digital de imagens do LNEC e para ser aplicado a um tipo específico de dados (CRT do radiômetro CZCS, instalado a bordo do satélite Nimbus-7), apresentando-se as razões desta decisão.

3.1 INTRODUÇÃO

3.1.1 Ideias-Base que Presidiram ao Desenvolvimento do Algoritmo

Sem entrar em considerações aprofundadas sobre Metodologias de Concepção de Algoritmos para Computador, sempre se diz que, de um modo geral, a concepção e desenvolvimento de um algoritmo obedece aos seguintes princípios gerais:

- 1- Objectivos visados;
- 2- Características dos dados;
- 3- Forma de apresentação dos resultados;
- 4- Modo de exploração do algoritmo;
- 5- Equipamento disponível.

3.1.1.1 Objectivos Visados

Tal como se disse logo no Capítulo 1, pretende-se dispor de um utensílio que, a partir de dados de satélite se obtenha uma 'cartografia' da distribuição horizontal do teor de suspensões da água do mar, devidamente quantificado, e correspondente ao(s) instante(s) de obtenção daqueles dados sobre uma região, mais ou menos extensa.

Mais ainda, dada a importância que esta informação poderá ter na definição de eventuais políticas de protecção e controle da qualidade do meio marítimo e de exploração económica dos recursos dos oceanos (as pescas, nomeadamente), pretende-se que o algoritmo seja aplicável intensa e extensivamente de modo a que a caracterização das áreas geográficas de interesse possa também ser feita no tempo.

Resumidamente, pretende-se que o algoritmo, ou os programas a que dá origem, possa constituir um utensílio de base para o conhecimento científico do território, na terminologia e na atitude seguida pelo Núcleo de Estuários do LNEC.

Os objectivos assim expressos condicionam naturalmente a forma como o algoritmo é implementado, nomeadamente em questões de rapidez de cálculo e na apresentação de resultados.

3.1.1.2 Características dos Dados

Os dados disponíveis, quer pelo seu significado, informação que veiculam, etc., quer pela forma por que se apresentam, condicionam também o desenvolvimento do algoritmo.

No caso presente, trata-se de um conjunto de dados discretizados num certo número de pixels, dispostos ordenadamente em linhas e colunas, registados sob forma digital codificada, representando a Radiação espectral de uma superfície oceânica, observada 'num certo instante' sobre determinada região do globo terrestre por um radiómetro com determinadas características radiométricas e operacionais, instalado a bordo de um satélite revolvendo em torno da Terra segundo uma órbita de características definidas.

São as características do radiómetro, adicionadas às da órbita do satélite em que está instalado e às das operações de recepção, pré-processamento e

formatação efectuadas nas estações de recepção e distribuição, que dão ao algoritmo de processamento uma condicionante importante ao seu desenvolvimento e implementação.

3.1.1.3 Forma de Apresentação dos Resultados

Abordou-se anteriormente o facto de se pretender uma "cartografia" de superfície da distribuição horizontal do teor de suspensões.

E também uma condicionante do desenvolvimento do algoritmo, embora, neste caso, e como se descreve em parágrafo mais adiante, concordante com a forma por que se apresentam os dados, não provocando grandes alterações à sequência de cálculo.

3.1.1.4 Modo de Utilização e/ou Exploração dos Programas

De acordo com os objectivos atrás enunciados, os programas foram concebidos de modo a existir do utilizador o menor número de dados possível, facultando-lhe, em contrapartida, um conjunto de informações que lhe permita ajuizar, quando apropriado, das decisões a tomar face a determinadas opções que se lhe deparam.

Os programas foram pois concebidos para operarem de modo dialogante, embora, por este facto, se traduza num acréscimo de tempo de cálculo, ou mais exactamente, de acréscimo da duração de tempo entre o início e o término da execução do(s) programa(s).

Por outro lado, embora aqui se descrevam vários programas, ao utilizador tudo se passa como se de um único programa se trate, reduzindo-lhe assim o inconveniente de ter que fixar QUE programas executar, QUANDO e EM QUE sequência.

Tira-se partido deste modo de algumas capacidades do sistema de processamento de que se dispõe, com evidente comodidade para o utilizador neste aspecto.

Uma outra razão obrizou a esta decisão: a limitação de memória central da unidade de cálculo. De facto, manda a boa regra da programação que se evite tanto quanto possível a saturação da memória disponível do computador, quer com código (as diversas instruções de que se compoem os programas), quer com dados (estes representados por vectores (arrays) de grande número de elementos ou de dimensões).

Destas duas condições, a mais fácil (!?) de contemplar será a primeira, com recurso a uma técnica informática que se designa por 'chaining' e que corresponde a fazer executar um conjunto de programas em que estes se 'chamam' à execução entre si, seja em resultado de opções do utilizador, seja em resultado do encadeamento lógico dos diversos 'passos' a seguir em direcção ao objectivo.

3.1.1.5 Equipamento Disponível

A dependência do algoritmo no que respeita ao equipamento disponível traduz-se fundamentalmente nos seguintes 3 factores:

- 1- memória central;
- 2- sistema operativo;
- 3- linguagens de programação permitidas.

No que respeita à memória central, é evidente que a dependência dos algoritmos dessa disponibilidade se repercute na maior ou menor quantidade de informação que, em cada momento, pode residir no computador.

A informação a que nos referimos é, em geral, dos seguintes dois tipos básicos: programa (conjunto de instruções logicamente encadeadas e codificadas) e valores (tomados pelas variáveis intervenientes no algoritmo, tanto de parâmetros fixos (constantes), como dados e/ou resultados, numéricos ou textuais).

As restrições impostas pela memória disponível conduzem a que um problema possa ter que ser equacionado e traduzido sob forma algorítmica de modo completamente diferente, consoante se disponha de um equipamento sem limitações de memória (para o problema em análise, porque ela é sempre limitada), ou de um com sérias limitações desta. Nesta última situação, e caso seja possível resolver o problema, a solução passará necessariamente pela consideração de técnicas (ditas) sofisticadas de programação (como as de 'chaining', atrás citadas, 'overlays'(*), etc.), com numerosas sequências de transferências de 'dados' e de segmentos do programa entre a memória do computador e os seus periféricos de armazenamento de informação: discos, disquetes, bandas magnéticas, p.ex. Estas operações traduzem-se, na prática, por um elevado consumo de tempo na execução do programa.

(* - não se conhece tradução adequada para estes dois termos da linguagem informática, sem o recurso a longas descrições do que significam, pelo que se manteve a designação original.

A ser possível a sua resolução no equipamento, significa que este dispõe de um Sistema Operativo (Operating System) que permita o recurso àquelas técnicas.

O Sistema Operativo de um equipamento é um conjunto de programas desenvolvido e fornecido pelo fabricante, que permite ao utilizador interagir com aquele, através de comandos traduzidos por uma sequência de caracteres formando menemónicas adequadas à utilização dos recursos do equipamento (os periféricos, nomeadamente, para transferência de informação de uns para outros e para o computador), das linguagens de programação de 'alto nível' e à exploração de determinadas 'facilidades' (as referidas técnicas de programação especializadas, p.ex.).

3.1.2 Caracterização dos Dados Utilizados

3.1.2.1 Generalidades

As tentativas de abordagem do problema da avaliação do teor de suspensões em massas de água a partir de dados de satélite, cedo levaram à conclusão da necessidade de se dispor de equipamento especialmente vocacionado para o efeito.

De facto, apesar do sucesso da utilização dos dados dos satélites LANDSAT na caracterização dos recursos naturais de origem ou localização continental, a sua aplicação no domínio marítimo enfrentou desde logo o problema da sensibilidade dos sensores num meio particularmente pouco reflector ou emissor.

Como se refere no Capítulo anterior, sobre a interacção da radiação electromagnética com a água, a informação captada pelos sensores é proveniente de toda a coluna atmosférica e do 'elemento de terreno' sobre o qual incide a atenuação.

Os radiómetros são pois concebidos e a sua capacidade de resisto ajustada para situações consideradas representativas das experiências a realizar durante um curto período, no qual se pretendem atingir os objectivos que estiveram na origem da sua concepção.

Por razões de ordem tecnológica, porventura financeira também, não tem sido possível compatibilizar num único aparelho um conjunto de características óptico-radiométricas que permitam, a partir do espaço, resistir com igual rigor

a energia reflectida e/ou emitida dos objectos da superfície terrestre com grande diversidade de níveis de intensidade dessa mesma energia.

Tal como noutros campos, é sempre necessário estabelecer um compromisso entre o desejável e o possível.

É assim que, até 1978, não havia no espaço e em operação nenhum equipamento capaz de registar a fraca intensidade radiométrica proveniente das superfícies de água, na gama de comprimentos de onda visível e infravermelha próxima, com interesse nos estudos de qualidade de água.

Foram vários os investigadores que estabeleceram relações para o cálculo do teor de suspensões em superfícies de água a partir dos dados MSS dos satélites LANDSAT, os que mais facilmente se obtinham e a um custo razoavelmente convidativo (200US\$ até Outubro de 1980, 350US\$ até Outubro de 1982, 650US\$ posteriormente), com resultados que se mostraram pouco realistas ou com uma margem de erro considerável, na maior parte dos casos estudados, embora de maior confiança quando aplicados em estuários de forte concentração de material sólido em suspensão, como o são alguns estuários da Índia e da China.

O radiómetro MSS foi pois concebido para estudos da superfície terrestre continental e a sua sensibilidade de resposta ajustada para 'elementos de terreno' com um nível de intensidade radiométrica consideravelmente superior ao das superfícies de água, mesmo quando portadora de material sólido em suspensão.

A importância que os recursos marítimos têm vindo a assumir na economia mundial, e que o desenvolvimento da indústria das pescas, do frio e dos mecanismos de distribuição permitem ajuizar, levou ao projecto, construção e colocação em operação de um radiómetro especialmente vocacionado para estudos oceanográficos em matéria de qualidade de água, operando numa gama de comprimentos de onda em que as propriedades radiométricas da água e seus constituintes são particularmente realçados.

É assim que, aproveitando uma missão experimental da NASA de equipamentos para o estudo da atmosfera, e instalados a bordo do satélite NIMBUS-7, se incluiu um programa de estudo das propriedades ópticas da água do mar por detecção remota a partir do espaço, utilizando-se um radiómetro projectado para esse fim, denominado CZCS (Coastal Zone Color Scanner).

Embora no Apêndice D se dê relato circunstanciado desta missão, do radiómetro

CZCS e dos dados que produz, descrevem-se resumidamente nos parágrafos seguintes os seus aspectos relevantes.

3.1.2.2 O Radiómetro CZCS

Este radiómetro opera em 6 bandas espectrais, escolhidas a partir do conhecimento prévio que se dispõe das propriedades ópticas da água do mar, nomeadamente no domínio da absorção e difusão da água, dos sais constituintes e das matérias em suspensão e dissolvidas.

As bandas espectrais em que opera o radiómetro são as seguintes:

- 1- Banda 1: 433-453nm (valor central 443nm), correspondendo à radiação azul-verde na zona do visível;
- 2- Banda 2: 510-530nm (520nm), radiação verde;
- 3- Banda 3: 540-560nm (550nm), radiação verde-laranja;
- 4- Banda 4: 660-680nm (670nm), radiação vermelha;
- 5- Banda 5: 700-800nm (750nm), radiação vermelha-infravermelha próxima;
- 6- Banda 6: 10,5-12,5 μ m (11,5 μ m), radiação infravermelha térmica.

A banda 6 destina-se à medição da radiação EMITIDA pelas superfícies sobrevoadas e no "campo de visão" do radiómetro. É designada por banda dos infravermelhos térmicos ou banda térmica, "permitindo" a avaliação do estado térmico dessas superfícies.

As bandas 1 e 2 atrás referidas correspondem às bandas de absorção e de reflexão da clorofila, um dos constituintes da água do mar, cuja maior ou menor concentração varia sazonalmente, bem como com a temperatura das águas e com a sua densidade (maior ou menor salinidade, p.ex.).

A banda 3, é particularmente indicada na detecção das substâncias amarelas (selbststoff, tal como designada por KALLE, em 1939) e dos sedimentos em suspensão, pois é a banda espectral correspondente ao máximo de reflectividade destas substâncias.

A banda 5, corresponde a uma zona do espectro em que a água apresenta muito baixa reflectividade (elevada absorvidade), e, por isso, é utilizada para ser-

rar as superfícies aquáticas das continentais ou das nebulosas, dado o elevado contraste que a fronteira entre estas superfícies apresenta: valores radiométricos muito baixos nas superfícies aquáticas (tonalidade escura nas imagens), valores mais elevados nas superfícies continentais ou nebulosas (tonalidade clara nas imagens).

Dada a baixa reflectividade da água na quase totalidade do espectro (o mínimo de absorção da água pura situa-se na gama dos 440-450nm), os elementos foto-sensíveis do radiómetro nas 5 bandas ópticas foram projectados e escolhidos de modo a apresentarem uma elevada relação sinal/ruído, o que provoca a saturação do sinal, i.e., a "resposta máxima" do equipamento quando este observa "objectos" de reflectividade superior à da água, como o são as massas continentais e as nuvens.

Esta vantagem (o ser capaz de detectar valores radiométricos de baixa intensidade, aliada à boa resolução radiométrica), é obtida à custa da perda de uma resolução geométrica fina. De facto, estes dois tipos de resolução, a geométrica e a radiométrica, apresentam-se geralmente em relação inversa: quanto "melhor" a resolução geométrica (elementos da imagem de pequenas dimensões), menos boa é a resolução radiométrica (menor capacidade de registo de duas intensidades radiométricas muito próximas entre si), e vice-versa.

A largura de cada linha "varrida" pelo radiómetro é de 825m no Nadir do satélite, podendo atingir cerca de 1400m nas suas extremidades, distantes de 1566Km entre si, tal é a amplitude angular do campo de visão activo do espelho colector da radiação reflectida e emitida pela superfície terrestre.

Em consequência, quaisquer valores quantitativos de um índice de qualidade da água reportam-se a valores médios num elemento do terreno cujas dimensões são, no mínimo, 825x825m.

Se não se tiverem em devida conta os aspectos operacionais do radiómetro, aperceber-se-á facilmente o erro cometido numa comparação expedita entre os valores obtidos a partir dos dados do radiómetro CZCS por um modelo desenvolvido para esse fim (como o que se apresenta neste trabalho) e os obtidos por medição directa "in situ", estes tipicamente pontuais.

3.1.2.3 Os Dados CZCS CRT

Os valores radiométricos detectados pelo radiómetro CZCS são enviados para as estações de recepção em terra, onde, conjuntamente com outros valores relativos à Atitude e coordenadas do satélite, coordenadas de pontos relevantes da superfície observada e do Sol, parâmetros de calibração dos 6 sensores e outros, são formatados e gravados em banda magnética, constituindo o que se designa por dados CZCS CRT (CZCS Calibrated Radiance and Temperature).

Os valores radiométricos observados são codificados em números inteiros de gama 0 a 255, o que, em representação binária, se traduz pelo uso de 'palavras de 8 bits'.

Os parâmetros de calibração também incluídos no conjunto de dados permitem a tradução daqueles valores codificados em radiancias, essenciais para a caracterização radiométrica das superfícies sobrevoadas.

Dada a elevada obliquidade da direcção de observação do radiómetro (semiamplitude angular de 39.34 graus no CZCS, 5.5 graus no radiómetro MSS), é necessário considerar a geometria de posição dos 3 intervenientes principais da experiência: radiómetro, iluminante (o Sol) e objecto. Os valores por que se traduzem são os anteriormente referidos, coordenadas do satélite, do Sol e de alguns pontos referenciados em cada linha 'varrida' (anchor points).

Estes valores adicionais são números reais representados na banda magnética segundo codificação variada, conforme a natureza do parâmetro representado (existência de maior ou menor precisão). É de salientar que a codificação seguida para a representação digital dos dados CRT está hoje em desuso, o que dificulta o seu processamento por pessoal não informático, como é o caso do autor deste trabalho.

As estações de recepção e de distribuição dos dados CRT fornecem um manual descritivo da formatação utilizada. Porém, nem sempre o conteúdo da banda magnética corresponde ao expresso no manual. Para ser mais preciso, posições há na banda magnética de conteúdo e significado diferente ao que o manual prevê encontrar-se nessas posições, o que obriga a uma tarefa excepcionalmente morosa na sua leitura e interpretação.

No Apêndice D, transcreve-se sob forma tabular o conteúdo esperado de uma banda CZCS CRT, tal como estipulado pela NASA em 1979, entidade responsável pelo lançamento e operação do satélite NIMBUS-7, a bordo do qual opera o radiómetro

CZCS.

3.1.3 Caracterização do Sistema de Processamento Digital Utilizado

O conjunto de programas desenvolvido para o cálculo do teor de suspensões de água do mar a partir de dados de satélite, concretamente a partir dos dados CZCS CRT, foi implementado no sistema de processamento digital de imagens do LNEC.

Este sistema, ilustrado na Figura 3.1, é constituído pelos seguintes componentes(*):

- 1- Uma unidade central de processamento PDP 11/34A, com 256 Kilobytes (Kb) de memória acessível e processador de números reais.

O Sistema Operativo é o RSX11M, embora a máquina disponha de outros.

As linguagens de programação possíveis são APL, C, FORTRAN IV e 77, PASCAL e RATFIV, tendo-se utilizado esta última para a elaboração dos programas.

- 2- Uma unidade de banda magnética DEC TE16, permitindo a leitura e a escrita em 9 pistas e a 800 ou 1600bpi de densidade.
- 3- Duas unidades de disco DEC RK07 aceitando discos amovíveis de 28 Megabytes (Mb) de capacidade.
- 4- Um Processador de Imagens SIGMA ARCS 7000, com 128Kb de memória disponível e 1Mb de memória vídeo subdividida em 4 planos de imagens de 512x512 pixels de 8 bits, permitindo o processamento em 'cor verdadeira'.

(*) - A referência a marcas comerciais não deve ser interpretada como indicador de preferência pelo LNEC, pelo autor, ou de algum modo publicitário. Serve apenas para suprir lacunas na descrição das suas características, necessariamente breves, considerando que a referência ao modelo e à marca poderão conduzir os interessados às fontes apropriadas para melhor e mais completo esclarecimento.

- 5- Um terminal video alfanumérico e gráfico colorido, acoplado ao processador de imagens e à unidade central.
- 6- Duas impressoras, DECWRITER III LA 120, alfanumérica, e ACT II, para impressão de gráficos coloridos.
- 7- Módulo de comunicações, permitindo a ligação do sistema a terminais remotos ou a outros sistemas de cálculo (de momento apenas ao Centro de Informática do LNEC).

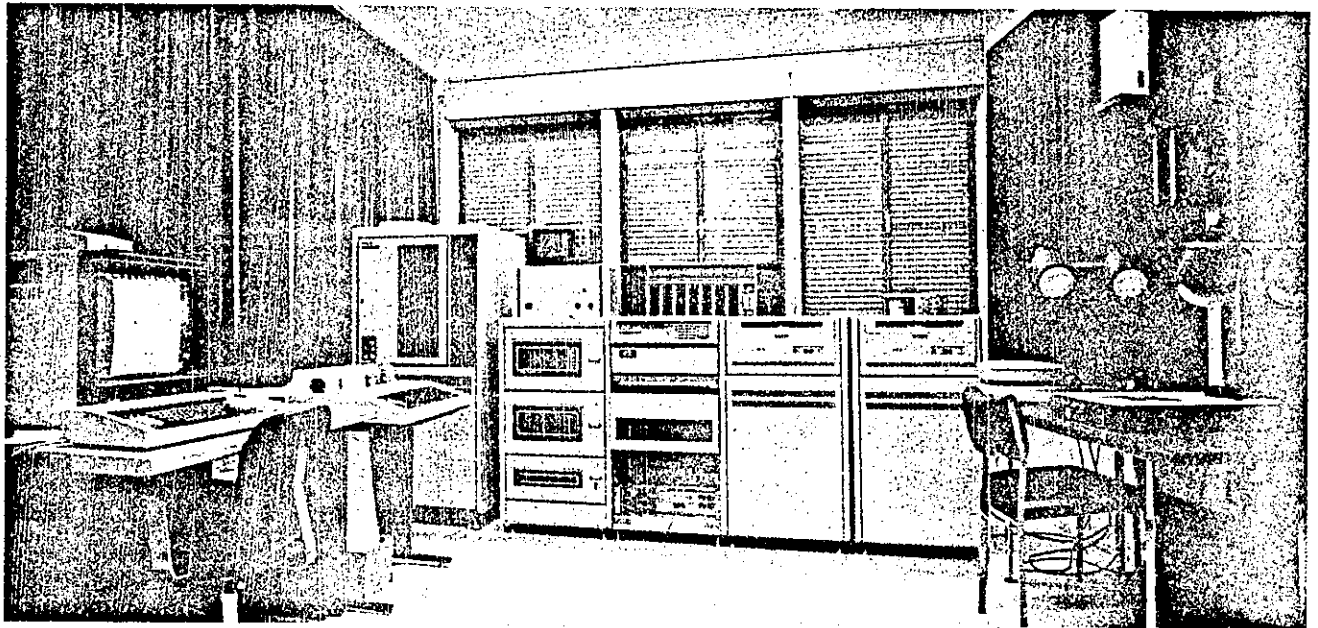


Figura 3.1

O Sistema de Processamento Digital de Imagens do LNEC
(LNEC cliché No. 82268)

Em linhas gerais, esta configuração corresponde às características desejáveis.

Algumas limitações se têm sentido, porém, nomeadamente em matéria de memória central disponível, a qual, embora suficiente para grande parte do

mento digital de imagens efectuado, obriga a artificios de programação e pretendem implementar algoritmos mais sofisticados.

Esta limitação do conjunto reside no Processador de Imagens, pois, con-
tente ao que é usual em equipamentos deste tipo, é fornecido pelo fabri-
cador de quaisquer programas de manipulação gráfica, além de estar
dotado superiormente na capacidade de memória vídeo (1Mb), com a tecnolo-
gia utilizada presentemente.

Essas limitações têm originado um consumo apreciável de tempo no estudo e
desenvolvimento de subrotinas básicas gráficas e outras para uma exploração
eficiente do sistema. A limitação da memória obriga a frequentes acessos a
disquetes para a substituição das imagens projectadas no visor.

Em conta que a tendência actual no desenvolvimento dos radiómetros é a de
obter a obtenção de imagens multiespectrais em maior número de bandas es-
pectrais (CZCS: 6 canais; TM: 7; OCM: 12, entre outros), esta limitação pro-
longa o tempo de execução dos programas, agravando-se os seus cus-
tos de utilização com eventual perda de competitividade no mercado deste tipo
de equipamentos.

O equipamento do LNEC dispõe ainda dos seguintes acessórios, embora não inter-
operativos de momento no conjunto de programas desenvolvido para a
caracterização da qualidade das águas do mar e aqui descrito:

Uma mesa de digitalização (digitizing tablet), permitindo a
digitalização de pequenos gráficos (30x30cm) ou apontar a opção preferida
num menu, pelo deslocamento de um cursor no visor.

O sistema digitalizador de oracos constituído por uma câmara de registro
de vídeo, respectiva coluna de suporte e base de iluminação, acoplada a um
módulo digitalizador do sinal, COLORADO VIDEO, este, por sua vez, ligado ao
processador central.

O conjunto, que se encontra em fase de adaptação ao sistema, permitirá a
digitalização de fotografias aéreas, mapas, etc.

3- Accionador esférico de cursor (tracker-ball), multifuncional.

3.1.4 Apresentação Genérica dos Programas.

Embora ao utilizador tudo se passe como se de um único programa se tratasse, a verdade é que são de facto vários os programas intervenientes durante a sessão de processamento.

Eles são aqui individualizados para melhor elucidação das diversas fases da sequência do cálculo, desde que o utilizador se propõe executá-lo até à obtenção dos resultados.

3.1.4.1 Programas de Apresentação, de Descrição dos Dados e de Inicialização

O objectivo destes programas é o de levar até ao utilizador um conjunto de elementos sobre alguns aspectos relevantes das imagens presentes numa banda magnética CZCS CRT.

Podem distinguir-se os seguintes tópicos:

1- Do ponto de vista do utilizador:

- a) Informá-lo sobre o conteúdo de uma banda magnética CZCS CRT;
- b) Permitir-lhe a selecção de uma zona de trabalho contida na imagem escolhida, sobre a qual aplicará os programas;
- c) Informá-lo sobre algumas características da zona seleccionada.

2- Do ponto de vista dos programas:

- a) Extrair parâmetros básicos da imagem;
- b) Extrair parâmetros básicos da zona seleccionada;

c) 'Eliminar' os pixels não identificados como 'água', na imagem da zona seleccionada.

De facto, e como se referiu em parágrafo anterior e mais detalhadamente no Apêndice II, uma banda CZCS CRT pode conter até 3 imagens, tanto referentes a uma mesma zona geográfica do globo terrestre, aproximadamente, obtidas em datas e instantes diferentes, como ainda referentes a diferentes zonas geográficas, não necessariamente contíguas. Há pois que elucidar o utilizador, QUE e QUANTAS imagens estão de facto presentes na banda magnética.

Uma vez conhecedor do seu conteúdo, o utilizador seleccionará a imagem que lhe interessará processar, baseado num critério pessoal, convindo no entanto que desta tenha, antes de prosseguir, uma visão geral.

Escolhida pois a imagem pretendida, das 3 possíveis, o programa projecta no monitor de vídeo colorido um subconjunto de pixels (512x512) do conjunto total daquela, pois a imagem distribuída em banda magnética é formada por 970 linhas (no máximo), de 1968 pixels por linha e seis canais espectrais (somente 3 são visualizados simultaneamente).

Se a imagem projectada corresponder à área geográfica esperada, o utilizador seleccionará agora uma zona desta, sobre a qual incidirá o cálculo, fornecendo ao programa as coordenadas (linha, coluna) do canto superior esquerdo da zona pretendida, e contida na imagem total.

Aquela zona terá as dimensões de 512x512 pixels, 4 canais (o algoritmo só utiliza as 4 primeiras bandas espectrais), e, uma vez extraída da banda, é de novo projectada no écran para que o utilizador confirme.

Em caso positivo, é apresentado um resumo de algumas características estatísticas da imagem a processar, como o histograma, valores mínimo, máximo, média, moda, mediana e desvio padrão de cada um dos canais espectrais. Em caso negativo, o processo de selecção é retomado até à satisfação do interesse do utilizador.

No final desta fase de selecção da zona de interesse, são excluídos os pixels correspondentes a massas continentais e nebulosas presentes na imagem

seleccionada.

3.1.4.2 Programas de Correção Atmosférica

Ao descreverem-se as características dos dados CRT e do modo operativo do radiómetro CZCS, referiu-se a grande obliquidade das direcções de observação, quando comparadas com a de outros radiómetros, em resultado da elevada resolução radiométrica daquele, conseqüente redução da resolução geométrica e ainda considerável extensão das linhas observadas, 1566Km, de que resulta não ser desprezável a curvatura da superfície terrestre no cálculo a efectuar.

De facto, para que se possam calcular as radiancias emergentes da superfície do mar (i.e., retirar a componente atmosférica presente no sinal registado pelo radiómetro), a geometria de observação e de iluminação tem que ser tomada em linha de conta, conduzindo a um resultado equivalente ao que se obteria se se deslocasse o radiómetro a altíssima velocidade imediatamente acima das superfícies observadas, medindo a energia electromagnética reflectida segundo uma direcção normal àquelas.

É este o objectivo deste conjunto de programas, de cuja execução se obtêm então as radiancias corrigidas em cada um dos pixels da zona seleccionada.

Fica assim aberto o caminho à terceira fase do processo, e que consiste no cálculo das suspensões, de acordo com o modelo apresentado no Capítulo 2, ou outros também incluídos no programa.

3.1.4.3 Programas de Cálculo de Suspensões.

É, finalmente, com este conjunto de programas que se calculam as suspensões presentes na massa de água observada.

Como dito anteriormente, prevê-se o cálculo de dois tipos de suspensões: de pigmentos clorofilianos e de sedimentos.

Apoiando-se este cálculo em algoritmos diferentes consoante o tipo de suspensões a quantificar, naturalmente que o utilizador terá que seleccionar qual o conjunto de programas que pretende executar.

Em qualquer dos casos, para além do algoritmo desenvolvido segundo o modelo

Proposto neste trabalho, estão também disponíveis algoritmos de aplicação de alguns dos modelos apresentados por outros autores.

3.2 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

Descrevem-se em seguida alguns dos aspectos mais relevantes dos algoritmos dos programas elaborados, genericamente apresentados nos parágrafos anteriores (3.1.4.1, 3.1.4.2 e 3.1.4.3).

3.2.1 Programas de Inicialização e Listagem do Conteúdo da Banda Magnética

Este conjunto de programas tem por objectivo, como se disse, informar o utilizador sobre o conteúdo da banda magnética disponível.

Como foi referido, cada banda magnética pode conter até três imagens CZCS, registadas sequencialmente, embora sem nenhuma ordem predeterminada (p.ex., cronológicas, ou de localização geográfica).

A informação prestada ao utilizador é, pois, sobre as referências geográficas e temporais de cada uma das imagens, bem como sobre as condições de iluminação (coordenadas do Sol) e de observação (coordenadas do satélite).

Estes elementos estão registados em determinadas posições dos ficheiros constantes da banda, relativos a cada imagem, concretamente no Ficheiro de Identificação (Header File) e no Registo de Documentação (Documentation Record) do Ficheiro de Dados (Data File) - ver Apêndice D, Quadros D-IV e D-V.

Os programas limitam-se, pois, a extrai-los daquelas posições e a apresentá-los no terminal, sob a forma de quadro como o que se apresenta no Quadro 3-I.

Para este efeito, os programas utilizam um conjunto de subrotinas de manipulação da informação digital registada em bandas magnéticas (quaisquer) utilizáveis em computador, constituindo um "pacote" (package) designado por MTIO (Magnetic Tape Input/Output Subroutines), e que fora previamente desenvolvido pelo técnico informático Salvador Pinto de Abreu, de acordo com as especificações definidas pelo autor, após a instalação do sistema de

Quadro 3-I
Características das Imagens CZCS Contidas numa Banda Magnética

	Imagem 1	Imagem 2	Imagem 3
<hr/>			
Coordenadas:			
do centro:			
Longitude:			
Latitude :			
do Nadir:			
Longitude:			
Latitude :			
do Sol:			
Elevação:			
Azimute :			
Data de Observação:			
Dia:			
Inst. Inicial:			
Inst. Final:			

Número total de imagens presentes na banda:

processamento digital de imagens do LNEC, em finais de 1983, aproximadamente. Não será, por isso, aqui descrito.

Naturalmente que a apresentação destas informações sobre as imagens contidas na banda visa a sequência do processamento assim iniciado, pela escolha de qual das imagens listadas se pretende trabalhar. O quadro descritivo das imagens termina com a respectiva pergunta, cuja resposta desencadeará a execução do programa seguinte.

Previu-se, porém, que o utilizador possa não escolher nenhuma das imagens listadas, por exemplo por a banda magnética não conter a imagem, prévia e efectivamente pretendida. A resposta à questão posta ('Qual das imagens pretende processar (1, 2, ou 3; 0=terminar)?') é, neste caso '0' (zero), permitindo o retorno do programa ao 'início'.

3.2.2 Programas de Seleccção da Zona da Imagem a Processar

Escolhida a imagem, selecciona-se em seguida uma zona desta, de dimensões mais reduzidas à qual se aplicará os programas de cálculo dos parâmetros de qualidade de água.

Entende-se por "Zona Processável" qualquer subconjunto de 512x512 pixels contíguos, organizados em igual número de linhas e de colunas, extraídos da imagem observada (constituída por 970 linhas de 1968 pixels cada).

Os programas permitem alcançar estes objectivos em 4 "etapas":

- 1- Projectação/Visualização da imagem;
- 2- Identificação da zona a processar;
- 3- Identificação e supressão dos pixels 'continente' e 'nuvens';
- 4- Constituição dos ficheiros da zona a processar.

3.2.2.1 Visualização da Imagem

A selecção da zona da imagem sobre a qual incidirá o programa de cálculo dos parâmetros de qualidade de água, precedido obviamente do programa de correcção atmosférica, é facultada pela projecção da imagem escolhida, no monitor de video colorido do sistema de processamento.

Dado que o número de pixels visualizáveis neste monitor é inferior ao número de pixels que constituem a imagem (512x512 no monitor, 970x1968 na imagem CZCS), a projecção desta tem que ser efectuada suprimindo alguns dos seus pixels.

A diferença entre o número de linhas da imagem (970) e o número de pixels de cada linha (1968) obriga à adopção de critérios de supressão de pixels a projectar, diferentes num caso e noutro.

O programa projecta no monitor, 1 de cada 2 linhas consecutivas observadas (passo em linha igual a 2), sendo cada linha visualizada constituída por pixels retirados 1 em cada 4 da linha correspondente (passo em coluna igual a 4).

A organização dos pixels projectados/visualizados no monitor obedece ainda ao seguinte critério:

- 1- O centro da imagem observada (linha 485, pixel 984) é projectado no centro do monitor (linha 256, coluna 256).
- 2- A sequência dos pixels centrais de cada linha da imagem observada (pixels 984, definindo o traço do satélite na superfície terrestre) é projectada na coluna central do monitor (coluna 256).
- 3- A linha central do monitor (linha 256) reproduz a linha central da imagem observada (linha 485).

A adopção destes critérios implica as consequências seguintes:

- 1- As 486 linhas da imagem observada, seleccionadas para serem projectadas, não preenchem as 512 linhas do monitor.

Por outras palavras, as primeiras e as últimas 13 linhas do monitor ($(512-486)/2$) não contêm qualquer informação sobre a imagem (o valor dos respectivos pixels é nulo, 0).

- 2- Os 492 pixels de cada linha da imagem, seleccionados para a projecção no monitor, não preenchem os 512 disponíveis, pelo que as primeiras e últimas 15 colunas do monitor ($(512-492)/2$) não contêm informação alguma sobre a imagem observada, sendo igualmente nulo o valor dos respectivos pixels.
- 3- O elevado "passo" de selecção dos pixels em cada linha (4) e a diferença dos "passos" em linha e em coluna (2 e 4, respectivamente), produzem uma distorção apreciável nas direcções vertical e horizontal da imagem projectada.

O sistema de processamento digital de imagens no qual se implementaram os programas permite a visualização de imagens multispectrais pela projecção simultânea de 3 canais espectrais, o que, na linguagem da espacialidade, se designa por "Processamento em Cor Verdadeira (PCV)". Dos seis canais em que opera o radiómetro CZCS, os canais projectados são o 1, 3 e 4, segundo as cores Azul, Verde e Vermelha, respectivamente, ou seja nos "planos de imagem" do processador com idêntica designação.

Podendo a escolha destes canais ser arbitrária (quaisquer três dos seis), a que foi referida permite uma apreciação visual da qualidade da imagem escolhida, tanto sobre os aspectos relativos à "qualidade da água" (presença de matérias em suspensão), como sobre a natureza da atmosfera interposta (localização de nuvens e maior ou menor densidade de aerossóis e sua qualidade) e sobre a localização das superfícies continentais.

De facto, o canal 1 (440nm) e o canal 3 (550nm) permitem a apreciação qualitativa quer sobre os aspectos atmosféricos referidos quer sobre os constituintes da água, como se referiu no Capítulo 2. Quanto ao canal 4 (670nm), ele permite a identificação de elementos básicos geralmente presentes na imagem CZCS: massas nebulosas muito reflectoras, superfícies continentais medianamente reflectoras, e superfícies de água pouco ou nada reflectoras. A inclusão do canal 4 no conjunto visualizado permite, pois, uma rápida identificação da zona geográfica reproduzida, pelo contraste entre as superfícies continentais e aquáticas.

3.2.2.2 Identificação da Zona a Processar

Visualizada a "totalidade" da imagem, cabe ao utilizador a identificação de uma zona contida nesta, à qual se aplicarão os programas de processamento. Esta identificação é realizada pela indicação das coordenadas do canto superior esquerdo da zona a seleccionar (números de linha e de coluna do monitor).

Previu-se que uma eventual resposta nula (0, zero) àquelas coordenadas, signifique que o utilizador não está interessado em seleccionar nenhuma zona da imagem projectada, p.ex., por esta não se apresentar com a qualidade devida.

Neste caso, o programa volta a apresentar ao utilizador o quadro das características genéricas das imagens contidas na banda magnética (Quadro 3-I), recomeçando o processo como atrás descrito, solicitando-lhe a escolha de outra imagem.

Uma vez dadas as coordenadas pedidas, o programa projectará no monitor, em substituição da imagem 'total', o conjunto de 512 pixels de cada uma das 512 linhas contíguas a esse ponto, dos mesmos canais espectrais (1, 3 e 4). O utilizador visualiza assim a zona seleccionada.

A distorção acentuada evidenciada pela imagem 'total' anteriormente projectada poderá dificultar a identificação correcta da zona pretendida e agora visualizada, pelo que se previu, também, que o utilizador manifesta claramente a sua concordância relativamente ao que está a presenciar.

Em caso negativo, reinicia-se o processo conforme descrito em 3.2.2.1.

3.2.2.3 Identificação e Supressão das 'Classes' 'Continente' e Nuvens'.

Em caso afirmativo, segue-se a interpretação da zona agora visualizada, com vista à identificação das nuvens e das superfícies continentais nela presentes, para que a respectiva informação seja ignorada no processamento que se lhe aplicará.

Esta identificação é feita com recurso aos valores dos pixels do canal 4, projectado no plano Vermelho, através do respectivo histograma. Caso aqueles 3 elementos (água, continente e nuvens) estejam presentes na imagem de zona visualizada, o respectivo histograma manifestará 3 zonas modais, correspondentes aos valores radiométricos respectivos: baixos para a água, intermédios para as superfícies continentais e mais elevados para as nuvens.

A identificação destas duas últimas 'classes' é feita por indicação dos limites 'radiométricos' inferior e superior respectivos.

Em face da resposta, o programa 'suprimirá' aquelas duas classes 'colorindo' de branco as superfícies nebulosas e de negro as superfícies continentais, mantendo inalteradas (visíveis) as superfícies da água.

A técnica utilizada para este fim designa-se por 'overlay' gráfico, dada a semelhança com o efeito produzido pela sobreposição de uma folha transparente, colorida de branco e de negro opacos nas zonas correspondentes à presença daquelas classes na imagem subjacente.

A semelhança com o critério adoptado anteriormente, o utilizador poderá corrigir os limites 'radiométricos' definidos, até garantir a delimitação apropriada

dasquelas 3 classes.

3.2.2.4 Constituição dos Ficheiros da Zona a Processar.

O processo de selecção da zona de trabalho termina com a constituição dos ficheiros desta, referentes aos 4 primeiros canais CZCS (1 ficheiro por canal), dos quais foram "suprimidos" os elementos da imagem anteriormente classificados como 'continente' ou 'nuvens', atribuindo-se a estes, valores de código 0 e 255, respectivamente.

Paralelamente a esta constituição de ficheiros (com os nomes CZCS.C1, CZCS.C2, CZCS.C3, CZCS.C4, para os canais 1, 2, 3 e 4, respectivamente) são também arquivados um conjunto de parâmetros essenciais à continuação do cálculo.

Numa tentativa de sistematização dos parâmetros a arquivar, estes podem ser agrupados do seguinte modo:

1- Parâmetros geométricos:

Referem-se estes à geometria de iluminação, de observação e do 'objecto' observado. Os parâmetros geométricos arquivados são relativos a:

a) Geometria solar:

Coordenadas do Sol (Ascensão Recta e Declinação) nos instantes inicial e final da observação da cena.

b) Geometria do satélite ou de navegação:

Coordenadas do satélite (coordenadas cartesianas X, Y, Z, em referencial inercial adiante definido).

c) Geometria de observação:

Valor do estado de inclinação do espelho colector da radiação relativamente a um plano vertical.

d) Geometria da zona observada:

Números das colunas dos pixels sobre os quais se dispõe das coordenadas geográficas ('pixels localizados' PL, anchor points), seguidos dos valores das respectivas coordenadas, em Longitude e Latitude.

e) Elementos geométricos diversos:

Ascensão Recta do meridiano de Greenwich nos instantes inicial e final de observação; número de ordem na imagem total; em linha e coluna, do pixel 'canto superior esquerdo' da zona seleccionada.

Todos estes parâmetros são obviamente lidos e/ou calculados a partir de informações registadas na banda magnética, correspondentes à imagem que contém a zona seleccionada (ver quadros D-VI, D-VIII, Apêndice D).

2- Parâmetros temporais:

Estes parâmetros referem-se à data de observação e captação da imagem, bem como aos instantes de observação da 1.ª e última linha da imagem seleccionada. Incluiu-se ainda neste grupo, o número de órbita, N.

3- Parâmetros radiométricos:

Este conjunto refere-se aos coeficientes de calibração de cada um dos 4 canais, com os quais se poderão 'recuperar' os valores dos pixels, a partir dos valores digitais por que são codificados para registo nas bandas magnéticas e processamento digital de imagens. Acrescenta-se a este conjunto o valor do estado de 'Ganho' em que o radiómetro opera em cada canal.

A propósito dos parâmetros de calibração, cabe aqui uma referência particular.

3.2.2.5 Coeficientes de Calibração, ou como Recuperar os Valores Radiométricos Observados

A conversão dos valores codificados das radiancias dos pixels é efectuada através das Curvas de Calibração e dos respectivos Coeficientes de Calibração.

A semelhança de inúmeros equipamentos de medida, os radiómetros medem a radiancia reflectida pelos pixels e neles incidentes segundo um processo analógico, i.e., de conversão da grandeza medida (Radiancia) numa outra, eléctrica, (em geral, Volt). Esta grandeza eléctrica é posteriormente convertida em 'grandeza digital', valores inteiros entre 0 e 255.

Para se recuperarem os valores radiométricos, há, pois, que 'passar' por duas

Curvas de Calibração: uma primeira que converta os valores digitais 'impressos' na banda magnética em Volt; e uma segunda que converta estes em Radiações (Figura 3.2).

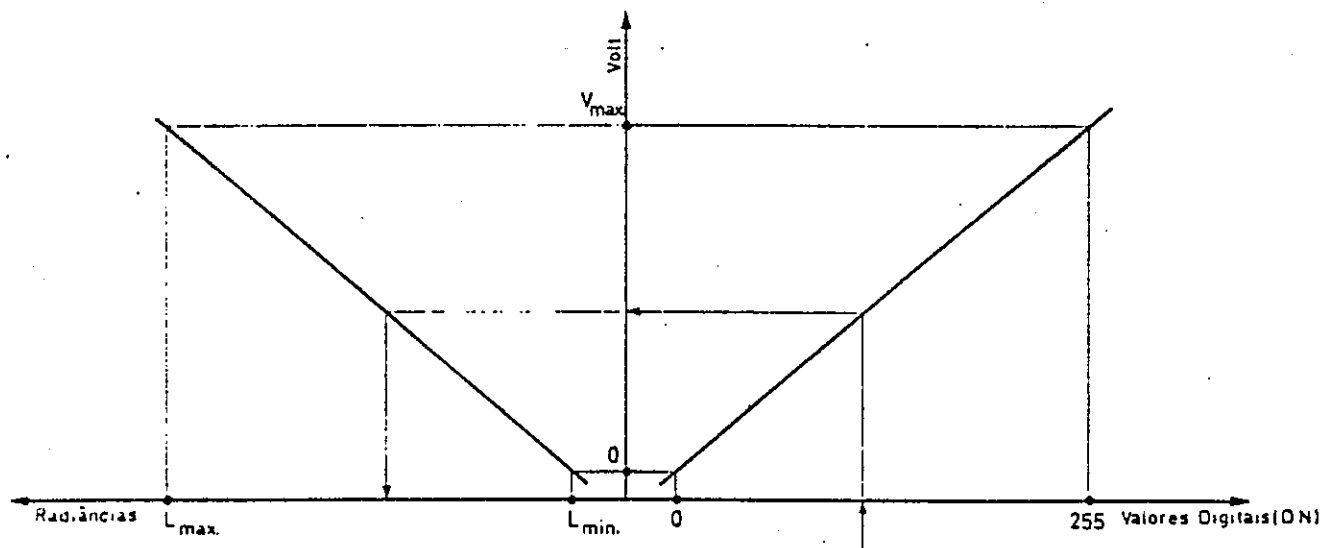


Figura 3.2

Curvas de Calibração Intervinentes na Conversão de Valores

Em geral, ambas as curvas de calibração são de tipo linear; i.e., os equipamentos são concebidos de modo a manterem uma proporcionalidade constante entre a sua 'resposta' e a 'solicitação' que o activa, na gama de valores para que foi construído, acima da qual saturará; e abaixo da qual não terá capacidade de resposta (ou sensibilidade).

Deste modo, as curvas de calibração são representadas por um par de valores, os Coeficientes de Calibração, A (declive, slope) e B (ordenada na origem, intercept).

Se os Coeficientes de Calibração da 'curva' 'Volt vs. Valores Digitais (DN)' se podem considerar estáveis no tempo (ROBINSON 1985), o mesmo não se poderá dizer dos Coeficientes da 'curva' 'Radiação vs. Volt', devido ao uso e desgaste de ordem mecânica, eléctrica e óptica dos componentes operacionais do radiómetro, provocados por uma operação continuada.

Há, pois, que proceder a correcções dos valores nominais dos coeficientes de

calibração, estabelecidos pelo fabricante e construtor antes da colocação em órbita.

Existem três processos de correcção:

- 1- Reposição dos valores nominalmente estabelecidos, por substituição ou reparação das componentes afectadas pelo uso e responsáveis pela alteração daqueles valores;
- 2- Inclusão de dispositivos de calibração interna no radiómetro (auto calibração, in-flight calibration);
- 3- Estabelecimento contínuo/permanente de Curvas de Calibração do radiómetro, pela análise dos valores registados por este em plena operação, quando observa "alvos" de valores radiométricos conhecidos (target calibration).

Se a impossibilidade prática da opção 1 é evidente para os radiómetros em órbita, as opiniões dividem-se quanto às vantagens e inconvenientes dos outros dois processos.

Contra a opção 2, argumentam alguns autores que os dispositivos de calibração interna(*) também se degradam no tempo, ao que é contraposto pelos seus defensores, reconhecendo embora a validade do comentário, referindo que as variações das fontes de calibração são detectáveis/mensuráveis e, em consequência, igualmente corrigíveis, acrescido da vantagem de se tratar de uma correcção inteiramente efectuada por valores obtidos pelo radiómetro, i.e., sem introdução de valores que lhe sejam exteriores, como acontece com a opção 3.

Argumentam os defensores desta última, porém, que estes inconvenientes diminuem progressivamente com o tempo, pelo maior número de valores disponíveis para o estabelecimento das correcções(**), enquanto a grande dúvida quanto ao método de auto calibração (o de se saber se foram as fontes de calibração que se deterioraram ou o radiómetro) só poderá ser esclarecida fazendo descer o

(*) - geralmente constituídas por lâmpadas e corpos negros de radiometria conhecida, estabelecida antes da colocação em órbita.

(**) - por outras palavras, as correcções assim propostas são progressivamente mais exactas, à medida que aumenta o tempo de operação do radiómetro, desde que sistematicamente "acompanhado".

radiómetro a terra e proceder à sua verificação, o que manifestamente não é realizável.

Enfim, tendo que tomar uma decisão quanto a este assunto, optou-se neste trabalho pelo método 3, justificando-se esta atitude por:

- 1- não se dispor de qualquer experiência nesta matéria; nem de dados em número suficiente (nenhum!) para a adquirir;
- 2- aplicando-se os programas aos dados CZCS CRT, estes foram sujeitos a cuidadosa análise do comportamento do radiómetro por equipas de técnicos e de especialistas no decorrer do tempo de operação do satélite NIMBUS-7, interessados que estavam no desenvolvimento de algoritmos de avaliação de parâmetros de qualidade de água com o maior rigor possível.

Um dos últimos estudos de comportamento do radiómetro CZCS de que se teve conhecimento foi apresentado em 1982 por R.W. AUSTIN, um dos membros do NET (Nimbus Experiment Team), e que fornece a seguinte relação para correcção das radiancias registadas pelo radiómetro, em função do número de órbita N (ou seja, do tempo):

$$L(\lambda, N) = L(\lambda, 0) e^{-M(\lambda)N} \quad (3-1)$$

onde:

$L(\lambda, N)$ = radiancia espectral captada durante a órbita N ;

$L(\lambda, 0)$ = radiancia espectral calculada pela curva de calibração nominal, ou seja, como se observada durante a órbita 0;

$M(\lambda)$ = coeficiente de proporcionalidade ditado pela análise de comportamento do radiómetro.

De acordo com aquele autor, os valores de $M(\lambda)$ para os 4 primeiros canais do CZCS constam do Quadro 3-II.

No 2.º Registo de Documentação e nos Registos de Dados (ver Apêndice D)

Quadro 3-II
 Coeficiente $M(\lambda)$ da Variação da Calibração do CZCS
 (AUSTIN 1982)

λ (nm)	$M(\lambda)$ ($\times E-4$)
443	0.235
520	0.145
550	0.100
670	0.018

encontram-se registados os coeficientes de calibração das curvas 'Volt vs Radiação' (designados aqui por $A_{vr}(\lambda)$ e $B_{vr}(\lambda)$) e 'Valores Digitais, DN(*), vs Volt' (designados por $A_{vdn}(\lambda)$ e $B_{vdn}(\lambda)$).

Sobre este último conjunto de valores de calibração, cabe referir que não se tratam de coeficientes de calibração (parâmetros A e B atrás citados), mas de valores em Volt correspondentes a 16 valores digitais (15, 31, 47, ..., 223, 239, 255), designados por 'Voltage Staircase'.

O cálculo dos parâmetros A e B a usar naquela última conversão, pode efectuar-se segundo um dos métodos seguintes:

- 1- Estabelecimento de uma correlação linear pelo método dos mínimos quadrados entre os 16 valores Volt ali registados e os 16 valores digitais a que correspondem (mais o par (0,0)).

Os coeficientes A e B da recta de regressão assim obtida são então os coeficientes procurados.

- 2- Estabelecimento de interpolações lineares entre os valores digitais de ordem 'i-1' e 'i' e os correspondentes valores Volt.

Os coeficientes A e B assim obtidos têm validade naquele intervalo apenas, resultando assim, 16 pares de coeficientes (há 16 intervalos) para cada

(*) - de ora em diante, representar-se-á o valor digital dos pixels pela sigla DN, Digital Number.

canal.

A Figura 3.3 ilustra esquematicamente e geometricamente estas considerações.

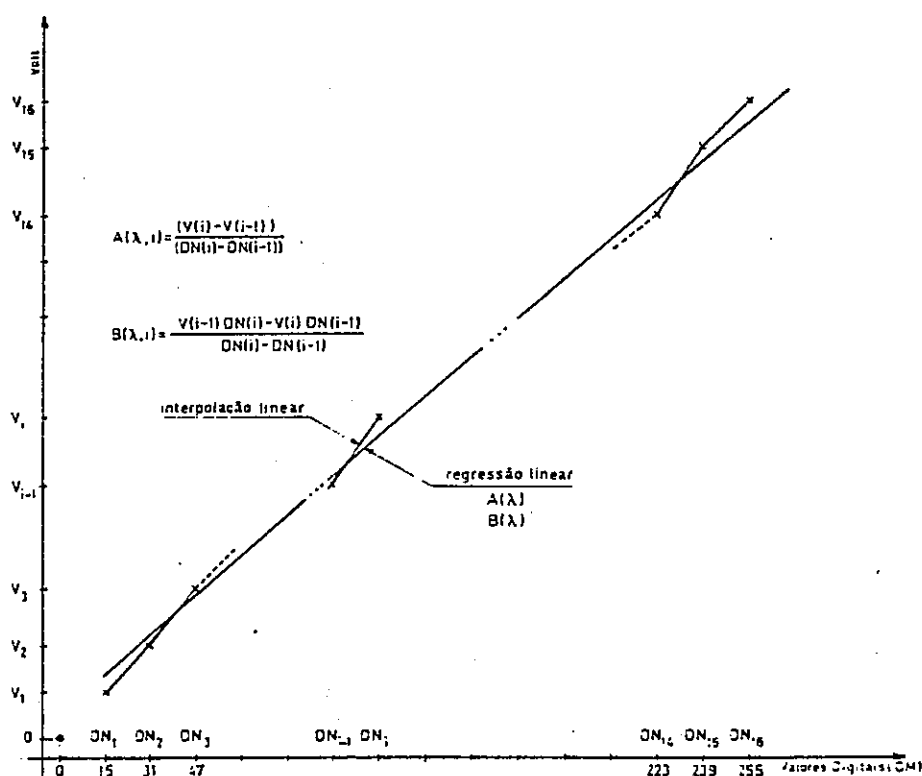


Figura 3.3
 Coeficientes de Calibração da Curva
 'Volt vs Valores Digitais DN'

Dado não se dispor de nenhuns dados para se avaliar a efectiva 'linearidade' da relação 'Volt vs. DN', nesta fase do desenvolvimento do trabalho optou-se pelo 2º processo descrito, por o erro da conversão ser menor se se considerar uma linearidade restrita (interpolação linear) em vez de uma linearidade extendida a toda a gama de valores (regressão linear).

As considerações apresentadas a propósito dos coeficientes de calibração permitem agora o cálculo dos parâmetros A e B de conversão dos DN dos pixels nas respectivas radiancias, para seu 'arquivo', conjuntamente com outros parâmetros atrás citados.

Os coeficientes procurados devem satisfazer a relação:

$$\text{Rad} = A \times DN + B \quad (3-2)$$

para cada um dos canais do CZCS.

A partir dos valores registados na banda magnética e dos ajustamentos devidos à 'degradação' no tempo sofrida pelo radiómetro (equação (3-1)), os valores A e B resultam da sequência seguinte:

$$\text{Rad} = [\text{Arv} \times \text{Volt} + \text{Brv}] e^{-MN} \quad (3-3a)$$

$$\text{Volt} = \text{Avdn} \times DN + \text{Bvdn} \quad (3-3b)$$

donde se obtém:

$$A = \text{Arv} \times \text{Avdn} \times e^{-MN} \quad (3-4a)$$

$$B = [\text{Arv} \times \text{Bvdn} + \text{Brv}] e^{-MN} \quad (3-4b)$$

3.2.3 Programas de Correção Atmosférica

Como se referiu oportunamente, a correção atmosférica destina-se a extrair do sinal captado pelo radiómetro, a componente devida à atmosfera. Por outras palavras, este conjunto de programas pretende calcular a radiancia emergente da água, por subtração da radiancia devida à atmosfera à radiancia total, e de acordo com o modelo apresentado no Capítulo anterior, representado matematicamente pelas equações (2-75a) e (2-75c) e por todas as que com estas se relacionem.

Na sequência da exposição, supor-se-á conhecido o valor numérico de alguns dos parâmetros intervenientes naquelas equações, nomeadamente o da Opacidade espectral do Ozono ($T03(\lambda)$) e da radiancia espectral Solar ($E_0(\lambda)$), considerados pois como 'dados'.

Os programas calculam o valor da radiancia emergente da água em cada pixel da imagem de um modo sequencial, desde o primeiro pixel de cada linha até ao último, e desde a primeira à última linha, num total de 512 linhas de 512 pixels cada.

Porém, a aplicação do algoritmo de correcção atmosférica exige o conhecimento da posição geográfica dos pixels observados, para a definição correcta da geometria de iluminação e de observação, como o modelo exprime, aliás. Este conhecimento só se verifica, no entanto, para alguns dos pixels de cada linha: os designados por 'pixels localizados (PL, anchor points)' dos quais se conhecem a Latitude e a Longitude.

O algoritmo de correcção atmosférica aplica-se APENAS a estes 'pixels localizados', sendo os valores atribuídos aos restantes pixels (não localizados) de cada linha, obtidos por interpolação linear (e extrapolação em alguns casos, como se verá adiante) a partir dos 'pixels localizados' que os limitam à esquerda e à direita.

Por outro lado, relembra-se que o algoritmo só é igualmente aplicado aos pixels classificados como 'água' (cujos valores digitais DN são diferentes de 0 e de 255, respectivamente atribuídos aos pixels classificados de 'continente' e de 'nuvens').

A sequência de cálculo é aqui reproduzida por um conjunto de instruções expressas numa 'pseudo-linguagem de programação' para melhor compreensão:

- Para cada linha, desde 1 até 512, de 1 em 1:
 - Procura o 1.º 'pixel localizado' PL(1), classificado como água;
 - Aplica correcção atmosférica a PL(1);
 - Para cada PL(i), a seguir a PL(1) e até ao último da linha, PL(último), de 1 em 1:
 - Verifica que PL(i) é água;
 - Aplica correcção atmosférica a PL(i);
 - Para cada pixel P(j), entre PL(i) e PL(i-1), de 1 em 1:
 - Verifica que P(j) é água;
 - Aplica correcção atmosférica a P(j) por interpolação entre PL(i) e PL(i-1);
 - Se P(j) não é água, ignora.
 - Repete o processo para o pixel seguinte;
 - Se PL(i) não é água, ignora;
- Repete o processo para o PL seguinte;
- Se o primeiro PL calculado não for o primeiro pixel da linha (pixel 1):
 - Aplica correcção atmosférica aos pixels P que forem água e que estejam à esquerda do primeiro PL calculado da linha, por extrapolação a partir dos valores deste e do PL que se segue.

- Se o último PL calculado não for o último pixel da linha (pixel 512):
 - Aplica correção atmosférica aos pixels P que forem água e que estejam à direita do último PL calculado por extrapolação a partir dos valores desta e do penúltimo PL.
- Repete o processo para a linha seguinte.

A Figura 3.4 ilustra, para uma linha senérica, a descrição do processo de cálculo e da identificação dos pixels referidos.

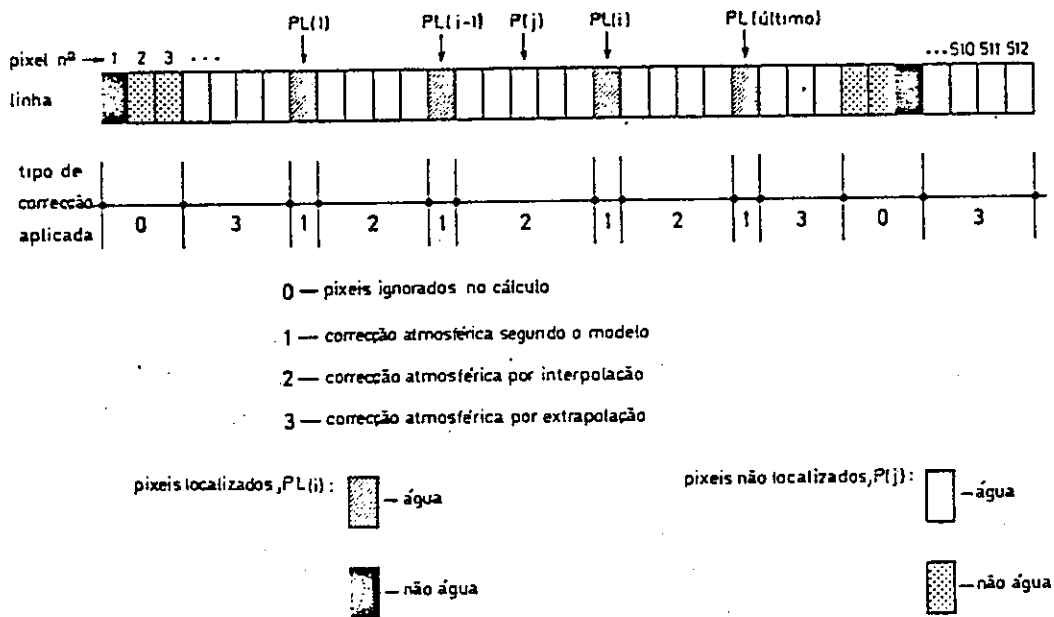


Figura 3.4
 Identificação dos Pixels de uma Linha e
 Tipo de Correção Atmosférica Aplicada

3.2.3.1 Cálculo dos Elementos Geométricos

Aplicando-se o modelo de correção atmosférica aos 'pixels localizados', PL, é necessário definir para estes a respectiva Vertical, relativamente à qual se definirão os ângulos de observação e de iluminação, θ e θ_0 , respectivamente.

A Vertical de cada um dos PLs é definida por 3 coordenadas (h_x, h_y, h_z) do vector unitário que a representa, h , num sistema de coordenadas ortonormado XYZ, com origem no centro da Terra, considerada não esférica, e orientado do seguinte modo:

- 1- o eixo X é a intersecção do plano do Equador com o plano do Meridiano do Ponto Vernal;
- 2- o eixo Y está no Equador, e é normal ao eixo anterior no sentido directo;
- 3- o eixo Z é coincidente com o eixo de rotação da Terra, orientado para o Polo Norte.

As coordenadas do Vector unitário de Vertical do pixel PL são função do raio vector que une o centro da Terra àquele pixel e das suas coordenadas geográficas (Latitude ϕ , Longitude λ). O raio vector referido é também representado no mesmo referencial pelas coordenadas (R_x , R_y , R_z).

Por considerações de ordem geométrica, que tomam em conta o Meridiano elíptico que contém o PL, a excentricidade da Terra 'e' (0,0818193, Apêndice E), e a Ascensão Recta (α) do Meridiano de Greenwich durante o período de observação(*), obtém-se:

$$R_x = k \cos(\phi) \cos(\lambda + \alpha) \quad (3-5a)$$

$$R_y = k \cos(\phi) \sin(\lambda + \alpha) \quad (3-5b)$$

$$R_z = k (1 - e^2) \sin(\phi) \quad (3-5c)$$

com 'k' dado por:

$$k = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\phi)}} \quad (3-5d)$$

sendo 'a' o raio equatorial da Terra (6378,214Km, Apêndice E).

As coordenadas do vector unitário são então dadas por:

(*) - No Registo de Localização (Apêndice D, Quadro D-VI), a Ascensão Recta de Greenwich é registada em 3 instantes (no máximo) durante o período de observação (refa. G1, repetida nas refas. M1 e N1); no instante inicial e em cada um dos 2 minutos seguintes.

$$h_x = \frac{R_x}{\sqrt{(1-e^2)^2 (R_x^2 + R_y^2) + R_z^2}} (1-e^2) \quad (3-6a)$$

$$h_y = \frac{R_y}{\sqrt{(1-e^2)^2 (R_x^2 + R_y^2) + R_z^2}} (1-e^2) \quad (3-6b)$$

$$h_z = \frac{R_z}{\sqrt{(1-e^2)^2 (R_x^2 + R_y^2) + R_z^2}} \quad (3-6c)$$

De referir que a Ascensão Recta (α) de Greenwich que figura nas expressões (3-5a) e (3-5b) é variável durante o período de observação, (≈ 2 minutos) devido ao movimento de rotação da Terra; embora essa variação seja pequena (figura 3.5).

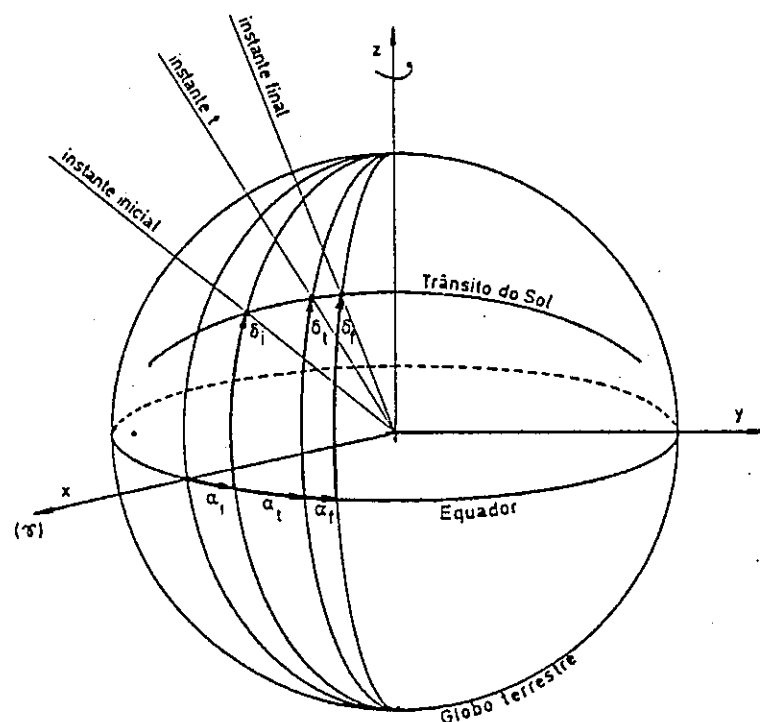


Figura 3.5

Posições do Sol e do Meridiano de Greenwich
Durante os 2 Minutos de Observação da Cena

Para contemplar esta variação, admite-se que a velocidade de rotação da Terra é constante entre os instantes inicial e final de observação, pelo que, conhecidos estes e os valores angulares daquela coordenada equatorial em Greenwich referentes àqueles instantes, pode calcular-se o valor que a Ascensão Recta toma em qualquer instante intermédio.

Aliás, esta hipótese é mantida para um conjunto de outros parâmetros geométricos a descrever na sequência.

Se forem 't_i' e 't_f' os instantes inicial e final, e 'α_i' e 'α_f' os correspondentes valores da Ascensão Recta em Greenwich, tem-se que a Ascensão Recta (α) em qualquer instante intermédio (t) é dada por:

$$\alpha = \alpha_i + k_t (\alpha_f - \alpha_i) = \alpha_i + \left[\frac{t - t_i}{t_f - t_i} \right] (\alpha_f - \alpha_i) \quad (3-7)$$

onde se evidenciou o coeficiente 'k_t' dada a frequente utilização de que será alvo em outros cálculos.

Definida a normal ao 'pixel localizado', PL, segue-se-lhe o cálculo dos ângulos de observação, de iluminação e da função de fase P(θ, θ₀).

Para este efeito, e para cada PL, é necessário definir os vectores de posição do Sol e do satélite e os vectores de iluminação e de observação.

i- Cálculo do vector de posição do Sol:

Sejam 'SolP_i' e 'SolP_f' os vectores de posição do Sol nos instantes 't_i' e 't_f' respectivamente. O vector de posição do Sol 'SolP_t' em qualquer instante 't' entre aqueles dois instantes é dado por:

$$\text{SolP}_t = \text{SolP}_i + k_t [\text{SolP}_f - \text{SolP}_i] \quad (3-8)$$

onde 'k_t' tem o valor anteriormente definido.

O cálculo das coordenadas cartesianas (no sistema XYZ atrás definido) é efectuado a partir dos valores conhecidos das coordenadas do Sol nas 'posições' inicial e final. Estas são calculadas a partir das coordenadas Equatoriais (Ascensão Recta e Declinação) do Sol, registadas na banda magnética (Apêndice D; Quadro D-VI, referência II, repetida nas referências M1 e N1).

As coordenadas do vector de posição unitário do Sol em qualquer dos instantes inicial e final, em função das coordenadas Equatoriais dadas, são:

$$\hat{\text{SolP}}_x = \cos(\delta_{\text{Sol}_i}) \cos(\alpha_{\text{Sol}_i}) \quad (3-9a)$$

$$\hat{\text{SolP}}_y = \cos(\delta_{\text{Sol}_i}) \sin(\alpha_{\text{Sol}_i}) \quad (3-9b)$$

$$\widehat{\text{SolP}}_z = \text{sen}(\delta_{\text{sol}}) \quad (3-9c)$$

com 'u' significando 'instante inicial' ou 'instante final'.

O vector de posição unitário do Sol em qualquer instante 't' obtém-se por substituição adequada das expressões (3-9) na expressão (3-3) e calculando-se seguidamente:

$$\widehat{\text{SolP}}_c = \frac{(\widehat{\text{SolP}}_i)_c}{|\widehat{\text{SolP}}_i|} \quad (3-10)$$

em que o índice 'c' representa cada uma das coordenadas x, y ou z.

2- Cálculo do vector de posição do satélite:

A semelhança do cálculo da posição do Sol em cada instante, o vector de posição do satélite é também calculado em função das posições que ocupa nos instantes inicial e final, cujos valores constam também na banda magnética (Apêndice D, Quadro D-VI, referência F1, repetida nas referências M1 e N1).

Porém, contrariamente às coordenadas dadas do Sol, as coordenadas disponíveis do satélite são já coordenadas cartesianas inerciais, SatP_x, SatP_y, SatP_z.

Para o cálculo do vector de posição do satélite e do seu vector unitário em cada instante, pode supor-se que ambos são determinados por uma combinação linear das posições ocupadas nos instantes inicial e final:

$$\text{SatP}_i = A \text{SatP}_i + B \text{SatP}_f \quad (3-11a)$$

$$\widehat{\text{SatP}}_i = a \widehat{\text{SatP}}_i + b \widehat{\text{SatP}}_f \quad (3-11b)$$

$$|\widehat{\text{SatP}}| = (1-k_i) |\widehat{\text{SatP}}_i| + k_i |\widehat{\text{SatP}}_f| \quad (3-11c)$$

em que 'a', 'b', 'A' e 'B' são coeficientes dados por:

$$a = \frac{\text{sen}(\varepsilon - \delta)}{\text{sen}(\varepsilon)} \quad (3-12a)$$

$$b = \frac{\sin(\delta)}{\sin(\epsilon)} \quad (3-12b)$$

$$A = \frac{\epsilon - \delta}{\epsilon} \quad (3-12c)$$

$$B = \frac{\delta}{\epsilon} \quad (3-12d)$$

onde ' ϵ ' e ' δ ' são os ângulos definidos pelos vectores de posição nos instantes final e inicial e nos instantes ' t ' e inicial, respectivamente (figura 3.6).

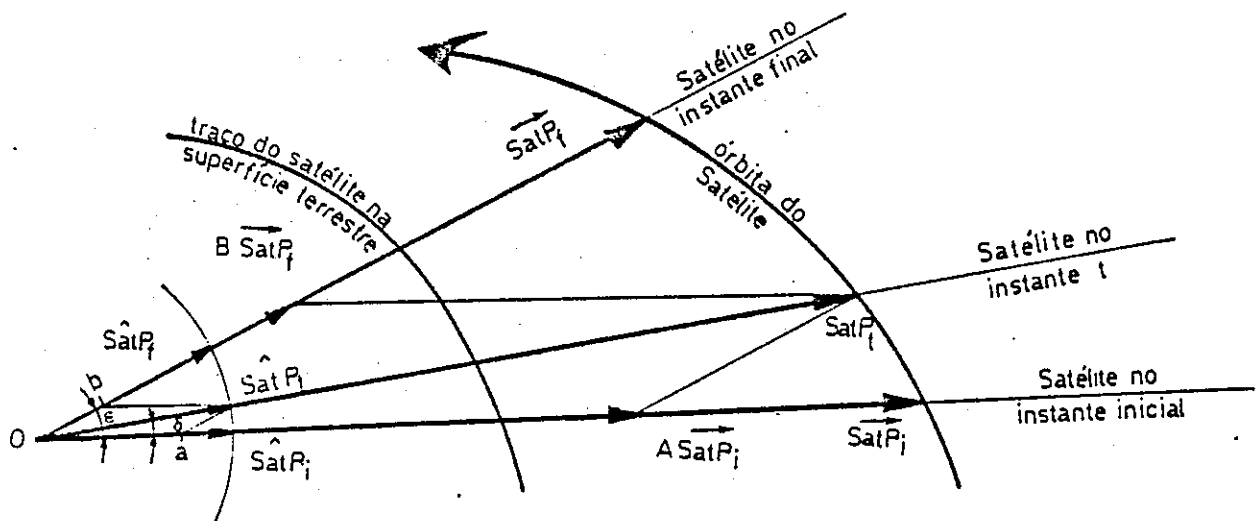


Figura 3.6

Geometria das Posições Ocupadas pelo Satélite

Conhecidas as coordenadas dos vectores nos instantes inicial e final, $(\text{SatP}_{ix}, \text{SatP}_{iy}, \text{SatP}_{iz})$ e $(\text{SatP}_{fx}, \text{SatP}_{fy}, \text{SatP}_{fz})$, o ângulo ' ϵ ' é dado pelo produto interno desses vectores:

$$\epsilon = \arccos(\text{Sat}\vec{P}_i \cdot \text{Sat}\vec{P}_f) \quad (3-13a)$$

e o ângulo ' δ ', entre as posições nos instantes ' t ' e ' t_i ', dado por:

$$\delta = k, \varepsilon$$

(3-13b)

em que se admite que a órbita do satélite é aproximadamente circular, descrita com velocidade constante entre os instantes extremos (inicial e final).

As coordenadas do vector unitário de posição do satélite no instante 't' são finalmente dadas por:

$$(\widehat{\text{SatP}})_x = a(\widehat{\text{SatP}}_i)_x + b(\widehat{\text{SatP}}_f)_x \quad (3-14a)$$

$$(\widehat{\text{SatP}})_y = a(\widehat{\text{SatP}}_i)_y + b(\widehat{\text{SatP}}_f)_y \quad (3-14b)$$

$$(\widehat{\text{SatP}})_z = a(\widehat{\text{SatP}}_i)_z + b(\widehat{\text{SatP}}_f)_z \quad (3-14c)$$

3- Cálculo do vector de iluminação dos 'pixels localizados, PL':

Dado que o raio médio da Terra é consideravelmente menor que a distância Terra-Sol, pode admitir-se que o vector de iluminação dos pixels PL, $\vec{\text{SolI}}$, é coincidente com o vector de posição do Sol, $\vec{\text{SolP}}$. Corresponde pois esta hipótese, a considerar que os raios luminosos são todos paralelos entre si e paralelos à direcção do vector de posição do Sol.

De facto, o caso mais desfavorável que invalidasse esta hipótese corresponderia à situação de um 'pixel localizado' iluminado segundo a Paralaxe Geocêntrica Horizontal do Sol (isto é, aproximadamente ao nascer ou ao pôr do Sol), ângulo que é aproximadamente igual a 8.78 segundos de arco. Por outras palavras, neste caso, considerado o mais desfavorável, o erro cometido em considerar o vector de iluminação paralelo ao vector de posição do Sol é somente de 8.78 segundos de arco.

4- Cálculo do vector de observação do 'pixel localizado PL':

O vector de observação de cada 'pixel localizado' é dado pela diferença vectorial entre os vectores de posição do satélite ($\vec{\text{SatP}}$) e do pixel PL ($\vec{\text{R}}$), equações (3-5):

$$\vec{Obs} = \text{Sat} \vec{P} - \vec{R}$$

(3-15)

Nesta fase do cálculo, estes dois vectores são já conhecidos, por terem sido calculados em fases anteriores. Interessará, contudo, obter o vector de observação, \hat{Obs} , para, em conjunto com a Vertical do pixel PL, \hat{h} , e o vector unitário de iluminação, \hat{Sol} , definirem os ângulos θ e θ_0 , respectivamente, o que é trivial.

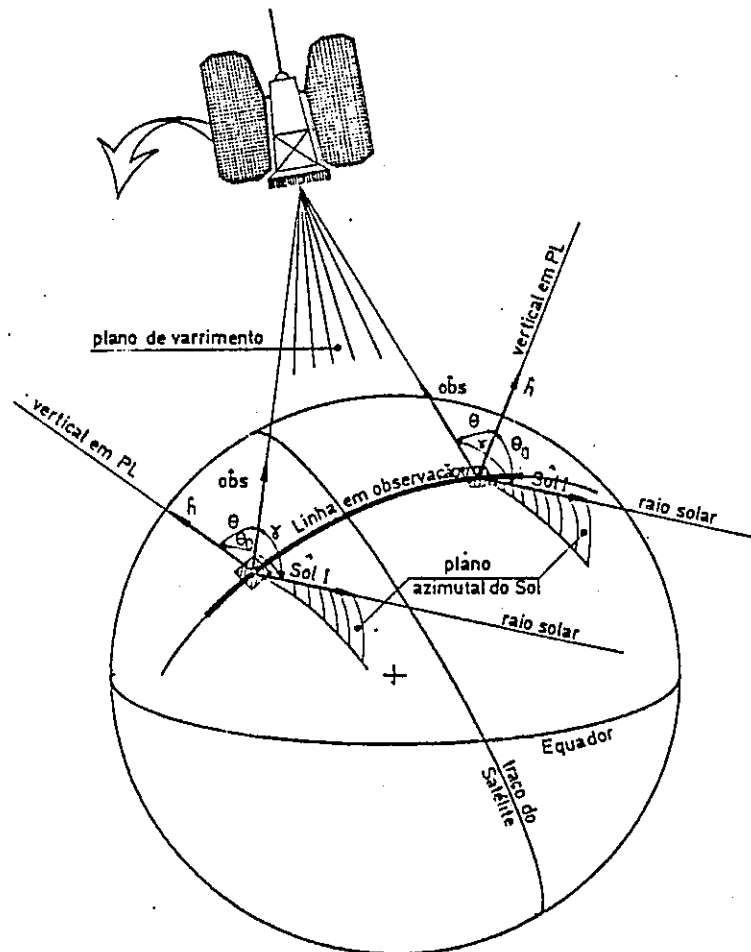


Figura 3.7

Geometria de Iluminação e de Observação
dos Pixels Localizados, PL

5- Cálculo do ângulo zenital solar, θ_0 , nos pixels localizados:

Em cada 'pixel localizado' são conhecidas as orientações de 3 vectores unitários básicos para a definição da geometria angular necessária ao prosseguimento do cálculo: os ângulos zenitais de iluminação e de observação, e o ângulo da função de fase $\rho(\theta, \theta_0)$. Os 3 vectores unitários são (Figuras 3.7 e 3.8):

- a) Vertical (ou Normal) ao pixel PL, \hat{h} ;
- b) Iluminação solar no pixel PL, $\hat{S}_{0I} = \hat{S}_{0IP}$;
- c) Observação do pixel PL, \hat{O}_{bs} .

O ângulo zenital solar é então definido pelo produto interno dos vectores unitários \hat{h} e \hat{S}_{0I} :

$$\cos(\theta_0) = \hat{h} \cdot \hat{S}_{0I} \quad (3-16)$$

As coordenadas daqueles vectores são dadas pelas equações (3-6) e (3-10).

6- Cálculo do ângulo zenital de observação, θ , nos "pixels localizados":

De igual modo, o ângulo zenital de observação é definido pelo produto interno dos vectores \hat{h} e \hat{O}_{bs} :

$$\cos(\theta_0) = \hat{h} \cdot \hat{O}_{bs} \quad (3-17)$$

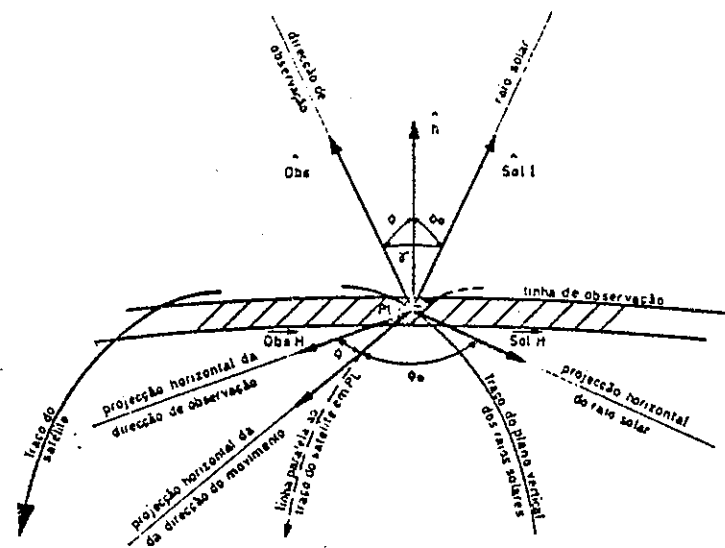
7- Cálculo do ângulo da função de fase:

O ângulo da função de fase é, em termos gerais, o ângulo entre as direcções de observação e de iluminação e, portanto dado pelo produto interno dos vectores unitários daquelas 2 direcções. No entanto, no processo de correcção atmosférica, há que considerar os efeitos da difusão durante os percursos descendentes e ascendentes, tal como expressos pelas equações (2-71) e (2-72).

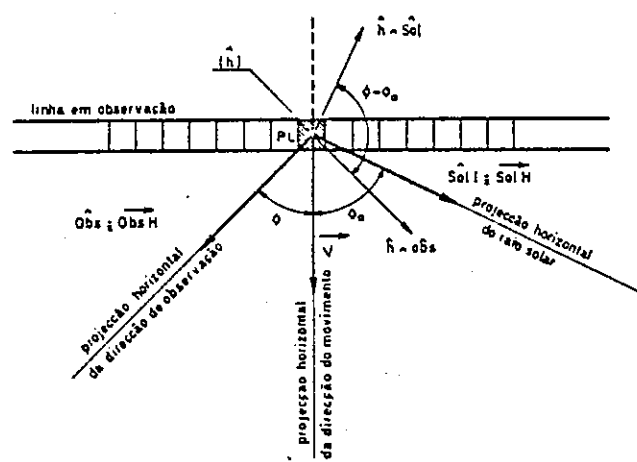
Nestas últimas, os cosenos dos ângulos da função de fase daqueles percursos da radiação incidente e reflectida são função dos ângulos azimutais relativos das direcções incidente e reflectida, θ_0 e θ , respectivamente.

Assim, o cálculo do ângulo da função de fase que agora se opera, diz antes respeito ao cálculo daqueles ângulos azimutais para, em conjunto com os ângulos zenitais atrás calculados intervirem nas expressões (2-72d) e (2-72e).

Porém, a menos que se pretenda individualizar os valores de θ_0 e de θ , a geometria de iluminação e de observação (figura 3.8) permite o cálculo do ângulo $\theta - \theta_0$, azimute relativo daquelas duas direcções:



a) em perspectiva



b) projecção sobre o plano horizontal

Figura 3.8

Definição do Ângulo Azimutal Relativo $\theta - \theta_0$ em PL

$$(\text{Obs}\hat{H}) \cdot (\text{Sol}\hat{H}) = \text{sen}(\theta) \text{sen}(\theta_0) \cos(\phi - \phi_0) = (\hat{h} \wedge \hat{\text{Obs}}) \cdot (\hat{h} \wedge \hat{\text{Sol}}) \quad (3-18)$$

onde $\vec{\text{ObsH}}$ e $\vec{\text{SolH}}$ são os vectores correspondentes às projecções sobre o plano horizontal do pixel PL (Horizonte respectivo) dos vectores unitários de observação, $\hat{\text{Obs}}$, e de iluminação, $\hat{\text{Sol}}$. No último membro da expressão acima, representa-se o produto interno entre os vectores resultantes dos produtos externos do vector unitário Vertical do pixel PL, \hat{h} , pelo de observação, $\hat{\text{Obs}}$ e pelo de iluminação, $\hat{\text{Sol}}$ (figura 3.8b).

Poderia ser-se tentado a explicitar o valor do $\cos(\theta - \theta_0)$ na expressão

(3-18), mas repare-se que não é necessário porquanto, todo o termo central daquela expressão constitui uma das parcelas das expressões (2-72d) e (2-72e). Deste modo, não só se ganha tempo de cálculo como não é necessário verificar as condições de anulamento do denominador que resultariam (θ ou θ_0 iguais a zero).

Está pois terminada toda a fase de cálculo dos elementos 'geométricos' intervenientes no processo de correção atmosférica. Segue-se-lhe o cálculo de correção atmosférica propriamente dita, pela aplicação do modelo apresentado no Capítulo anterior.

3.2.3.2 Cálculo da Radiação de Rayleigh

Consiste este cálculo na aplicação da expressão (2-71), a cada um dos 4 comprimentos de onda do radiómetro CZCS: 440, 520, 550 e 670nm.

Antes de se iniciar o 'cálculo espectral', convém calcular os parâmetros intervenientes naquela expressão que 'não dependem' do comprimento de onda. São estas as Reflectividades difusas 'de iluminação' e 'de observação', $\rho(\theta_0)$ e $\rho(\theta)$, e as funções de fase referentes aos percursos ascendente e descendente. Este cálculo, porém, resume-se à aplicação das expressões (2-73) e (2-72), respectivamente, nas quais todos os factores são conhecidos, pelo que não é aqui detalhado, por menos interesse.

1- Cálculo da Opacidade de Rayleigh:

A Opacidade de Rayleigh ou molecular é dada pela expressão (STURN 1981):

$$\tau_R(\lambda) = 0.00879 \lambda^{-4.09} \quad (3-19)$$

2- Cálculo da Transmissividade de Rayleigh:

Este parâmetro é dado pela expressão:

$$T_R(\lambda, \theta) = e^{-\frac{1}{\cos(\theta)} \tau_R(\lambda)} \quad (3-20)$$

3- Cálculo da Transmissividade equivalente à absorção do Ozono:

É a expressão (2-66) que permite o cálculo deste parâmetro. Para tal é necessário conhecer o valor da Opacidade espectral do Ozono, $\tau_{O3}(\lambda)$, obtida de tabelas. No decorrer da execução, o utilizador tem, no entanto, oportunidade de alterar os valores que o programa assume para este parâmetro.

4- Cálculo da Irradiância espectral solar no topo da atmosfera:

Como se sabe, a Irradiância solar incidente no topo da atmosfera é variável ao longo do ano, devido ao movimento da Terra na sua órbita. Esta variação pode ser expressa em função da constante Solar espectral, nos 4 comprimentos de onda considerados no cálculo, pela expressão:

$$E_o(\lambda) = \bar{E}_o \left[1 + 0.0167 \cos\left(\frac{2\pi}{365} [d-3]\right) \right]^2 \quad (3-21)$$

em que 'd' é o dia Juliano da data de observação da imagem.

Os valores de $E_o(\lambda)$ estão também tabelados e no programa são considerados os seguintes: 182.3, 186.7, 186.9, 153.6 mW/cm²/um, respectivamente em 440, 520, 550 e 670nm.

Quanto ao dia Juliano, ele é calculado a partir da data de observação da imagem através de um conjunto de subrotinas desenvolvidas para o efeito.

3.2.3.3 Cálculo do Coeficiente de Proporcionalidade, $K(\lambda_i, \lambda_o)$

Este cálculo também não ofereceu dificuldades de maior, porquanto se refere à aplicação da equação (2-75c), da qual são conhecidos todos os parâmetros.

3.2.3.4 Conversão dos Valores Codificados das Radiações Captadas pelo Radiómetro

Pela aplicação das curvas de calibração a cada um dos "pixels localizados" identificados como 'águas', é possível agora obter os valores da radiação espectral captada pelo radiómetro, $L(\lambda)$, e que constam na expressão da radiação emergente da água.

3.2.3.5 Cálculo da Transmissividade Atmosférica Total

Este é o coeficiente que traduz a 'perda' do sinal proveniente da reflexão difusa da água na sua propagação através da atmosfera, em direcção ao radiómetro. É dada pela expressão (2-55):

$$T(\lambda, \theta) = e^{-\frac{1}{\cos(\theta)} [0.5 \tau_R(\lambda) + 0.07 \tau_A(\lambda) + \tau_O(\lambda)]} \quad (3-22)$$

onde também são já conhecidos os valores dos parâmetros nela intervenientes.

3.2.3.6 Cálculo da Radiação Emergente da Água

Nesta altura do processamento, chega-se finalmente ao cálculo das radiações emergentes da água em cada um dos comprimentos de onda de trabalho.

Porém, as equações que as exprimem constituem um sistema indeterminado, como se viu no Capítulo anterior, podendo ser traduzida pela expressão genérica:

$$L_w(\lambda) = A(\lambda) + B(\lambda) L_w(\lambda_0) \quad (3-23)$$

onde A e B são parâmetros conhecidos, calculados em passos anteriormente descritos.

A indeterminação do sistema é 'levantada' com recurso a uma equação 'exterior' ao processo de transmissão da radiação até ao radiómetro, obtida a partir de ensaios experimentais.

No Capítulo anterior apresentaram-se algumas dessas equações (2-74), tendo-se referido dar-se preferência neste trabalho ao modelo de SMITH e WILSON 1981:

$$L_w(670) = 0.0829 L_w(440) \left[\frac{L_w(440)}{L_w(550)} \right]^{-1.661} \quad (3-24)$$

No entanto, o sistema agora 'acrescentado' com a equação (3-24), embora determinado, é não linear, pelo que a sua resolução se tem de fazer de forma iterativa.

O processo consiste em supor, de início, que a radiancia emergente da água no comprimento de onda $\lambda_0=670\text{nm}$ é, de facto nula, como proposto no modelo de GORDON 1978.

Com esta hipótese, ficam automaticamente calculados os valores das radiancias emergentes nos restantes comprimentos de onda, $\lambda_1=440$, $\lambda_2=520$ e $\lambda_3=550\text{nm}$.

A substituição dos valores das radiancias assim estimadas na equação (3-24) permite a obtenção de um novo valor para a radiancia da água em $\lambda_0=670\text{nm}$, necessariamente diferente do inicialmente estimado ($L_w(\lambda_0)=0$).

Este valor é agora introduzido nas equações (3-23) de onde se obtêm novos valores $L_w(\lambda)$, prosseguindo o processo até que a diferença entre dois valores de $L_w(\lambda_0)$, obtidos em iterações sucessivas, seja inferior a um erro predeterminado.

No programa elaborado, entendeu-se fixar este erro máximo do processo de iteração ao valor da radiancia que, no comprimento de onda de 670nm , corresponde a uma diferença de 1 unidade digital (1 bit, ou 1 unidade DN, veja-se 3.2.2.5). Este valor corresponde simultaneamente ao valor da sensibilidade do radiómetro nesta banda espectral (valor mínimo radiométrico que o aparelho é capaz de detectar, também designado por Noise Equivalent Differential Temperature, NE Δ T) e ao valor da resolução radiométrica, justificando-se pois a sua escolha.

3.2.3.7 Cálculo da Radiancia da Água nos Pixeis não Localizados

Como se viu oportunamente, o algoritmo de correcção atmosférica tal como descrito atrás pelas equações (2-75) aplica-se somente aos "pixeis localizados PL", de cada linha observada, pela necessidade de definição dos parâmetros geométricos que neles participam, só possível naqueles pixeis.

Nos restantes, intercalados entre os "pixeis localizados" e situados aquém e para além do 1.º e do último "pixel localizado" de cada linha, respectivamente, os valores das radiancias emergentes são obtidos por interpolação ou extrapolação lineares a partir dos valores dos "pixeis localizados" que lhes ficam mais próximos.

O processo é simplificado, pois os valores codificados das radiancias nestes "pixeis não localizados" são directamente transformados em radiancias

emergentes da água sem passarem pelo processo correctivo atrás apresentado para os 'pixels localizados'.

O algoritmo é bastante simples, como se descreve de seguida. Seja I1 o número de ordem de um 'pixel localizado, PL', na linha em que se está a processar o cálculo, e I2 o número de ordem do PL imediatamente seguinte ao anterior, ambos válidos, i.e., ambos classificados como 'água', independentemente de entre eles poderem existir outros PLs mas cuja presença não é considerada por não serem classificados como 'água'.

A radiancia emergente para os pixels P(j), com 'j' variando de I1+1 até I2-1 é dada por:

$$L_w(\lambda, j) = L_w(\lambda, I_1) + \left[\frac{j - I_1}{I_2 - I_1} \right] [L_w(I_2) - L_w(I_1)] \quad (3-25)$$

De referir que o quociente da 2a. parcela do 2o. membro da equação acima tem que ser realizado no domínio dos Reais, apesar das variáveis nele intervenientes serem Inteiras. Se esta condição não for satisfeita, a 2a. parcela do 2o. membro será sempre nula para todos os valores de j, pois o resultado daquela divisão inteira será nulo (numerador inferior ao denominador).

A expressão é ainda utilizada no caso das extrapolações mencionadas (ver figura 3.4), alterando-se somente o valor do índice de 'j' nas situações de extrapolação para aquém de PL(I1), em que se iniciará com o valor da ordem do 1o pixel classificado como 'água' na linha (eventualmente 1), e de extrapolação para além do PL(último), em que terminará com o valor da ordem do último pixel da linha classificado como 'água' (eventualmente 512).

3.2.3.8 Cálculo da Irradiação

Como se viu no Capítulo 2, o modelo de quantificação das suspenções na água a partir dos dados de satélite faz uso da Reflectância. Esta é, por definição, o quociente entre a energia reflectida e a energia incidente. Calculada a energia refletida, $L_w(\lambda)$, em cada pixel, há que calcular, para cada pixel também, a energia incidente para se obter, finalmente, o valor da Reflectância.

Contrariamente ao que se passa com os dados MSS dos satélites LANDSAT (ou outros de resolução geométrica semelhante), no processamento dos dados CZCS do

satélite NIMBUS-7, a Irradiância incidente no conjunto dos pixels que constituem a imagem a processar, é variável no espaço, (de pixel para pixel), dada a maior extensão geográfica coberta, em que a curvatura da superfície terrestre já não é desprezável. Significa pois que, em simultâneo com o cálculo do valor de Radiação emergente de cada pixel, efectuado em função da posição geográfica em que se encontra, terá que ser calculada a respectiva Irradiância.

Porém, este cálculo é agora simplificado, na medida em que, completado o processo de correcção atmosférica, a radiação incidente é exclusivamente devida à radiação directa. De facto, não faria sentido incluir a radiação difusa incidente, uma vez que esta acaba de ser "retirada" do sinal captado. Desta modo, a radiação incidente em cada "pixel localizado, PL" é dada por:

$$L_{inc}(\lambda) = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} T' = \frac{E_o(\lambda)}{\pi} e^{-\frac{1}{\cos(\theta_0)}} [0.5 \tau_R(\lambda) + 0.07 \tau_A(\lambda) + \tau_{O_3}(\lambda)] \quad (3-26)$$

onde τ_R , τ_A e τ_{O_3} são já conhecidos e dados pelas expressões (3-19), (2-58) e no quadro A-II. O ângulo θ_0 é o ângulo zenital solar obtido pela expressão (3-16), de incidência dos raios solares em cada PL.

O valor da Irradiância nos pixels interpostos entre os PLs é também calculado por interpolação (e extrapolação), de acordo com o exposto anteriormente (equação 3-25).

3.2.3.9 Cálculo da Reflectância

O valor da Reflectância em cada pixel é agora obtido pelo quociente entre as radiações emergentes (ou reflectidas) e as incidentes:

$$\rho(\lambda) = \frac{L_w(\lambda)}{L_{inc}(\lambda)} \quad (3-27)$$

3.2.3.10 Constituição dos Ficheiros Corridos

Dada a estrutura modular com que o 'Programa' foi concebido, é necessário 'arquivar' o resultado alcançado nesta fase da execução.

Como se verá mais adiante em 'Modo de Operação', recorda-se aqui com brevidade a sequência geral dos passos descritos até ao presente:

- 1- identificação e escolha da imagem;
- 2- selecção da zona da imagem a processar;
- 3- aplicação do algoritmo de correcção atmosférica.

Seguem-se-lhe, naturalmente, a 'aplicação do algoritmo de cálculo de suspensões e apresentação de resultados' (módulo 4, na esquematização acima).

Como se tem vindo a referir, esta organização ou estrutura do 'Programa' é, em grande parte, condicionada pelo equipamento disponível.

De facto, estima-se que, desde que o utilizador inicia a execução, pela identificação da imagem a processar (módulo 1), até que obtenha os resultados, decorram 3 a 4 horas de cálculo, dependendo do maior ou menor número de pixels a 'ignorar' (por serem 'continentes' e/ou 'nuvens', reduzindo o número total de pixels). E, seguramente, tempo demasiado para se aguardar pacientemente que o cálculo termine. Por outro lado, limitações de ordem variada dos equipamentos ou acidentes imprevisíveis, levam a que se enverede por um estilo de programação que 'defenda' o utilizador destes imprevistos, evitando-lhe gastos de tempo adicionais a repetir TODA a execução efectuada até à ocorrência infeliz de um 'acidente'.

E pelo 'arquivo' de resultados parciais, adequadamente seccionados e identificados, que se consegue atingir este objectivo. Assim, qualquer que seja o motivo da interrupção, o cálculo poderá prosseguir a partir do último módulo executado.

Esta é uma das razões que levam ao 'arquivo' dos resultados obtidos nesta fase de cálculo: Reflectâncias espectrais de todos os pixels válidos (ásua) da imagem.

Antes de descrever o processo de 'arquivo' destes resultados, ou de

constituição dos respectivos ficheiros em disco, são pertinentes as seguintes considerações.

Os dados disponíveis para o utilizador, pela aquisição de uma imagem em banda magnética, referem-se a Radiações reflectidas pela superfície terrestre (e pela atmosfera interposta, nuvens inclusivé) quando iluminada pelo Sol. Os dados resultantes do processo de correcção atmosférica, tal como acabou de descrever, referem-se a Reflectâncias, conceito diferente de Radiações. O arquivo destes resultados não permite pois uma comparação directa com os dados iniciais (para se avaliar a eficácia do processo correctivo, p.ex.), por terem significados físicos diferentes, como é óbvio.

Esta impossibilidade, no caso dos dados CZCS, resulta de a Irradiância solar (a partir da qual se calculam as Reflectâncias), variar no espaço delimitado pela zona em estudo, por não ser constante a inclinação dos raios solares relativamente à vertical dos "pixels localizados". Esta situação já não acontece, p.ex., com os dados de radiómetros de resolução geométrica mais fina (MSS e TM, dos satélites LANDSAT; HRV, do satélite SPOT), pois se admite que, para a extensão geográfica coberta, a curvatura da superfície terrestre é desprezável, e, em consequência, se poder considerar, sem erro apreciável, que os raios solares têm a mesma inclinação relativamente às verticais de todos os pixels (da "classe" 'ésua'), as quais seriam todas paralelas entre si.

Neste caso, o cálculo das Reflectâncias consistiria apenas na divisão das Radiações corrigidas de todos os pixels por uma constante, a Irradiância solar de toda a imagem, pelo que o arquivo dos resultados parciais (após o processo de correcção atmosférica) se referiria às Radiações, e não às Reflectâncias, sendo estas calculadas facilmente em passo posterior.

Com os dados CZCS, aos quais se aplica o presente trabalho, o processo de 'arquivo' em disco dos resultados parciais é necessariamente mais 'complicado', porquanto o sistema disponível não permite, na actual configuração, que os programas acessem a mais do que 8 (oito) ficheiros simultaneamente, quer para leitura (dos dados), quer para escrita (dos resultados). Este número é imediatamente atingido no próprio cálculo da correcção atmosférica.

De facto, relembra-se que: este cálculo se realiza sobre 4 bandas espectrais (logo, 4 ficheiros de dados a serem acesidos); o processo se desenvolve "linha a linha" e, em cada linha, "pixel a pixel", resultando para cada "linha DADO" uma "linha RESULTADO", em 4 bandas espectrais (as mesmas originais, mas MAIS 4

ficheiros de resultados, acedidos em simultâneo com os 4 anteriores, mas para 'escrita/arquivo'. Haverá pois que decidir 'o que arquivar/guardar', se as Radiâncias $L(\lambda)$, se as Reflectâncias, $\rho(\lambda)$.

A decisão é tomada pelo utilizador, no final do cálculo da correcção atmosférica (módulo 3), como se explicita no parágrafo sobre 'Modo de Operação'.

O critério a adoptar pelo utilizador deve basear-se nos objectivos pretendidos. De facto, entendeu-se ser útil que este conjunto de programas de cálculo das suspensões da água do mar por dados de detecção remota não só o fizesse a partir do algoritmo que neste trabalho se propõe, como através de algoritmos propostos por outros autores, alguns dos quais se apresentaram no final do Capítulo anterior. Tem-se, assim, a possibilidade de obter resultados comparáveis, e deste modo, ajuizar-se da validade dos modelos nas regiões do Globo em estudo. Mas, alguns dos modelos de cálculo são baseados nas Radiâncias, outros nas Reflectâncias. O modelo proposto neste trabalho é baseado nas Reflectâncias.

A decisão do utilizador é pois tomada em face do modelo de cálculo que pretende seguir, e assim, serão arquivadas Reflectâncias ou Radiâncias corrigidas.

Embora este seja o factor mais importante a tomar em conta na decisão de 'arquivar O QUE', um outro se prende com este, embora exterior ao utilizador.

Como se referiu oportunamente, os dados originais são registados sob forma codificada, segundo números inteiros variando em geral entre 0 e 255 (codificação em 8 bits), obtendo-se o valor real da grandeza (Radiância) através de Curvas de Calibração e dos respectivos Parâmetros.

No processo de 'arquivo' dos resultados da correcção atmosférica, passa-se o inverso, isto é, os valores reais resultantes terão que ser codificados 'de novo' para serem 'arquivados/registados' como Inteiros variando naquela gama, mantendo-se, assim, compatibilidade de aplicação destes resultados a outros programas de processamento digital de imagens. Consoante os valores a constituir em ficheiro se referem a Radiâncias ou a Reflectâncias, assim se aplicarão 'Curvas de Calibração' inversas, de Radiâncias ou Reflectâncias, necessariamente diferentes.

Se o utilizador se decidir por um modelo baseado em Radiâncias, então a

conversão dos valores reais das Reflectâncias em valores inteiros codificados é executada pela aplicação da expressão (3-2) em sentido inverso, a partir dos valores A e B conhecidos:

$$DN = \frac{1}{A} \text{Rad} - \frac{B}{A} \quad (3-28a)$$

De referir, no entanto, a necessidade de introduzir pequenos ajustamentos à expressão acima indicada, visto o resultado ser inteiro, proveniente de um cálculo efectuado com variáveis reais. O arredondamento automático efectuado pelo computador na correcção de reais para inteiros, introduz erros sistemáticos que se traduzem pela obtenção de valores inteiros sempre inferiores aos reais de que provêm: o maior Inteiro que não excede o Real. Numa tentativa de compensação destes erros, é usual considerar-se uma função que arredonda para o Inteiro mais próximo do Real resultante do 2o. membro da expressão, traduzida esquematicamente por:

$$DN = \text{INTEIRO} \left(\left(\frac{1}{A} \text{Rad} - \frac{B}{A} \right) + 0.5 \right) \quad (3-28b)$$

Se o utilizador se decidir por 'arquivar' as Reflectâncias, não se dispõe, à partida, de nenhuns parâmetros de calibração, nem tão pouco das respectivas 'Curvas de Calibração' a inverter. Há pois que construir uma.

Dois critérios podem ser seguidos neste caso. Um primeiro critério, que se poderia designar de 'relativo', faria corresponder linearmente todos os valores de Reflectâncias calculados a uma 'escala de valores DN' entre 1 e 254(*), de acordo com a relação:

$$DN = 1 + 253 \left[\frac{\rho - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \right] \quad (3-29)$$

sendo Rmin e Rmax os valores das Reflectâncias mínimas e máximas encontradas no final do cálculo, em cada banda espectral.

Porém, este critério não oferece vantagens, pelas seguintes razões:

 (*) - relembra-se que o 0 (zero) e 255 estão já atribuídos a 'continente' e a 'nuvens', se existentes na imagem em processamento.

- 1- Obriss a 2 passagens consecutivas pelos mesmos passos do programa: numa primeira, para se efectuar o cálculo com o único objectivo de se encontrarem as Reflectâncias mínima e máxima a aplicar como 'factor de escala' no processo de codificação, a realizar somente numa segunda passagem.

De facto, assim tem que ser na medida em que o equipamento disponível não permite ter em 'memória' todos os pixels de todas as linhas das 4 bandas espectrais, por falta de capacidade (512 x 512 x 4 = 1Mb de memória requerida, contra, no máximo, 140Kb disponíveis para código de programa e variáveis). O cálculo é efectuado mantendo em memória, apenas uma linha das 4 bandas espectrais (512 pixels x 4 bandas = 2Kb).

- 2- Embora este critério permita uma análise visual dos resultados sob forma mais contrastada, distinguindo-se mais claramente pixels vizinhos com reflectividades muito próximas, a verdade é que não permite uma comparação (visual) das reflectividades calculadas, numa mesma zona geográfica, em duas situações diferentes (datas diferentes, p.ex.).

Neste trabalho preferiu-se seguir um outro critério que resolve qualquer dos inconvenientes anteriores, não impedindo a análise visual contrastada atrás mencionada.

Consiste este, que poderia ser designado de 'absoluto', em atribuir valores fixos de reflectividade aos valores máximos e mínimos da conversão digital (254 e 1, respectivamente). De facto, as Reflectâncias variam entre 0 e 1 (ou entre 0 e 100%), pelo que os factores de escala estão necessariamente definidos logo ao iniciar-se o cálculo da primeira linha:

$$DN = 1 + 253 \rho \quad (3-30a)$$

A completar estas considerações sobre a codificação das Reflectâncias resultantes do cálculo da correcção atmosférica, refere-se que também se aplicam aqui os critérios de arredondamento atrás citados, pelo que a expressão utilizada é:

$$DN = \text{INTEIRO} ((1 + 253\rho) + 0.5) \quad (3-30b)$$

3.2.3.11 Descrição do Organograma do Algoritmo de Correção Atmosférica

No parágrafo 3.2.3 'Programas de Correção Atmosférica', apresentou-se de forma genérica, o que se pode considerar ser um fluxograma do programa que realiza a correção atmosférica. Com a descrição que se acaba de apresentar de cada um dos passos de cálculo, pode explicitar-se um pouco melhor o que, naquele fluxograma, se referiu como 'aplicação da correção atmosférica'. Tem-se então:

1) - Para cada linha, de 1 a 512, de 1 em 1:

1.1) - Cálculo de parâmetros relativos à linha, ou ao pixel central da linha:

1.1.1) - k_t , de proporcionalidade de instantes de observação (da expressão (3-7));

1.1.2) - Ascensão Recta de Greenwich (3-7).

1.2) - Procura 'pixel localizado', PL(1), o 1o. na linha identificado como água;

1.3) - Aplica correção atmosférica a PL(1):

1.3.1) - Cálculo de parâmetros geométricos relativos a PL(1):

1.3.1.1) - Vector de posição, R (3-5);

1.3.1.2) - Vector unitário da normal em PL, h (3-6);

1.3.1.3) - Vector unitário de posição do Sol, ou de iluminação em PL(1), SolP = SolI ((3-8) e (3-10));

1.3.1.4) - Vector de posição do satélite, SatP ((3-11) e (3-14));

1.3.1.5) - Vector de observação, Obs (3-15);

1.3.1.6) - Ângulo zenital solar, θ_0 (3-16);

1.3.1.7) - Ângulo zenital de observação, θ (3-17);

1.3.1.8) - Ângulo azimutal relativo, $(\theta - \theta_0)$ (3-18).

1.3.2) - Cálculo das componentes espectrais das radiancias (da atmosfera e observada):

1.3.2.1) - Para cada banda espectral, de 1 a 4 (440, 520, 550 e 670nm):

1.3.2.1.1) - Radiancia de Rayleigh ((3-19), (3-20), (2-71));

1.3.2.1.2) - Radiancia de Mie (2-75c);

1.3.2.1.3) - Descodificação das Radiancias observadas ((3-2) e (3-4));

1.3.2.1.4) - Irradiancia solar ((3-21) e (3-26)).

1.3.2.2) - Constituição do sistema de equações (3-23) e (3-24).

1.3.3) - Resolução iterativa do sistema de equações e cálculo da radiancia emergente da água em cada banda espectral.

1.4) - Cálculo da Reflectância de PL(1), em cada banda espectral (3-27) (opcional).

1.5) - Para cada pixel PL(i), desde o 2o. até ao último da linha, identificados como água:

1.5.1) - Aplicação do algoritmo de correção atmosférica;

- 1.5.1.1) - Repetição dos passos 1.3.1) e 1.3.3).
- 1.5.2) - Cálculo das Reflectâncias (opcional):
- 1.5.2.1) - Idêntico a 1.4).
- 1.5.3) - Para cada pixel P(J), entre PL(i) e PL(i+1), de 1 em 1, e identifica-
dos como água:
- 1.5.3.1) - Cálculo das Reflectâncias (opcional) ou das Radiações emergentes da
água, por interpolação entre PL(i) e PL(i+1), (3-25).
- 1.6) - Se o 1o. 'pixel localizado', PL(1), não for o 1o. pixel da linha, calcu-
la os valores das Reflectâncias ou das Radiações emergentes da água dos
pixels que ficam à esquerda por extrapolação, (3-25).
- 1.7) - Idem, à direita de PL(último); se este não for o último da linha.
- 1.8) - Codifica valores das Reflectâncias (opcional) ou das Radiações de todos
os pixels da linha nas 4 bandas espectrais em números inteiros, ((3-28b)
ou (3-30b)).
- 1.9) - Reserva valores da linha nos 4 ficheiros de resultados.

3.2.4 Programas de Cálculo das Suspensões e de Apresentação de Resultados

Os programas de cálculo das suspensões constituem o 4o. módulo de programas do conjunto que vem sendo apresentado. Dado que se resumem à aplicação de algumas fórmulas relativamente simples, a sua implementação algorítmica não apresenta grande dificuldade, pelo que a descrição que se segue refere-se a alguns aspectos de pormenor, apenas.

Antes de se iniciar, relembra-se ainda que estes programas realizam o cálculo de 2 tipos de suspensões: as orgânicas e as inorgânicas. Entendeu-se, por isso, separar os programas que realizam um e outro cálculo, solicitando-se ao utilizador que escolha qual destes pretende realizar. Porém, a escolha de um dos tipos de suspensões a calcular não é impeditiva da realização posterior do cálculo do outro tipo de suspensões.

Embora esta atitude de programação possa corresponder a um acréscimo de tempo de cálculo (praticamente o dobro, se se excluir o tempo de tomada de decisão pelo utilizador), entendeu-se que, deste modo, se sistematizam melhor as tarefas (os cálculos) que em cada momento se estão a realizar. Mais ainda: casos haverá de aplicações (ou estudos) em que somente um dos tipos de suspensões é pretendido, mas deseja-se efectuar o cálculo segundo diversos modelos, para efeitos comparativos; por exemplo. De facto os programas de cálculo de suspensões elaborados não se limitam apenas ao modelo proposto neste trabalho

para um e outro tipo de suspensões, estando igualmente programados alguns dos que oportunamente se referiram. A escolha de qual dos modelos a executar é também matéria de decisão do utilizador.

3.2.4.1 Cálculo de Suspensões Orgânicas

Como se acabou de referir, qualquer dos modelos implementados sob forma de programa para o cálculo das suspensões orgânicas limita-se à tradução algorítmica de uma fórmula, não apresentando nenhuns cuidados especiais dignos de menção além dos que são necessários na elaboração de um 'qualquer' programa de cálculo automático e que, por isso, não são aqui referidos.

No entanto, porque se trata de programas que apresentam o resultado final do cálculo encetado, descreve-se seguidamente o modo de apresentação desse resultado.

O problema consiste em proporcionar ao utilizador a possibilidade de saber, por um lado, a distribuição espacial dos teores de suspensão, sob forma gráfica conveniente e, por outro lado, em cada ponto geográfico(*), qual o valor desse mesmo teor.

A data de elaboração deste trabalho e dos programas, não se dispunha em estado funcional ainda, da capacidade de impressão colorida do sistema de processamento digital de imagens do LNEC, referida no início deste Capítulo, pelo que os programas foram concebidos de modo a apresentarem no monitor a imagem dos resultados, numa mescla de tonalidades de cinzento, correspondendo cada tom a um valor do teor de suspensão (ou mais exactamente a uma soma de teores de suspensões).

Para este efeito, e à semelhança do que anteriormente se referiu sobre a necessidade de se constituírem ficheiros intermédios contendo os resultados da correcção atmosférica sob forma codificada, também as imagens dos resultados são apresentadas (visualizadas) deste modo, i.e., em que, o valor de cada pixel é representado por um número inteiro entre 0 e 255, pelo estabelecimento de uma correspondência adequada entre estes valores e os da grandeza real (teores das suspensões).

No entanto, é importante referir que, ao utilizador, esta codificação é 'trans-

(*) - Lembra-se que 'ponto geográfico' é um pixel que, 'no terreno', tem uma dimensão aproximada de 900x900 metros!

parente', i.e., não tem este que se preocupar em saber 'a quantos mg/m³ de suspensões corresponderá a tonalidade de cinzento que se observe no pixel L,C (linha, coluna)'. É o próprio programa que lhe indica.

Este objectivo é conseguido de dois modos:

- 1- em uma das margens da imagem (à direita, para o cálculo de suspensões orgânicas) o programa apresenta uma escala gráfica com todas as tonalidades de cinzento presentes na imagem (calibration wedge) à qual se sobrepõe o valor do teor de suspensões, escrito em caracteres numéricos (em mg/m³);
- 2- após a apresentação da imagem, o programa aguarda que o utilizador lhe solicite a obtenção do teor de suspensões de um determinado pixel, identificado pela sua posição na imagem em linha e coluna.

Na posse destes elementos, o programa fornecerá o valor procurado.

Pensa-se, porém, que a par da imagem da distribuição espacial dos teores de suspensão, tem interesse dispor de uma outra imagem reproduzindo as linhas de 'igual teor de suspensão (isolinhas)'. Esta forma de apresentação de resultados não ficou, porém, pronta à data de apresentação deste trabalho.

Para a codificação digital dos resultados, aplicou-se o mesmo critério anteriormente descrito para a calibração da Reflectância, designado por 'absoluto'. Um problema se põe, porém, neste caso: qual o valor máximo a atribuir aos teores de suspensão, para a definição da correspondência entre estes e os códigos digitais?

Na ausência de melhores elementos, considerou-se que não ocorrerão, na natureza, teores de suspensão de pigmentos clorofilianos superiores a 30mg/m³, valor obtido da bibliografia consultada. O programa permite, no entanto, a sua automática correcção, caso encontre, durante o cálculo, valores superiores, alterando em consequência os 'factores de escala' originais.

A expressão de conversão é então:

$$DN = 10 + \text{INTEIRO} \left(C \frac{245 - 10}{C_{max}} + 0.5 \right) \quad (3-31)$$

onde $C_{max}=30mg/m^3$, 'C' é o teor de suspensões de pigmentos clorofilianos (em mg/m^3) e os valores 10 e 245 são os valores digitais mínimos e máximos correspondentes às concentrações mínimas ($0mg/m^3$) e máximas ($30mg/m^3$), respectivamente.

Entendeu-se representar estes dois extremos por aqueles valores para que, visualmente, melhor se identificassem dos valores 0 (zero, previamente codificado para representar 'continente') e 255 ('nuvens'), pois 1 e 254 não o permitiriam.

3.2.4.2 Cálculo de Suspensões Inorgânicas

Aplicam-se, neste caso, todas as considerações anteriormente apresentadas para as suspensões orgânicas.

A expressão de conversão é formalmente idêntica à anterior, diferindo naturalmente no valor máximo esperado encontrar para o teor de suspensões, aqui considerado ser de $10mg/m^3$:

$$DN = 10 + \text{INTEIRO} \left(S \frac{245 - 10}{S_{max}} + 0.5 \right) \quad (3-32)$$

com $S_{max}=10mg/m^3$ e 'S', teor de sedimentos.

A escala gráfica de tonalidades de cinzento é agora colocada junto à margem esquerda da imagem.

3.2.4.3 Modelos Implementados para o Cálculo de Suspensões

Como se referiu, foram programados diversos modelos, para além do proposto neste trabalho. Estes foram:

- 1- Para o cálculo de suspensões orgânicas:
Os modelos de Gordon (expressões (2-49c)) e da Nasa (2-49d);
- 2- Para o cálculo de suspensões inorgânicas:
Os modelos de Sturm (2-50b) e de Thomas (2-50c).

3.3 NODO DE OPERAÇÃO

3.3.1 Apresentação Genérica

Descreve-se em seguida como o utilizador se habilita a executar o(s) programa(s), excluindo-se os aspectos formais relativos à possibilidade de acesso ao sistema de processamento digital de imagens do LNEC.

Já se referiu que este conjunto de programas foi concebido em módulos, cada um deles constituído por um ou mais programas, chamados à execução quando apropriado, quer em resultado de uma opção tomada pelo utilizador, quer por necessidade específica da sequência de cálculo.

Todos eles (os programas) se encontram ligados numa estrutura de MENUS, que se apresentam na figura 3.9(*). Sobressai desde logo da referida figura, que a sequência da execução é estabelecida pelo utilizador pela indicação de:

1- 'Grandes' opções de cálculo:

Por exemplo, consulta da banda magnética, selecção da zona de trabalho, correcção atmosférica, cálculo de suspensões, resultados da correcção atmosférica em Radiações ou em Reflectâncias, p.ex.

2- 'Pequenas' opções de cálculo:

Por exemplo, tipo de modelo a utilizar.

A programação em Menus é uma das formas mais actuais de desenvolvimento de programas para computador, particularmente os que se constituem em 'pacotes de programas' (program package), como o que se desenvolveu no presente trabalho.

(*) - Incluída no final do Capítulo, para facilidade de consulta durante a leitura do texto.

3.3.2 Os Menus .

Na figura, assinalam-se a traço interrompido os diversos Menus, ou níveis de Menus, em que se constituiu o programa base, o qual se designou por CZCS.

3.3.2.1 Seleccção das Opções de Base (Menu 1)

Neste Menu apresentam-se ao utilizador as 3 opções de base para execução do programa:

1- Consulta da banda magnética (opção 1):

Para que o utilizador tome conhecimento do conteúdo desta, i.e., sabe que imagens estão contidas na banda magnética.

2- Correccção atmosférica (opção 2):

Como o próprio nome indica, é por esta opção que o utilizador pode realizar a extracção da componente atmosférica do sinal captado, como atrás referido.

3- Cálculo de suspensões (opção 3):

Ao decidir por esta opção, pressupõe-se que o utilizador já procedeu à correccção atmosférica da imagem que pretende trabalhar. De modo igual ao procedimento para o cálculo da correccção atmosférica, terá que seleccionar previamente a zona de trabalho, a extrair da imagem em estudo.

4- Terminar (opção 0):

Como se pode reparar, todos os menus, à excepção do Menu 2.1, têm em alternativa a opção 0 (zero), que possibilita ao utilizador a suspensão da opção tomada anteriormente (Menus 3.1, 3.1.1 e 3.1.2, na figura), ou, no caso presente, terminar/suspender a execução do programa, no seu todo.

Deste modo, garante-se ao utilizador, quer a possibilidade de correccção de uma opção erradamente tomada, fazendo-o retornar ao ponto de partida, quer terminar/suspender a execução do programa sem perder todo o trabalho efectuado até então.

3.3.2.2 Seleção do Tipo de Resultado da Correção Atmosférica (Menu 2.1):

Este Menu é apresentado ao utilizador no final da correção atmosférica. Como se referiu oportunamente, os modelos de quantificação de parâmetros de qualidade de água do mar são baseados ora em Radiações, ora em Reflectâncias. Consoante o tipo de modelo que pretender aplicar, assim se decidirá, nesta ocasião, pela grandeza a obter como resultado do processo de correção atmosférica, Radiações ou Reflectâncias.

3.3.2.3 Seleção do Tipo de Suspensões a Calcular (Menu 3.1)

As opções a que se refere este Menu dizem respeito ao tipo de suspensões que se pretende quantificar, necessariamente após a correção atmosférica. A opção 0 (zero) permitirá corrigir uma decisão erradamente tomada (a de se querer calcular as suspensões sem ter sido efectuada a correção atmosférica previamente, p.ex.).

No exemplo citado, pretendendo-se calcular suspensões (de qualquer dos tipos) sem a correção prévia do "ruído" atmosférico, quando finalmente se atingisse o ponto de cálculo efectivo das suspensões, segundo o modelo pretendido (opções dos menus 3.1.1 ou 3.1.2), o programa de cálculo detectaria a não execução prévia da correção atmosférica.

3.3.2.4 Seleção dos Modelos de Cálculo (Menus 3.1.1 e 3.1.2)

Estes referem-se aos tipos de modelos disponíveis para o cálculo de suspensões orgânicas e inorgânicas, respectivamente.

De momento, somente 3 modelos estão implementados para cada tipo de suspensões. É evidente agora, a vantagem da estrutura programada em módulos, pois a todo o momento se poderá incluir um ou mais modelos em qualquer dos cálculos, sem alterações apreciáveis dos restantes programas. De facto, as alterações a introduzir serão somente:

- 1- Inclusão das opções adicionais entretanto programadas e disponíveis nestes Menus;
- 2- Elaboração de subrotinas correspondentes às fórmulas dos novos modelos a incluir.

3.3.3 Introdução de Parâmetros

A execução do programa não se resume à indicação das opções pretendidas.

O utilizador deverá responder a algumas questões que lhe são postas pelo(s) programa(s), destinadas à execução conveniente deste(s). Se em alguns casos é óbvia a resposta (p.ex., das 3 imagens presentes, qual pretende, ou as coordenadas do canto superior esquerdo da zona da imagem a processar), noutros requere-se do utilizador conhecimento perfeito do que se lhe solicita.

É exemplo o conjunto de elementos ou parâmetros radiométricos que são exigidos no processo de correcção atmosférica. Entendeu-se assim proceder porquanto alguns dos valores admitidos pelo programa poderão não ser válidos para o cálculo na zona em estudo, ou o utilizador dispor de informação mais correcta (por mais actual) do que a prevista no programa. No entanto, considerou-se útil que, ao solicitar-se esta informação do utilizador, se lhe apresentasse os valores que o programa toma por defeito.

Os parâmetros solicitados e os correspondentes valores tomados por defeito são:

1- Irradiância solar espectral no topo da atmosfera:

- a) $E_0(440)$ [182.5mW/cm²/um];
- b) $E_0(520)$ [186.7mW/cm²/um];
- c) $E_0(550)$ [186.9mW/cm²/um];
- d) $E_0(670)$ [153.6mW/cm²/um].

2- Opacidade espectral do Ozono:

- a) Z03(440)[0.0067];
- b) Z03(520)[0.0200];
- c) Z03(550)[0.0323];
- d) Z03(670)[0.0191];

3- Espectro de Reflectância da Água do Mar Pura (%):

- a) P(440)[0.023532];
- b) P(520)[0.009098];
- c) P(550)[0.006116];
- d) P(670)[0.000396];

3.3.4 Considerações Finais

Se o desencadear da execução dos programas resulta da tomada de opções claramente explicitadas pelos menus, poder-se-á perguntar o que acontece quando termina a execução solicitada.

Da figura 3.9 pode concluir-se que:

- 1- A execução correspondente à última opção tomada numa cadeia necessariamente iniciada no Menu Principal, termina sempre com a constituição de ficheiros contendo a imagem resultante do cálculo;
- 2- O final da execução que produz as imagens resultantes faz retornar o controle da sequência de execução ao Menu que lhe deu origem.

Esta última consideração permite pois ao utilizador o processamento lógico da sequência de passos a dar. Ela é particularmente útil, por exemplo, na fase de

cálculo de suspensões, de qualquer dos tiros, porquanto, finalizada a execução segundo um modelo escolhido, o utilizador poderá prosseguir com a mesma execução, mas segundo outro modelo. A saída, necessariamente voluntária deste aparente ciclo, é efectuada pela escolha da opção 0 (zero).

O utilizador tem assim total controle sobre o que fazer, quando e como escolher.

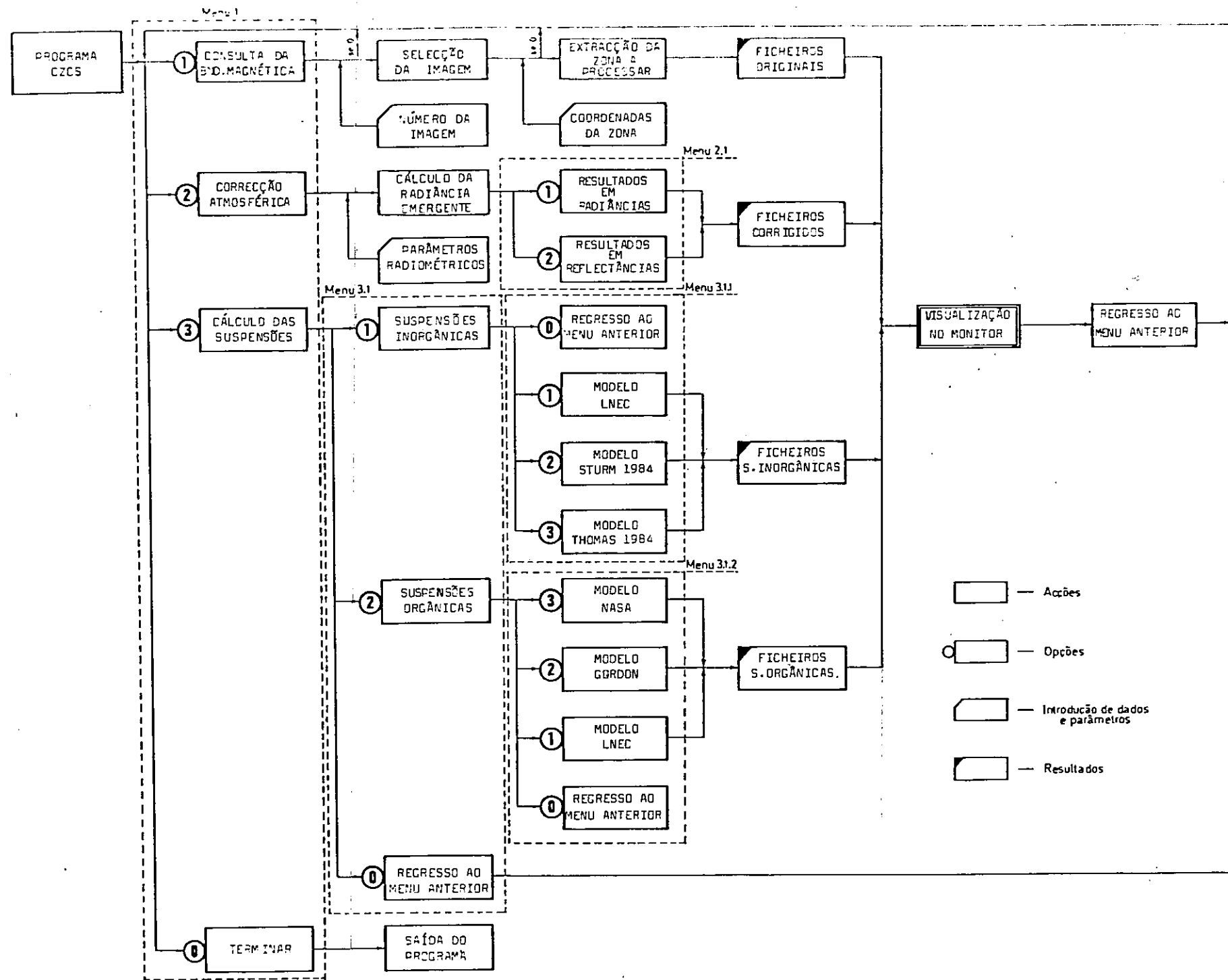


Figura 3.9
Fluxograma de Execução do Programa e
Identificação dos Menus

BIBLIOGRAFIA

ABREU, Salvador F.

'ULIPS Reference Manual: Utility Routines for the LNEC Image Processing System'
IT Informática (em preparação), LNEC, Lisboa, 1984.

AUSTIN, R.W.

'CZCS Sensitivity Loss Study'

in ESA European Secretariat Newsletter, N7, Fev.1982.

CRACKNELL, A.P.; SINGH, S.M.

'Coastal Zone Research Work at Dundee University Using Remote Sensing Techniques'

in Proc. of EARSEL-ESA Symp. on 'Appl. of Rem. Sens. on the Continental Shelf',
Voss, 19-20 Maio 1981, ESA SP-167, 1981.

DIGITAL Equipment Corporation

'PDP-11 FORTRAN-77'

DIGITAL Software, DEC, Maynard, Massachusetts, EUA, 1982.

DIGITAL Equipment Corporation

'RSX-11M, Version 4.0'

DIGITAL Software, DEC, Maynard, Massachusetts, EUA, 1982.

ESA EARTHNET

'Nimbus-7 Coastal Zone Colour Scanner Data. Acquisition and Processing for EARTHNET'

in 'EARTHNET, The Story of Images', ESA BR-18, 1984.

JOLY, Gérard

'Les Données Images'

Col. Télédétection Satellitaire, Paradigma, CAEN, 1984.

SHERMAN, John W.

'SEASAT and Nimbus-G: Applications to Marine Weather'

Mariners Weather Log, (ed. desconhecido), 1977.

SIGMA Electronic Systems

'ARQS 7000 Series User Manual, Issue 4'

SIGMEX, Horsham, RU, 1983.

THOMAS, Yves-François

'Téledétection des Eaux Littorales'

I Curso de Tratam. e Gestão da Inf. Obtida por Det. Remota, CPEEE, LNEC, 1979.

WOOD, William

'RATFIV Primer'

Inst. for Cancer Research, Philadelphia, Pa., EUA, 1981.

CAPITULO 4

CONCLUSOES, PERSPECTIVAS FUTURAS

Terminada a apresentação formal do trabalho realizado, impõe-se alguma reflexão sobre o mesmo.

Abordam-se neste Capítulo as seguintes duas questões: análise crítica do trabalho que acaba de se apresentar e perspectiva da sua continuação futura.

Sobre este último aspecto, realça-se a conveniência da colaboração inter-institucional para não só permitir a continuação do trabalho desenvolvido e a sua aplicação prática, como também obter o melhor aproveitamento das possibilidades oferecidas pelas técnicas de detecção remota.

4.1 APRECIACAO CRITICA DO TRABALHO REALIZADO

4.1.1 Revisão dos Objectivos Preconizados

No Capítulo 1, "Introdução", listou-se um conjunto de subprojectos integrados num projecto mais amplo designado por "Caracterização de Formações Estuárias e do Meio Marítimo Litoral por Técnicas de Detecção Remota" (página 4 e seguintes), cujo objectivo global é o de permitir à Instituição dominar as potencialidades de aplicação das técnicas de detecção remota no meio marítimo.

De entre aqueles subprojectos, destaca-se o de "Caracterização e quantificação dos parâmetros de qualidade de água em estuários e no meio litoral adjacente" e no qual se inseriu o trabalho que agora se conclui.

Este foi realizado com os seguintes objectivos:

- 1- Procura das metodologias adequadas à quantificação de suspensões na água do mar a partir de dados de satélite;

- 2- Implementação sob forma de programas para computador dos modelos desenvolvidos, e aplicar a registos radiométricos cartados pelo radiómetro CZCS do satélite Nimbus-7;
- 3- Aplicação e verificação do modelo no litoral Português.

4.1.2 Apreciação Crítica do Trabalho Realizado

Se o último ponto referido não pôde ser cumprido, por falta de elementos à data de realização do trabalho, entende-se que os dois anteriores foram-no cabalmente. De facto embora tenha havido necessidade de "desvio" ligeiro do campo de aplicação inicialmente previsto (caracterização da qualidade de água EM estuários), procedeu-se a uma análise minuciosa da forma de abordagem do problema da caracterização e quantificação de suspensões na água do mar a partir de dados radiométricos, identificaram-se os principais métodos e "escolas" actualmente em destaque, sem deixar, porém, de se lhes apontar os "defeitos" e as "virtudes".

Desta análise, resultou a definição de um modelo que, embora empírico na sua formulação, como todos os que actualmente se encontram em exploração, se apoia firmemente no processo físico da interacção da radiação electromagnética com a matéria, no caso, a atmosfera e a água do mar.

Destinando-se a metodologia desenvolvida à concepção de um instrumento prático de caracterização e quantificação de suspensões da água do mar a partir de observações espaciais, elaborou-se um conjunto de programas para computador com este objectivo, e aplicar, de momento, aos dados do radiómetro CZCS do satélite Nimbus-7, por razões também justificadas.

Para a quantificação pretendida é necessário, em primeiro lugar, proceder à correcção atmosférica dos dados. A este respeito, apresentou-se também desenvolvimente a metodologia que "tradicionalmente" é seguida - consideração da teoria da difusão simples no processo de transferência radiativa na atmosfera e de todas as simplificações dela resultantes.

Porém, na sua implementação prática, entendeu-se não se adoptar a hipótese que normalmente é tomada: nulidade da Radiação emergente da água no comprimento

de onda vermelho-infravermelho próximo (método de Gordon). Compreende-se que a maioria dos autores a siga, na medida em que, estes, tanto quanto foi possível aperceber, têm o seu campo de actuação no oceano onde não se verificam elevados teores de suspensão.

Considerar esta hipótese ($I_w(670)=0$) junto à costa ou de embocaduras de estuários traduzir-se-ia por uma correcção atmosférica "demasiado forte", ou, por outras palavras, conduziria a valores das Radiâncias nos comprimentos de onda de 440, 520 e 550nm inferiores aos "reais".

No entanto, para a consecução prática da hipótese seguida teve que se utilizar o modelo de Smith e Wilson, o que, em determinadas situações poderá não ser válido. Este é um dos aspectos que irão merecer de futuro uma atenção cuidada.

Quanto ao programa para computador, não só se apresentaram, passo a passo, cada uma das etapas de cálculo, em particular as referentes à "geometria" de iluminação e de observação com vista à correcção atmosférica, como se utilizou uma das técnicas de programação mais actuais.

Julga-se que, uma vez em regime de exploração sistemática, o programa constituirá um instrumento de grande utilidade, quer de investigação quer de aplicação corrente, mesmo por técnicos e especialistas sem conhecimentos aprofundados de Informática, mais interessados que estão, naturalmente, no estudo da sua especialidade: caracterização do ambiente marítimo.

Não se considera um programa "acabado", nem conviria que o fosse. No entanto, foi concebido para ser utilizado como "instrumento profissional", permitindo alguma flexibilidade ao utilizador (introdução de dados diferentes dos tomados por defeito, por exemplo), informação permanente das características dos dados radiométricos, recuperação de resultados intermédios em caso de "acidente", e apresentação de resultados de modo sugestivo. A forma modular da sua concepção permitirá, por outro lado, quer a modificação quer o acrescento de novos desenvolvimentos. Situam-se neste exemplo, os modelos de correcção atmosférica e os modelos de quantificação mais representativos que vierem a ser desenvolvidos.

4.2 PERSPECTIVAS DE ACTUAÇÃO FUTURA

4.2.1 Prosseguimento do Trabalho de Investigação neste Domínio

4.2.1.1 Estudo da Viabilidade do Modelo Proposto

Neste âmbito, o estudo abrangerá os seguintes tópicos:

- 1- Validade da formulação proposta;
- 2- Cálculo de intervalos de confiança para as estimativas dos coeficientes do modelo;
- 3- Limites de aplicação do modelo;

Embora individualizados, estes tópicos estão obviamente relacionados e todos dependentes da disponibilidade de dados. De facto, é da disponibilidade destes, em quantidade e em qualidade significativas, que se poderá calibrar o modelo, estimar os intervalos de confiança dos parâmetros e estabelecer os limites da sua aplicação.

A disponibilidade de dados referida passa pela sua aquisição prévia. A este respeito entende-se ser da maior conveniência a colaboração inter-institucional para aproveitamento adequado das capacidades e vocações estabelecidas e, por articulação conveniente das campanhas de observação, se promover a gestão parcimoniosa dos meios humanos e de equipamento necessários.

A representatividade requerida para os dados exige uma programação cuidada das campanhas de observação, tomando em devida conta as recomendações apontadas a este propósito no Capítulo 2 (páginas 23 e seguintes), nomeadamente:

- 1- registo das condições atmosféricas e de iluminação natural que se verificarem durante a colheita de amostras de água (coordenadas solares, visibilidade atmosférica, humidade do ar, etc.);
- 2- representatividade espacial (horizontal e vertical, e não apenas pontual) das amostras de água colhidas, e com razoável variabilidade dos teores de suspensão;

3- utilização de radiómetros operando em comprimento de onda adequados à caracterização radiométrica de águas do mar e dos constituintes típicos, e com boa resolução espectral e radiométrica na gama visível e infravermelha próxima.

Como se referiu, estes requisitos obrigam a uma especialização do processo de aquisição dos dados relevantes, bem como à utilização de equipamento sofisticado e perfeita adaptação das equipas à sua operação. Por isso, assume particular relevo o contacto que recentemente se estabeleceu com uma das instituições de investigação que mais se tem notabilizado neste campo: o Joint Research Center (JRC).

E na sequência deste contacto que se prevê a continuação do trabalho pelo acesso aos dados que dispõe das numerosas observações que tem realizado nos mares Adriático e Báltico. Por outro lado, a eventual participação em alguns dos seus projectos e campanhas de observação, por integração nas suas equipas, permitirá a aquisição da experiência necessária para a realização em Portugal, de ensaios e observações similares, com vista à caracterização radiométrica das águas territoriais. Destas observações e da caracterização radiométrica conseguida, resultará a expressão do relacionamento espectral das águas do litoral português, a utilizar no modelo de correcção atmosférica em substituição da fórmula de SMITH e WILSON utilizada neste trabalho.

4.2.1.2 Estudo do Comportamento Radiométrico da Atmosfera

Pode dizer-se, sem exagero, que o processamento dos dados de detecção remota, particularmente os obtidos a partir de plataformas espaciais, são, em larga medida, dependentes do processo de correcção atmosférica adoptado.

Se, na maioria das aplicações continentais, se pode considerar menos crítica a correcção atmosférica efectuada, devido à maior reflectividade dos "objectos" observados, sobrepondo-se à das componentes da atmosfera (à excepção das nuvens, claro!), e porque o objectivo é, em geral, "separar" os objectos para sua identificação, no meio aquático ela é vital, dada a baixa reflectividade da água e a necessidade de se operar em comprimentos de onda em que se resista maior interferência ou "ruído" da atmosfera no sinal captado, por corresponderem aos que "melhor" traduzem o comportamento radiométrico da água e dos seus constituintes.

No presente trabalho, o modelo de correcção atmosférica adoptado apoia-se em algumas hipóteses simplificadoras (teoria da difusão simples), o que o restringe a aplicações a atmosferas de fraca opacidade. A verificação experimental da independência espacial do quociente das radiancias dos aerossóis e das respectivas opacidades em dois comprimentos de onda (equações (2-64) e (2-65b)), bem como da função de fase, permitiu, porém, estender o campo de aplicação do modelo a atmosferas de opacidades superiores, mostrando alguns autores que o erro cometido não ultrapassa os 5%.

Com o intuito de melhorar o modelo aplicado, pensa-se considerar 'outras ordens' do processo de difusão atmosférica, pela adopção de uma função de fase mais 'realista'. Trata-se da função de Henyey-Greenstein (THG, Two Term Henyey-Greenstein, equação (A-46b)), para a qual, porém, é necessário conhecer o valor dos três parâmetros por que se exprime.

Será pois necessário efectuar observações adequadas para a quantificação daqueles três parâmetros, bem como do 'exponente de Ångström' em ambiente marítimo, já que, em geral, são conhecidos ou estimados para atmosferas continentais.

Também neste aspecto se justifica a cooperação inter-institucional para a prossecução destes objectivos.

4.2.1.3 Aplicação da Metodologia a Outros Tipos de Dados

A aplicação aos dados do radiómetro CZCS da metodologia desenvolvida deveu-se ao facto deste ter sido concebido especificamente para estudos da cor dos oceanos. A recente colocação em órbita do radiómetro Thematic Mapper (TM), com uma gama espectral próxima da disponível naquele radiómetro, suscita naturalmente a extensão da aplicação da metodologia aos dados que forem sendo adquiridos por este último.

Embora se saiba de antemão que a resolução radiométrica do TM é inferior à oferecida pelo CZCS, a facilidade aparente de aquisição dos dados por ele recolhidos e divulgados, apesar de consideravelmente mais onerosos que os do CZCS (3500 US\$ contra 250 US\$, aproximadamente), alicia também a adaptação preconizada, por, deste modo, se poder dispor com mais frequência de informação actualizada das condições ambientais das águas estuárias e litorais.

Esta adaptação constituirá, além disso, um excelente exercício neste âmbito,

Porquanto se estima para futuro breve a disponibilidade de novos radiómetros vocacionados para estudos de qualidade de água, em substituição do CZCS (o Ocean Color Scanner, OCS, p.ex., com 12 canais espectrais, dos quais 7 na gama do visível-infravermelho próximo).

4.2.2 Estudo de Outros Parâmetros de Qualidade de Água por Detecção Remota

Evidentemente que as suspensões tratadas no presente trabalho não esgotam o conjunto de parâmetros que caracterizam o estado de qualidade das águas.

De entre os que podem ser analisados por técnicas de detecção remota distinguem-se os seguintes:

- 1- avaliação do estado térmico da superfície;
- 2- caracterização e eventual quantificação (em volume e em área) da poluição por hidrocarbonetos.

Justificam-se os estudos térmicos por detecção remota pela crescente utilização previsível de grandes massas de água como meio de captação e de rejeição da água dos circuitos de refrigeração de centrais energéticas, colocando-se desde logo os problemas de impacto térmico criado no meio receptor e do rendimento do processo de refrigeração (pela eventual ocorrência de curto-circuito térmico). Por outro lado, é também conhecida a dependência da presença de cardumes de certas espécies de peixes com o estado térmico das águas do mar, caracterizado pela distribuição espacial superficial da temperatura, e em particular, pela localização geográfica nas áreas piscatórias de determinados valores e gradientes térmicos (frentes térmicas).

Quanto à presença de poluentes hidrocarbonados, embora o seu estudo se possa efectuar com recurso a várias técnicas, a termografia periódica de áreas potencialmente sensíveis àquela presença (corredores de tráfego marítimo de combustíveis (lanes) junto à costa portuguesa, instalações portuárias de carga e de descarga daqueles produtos, por exemplo) também permite a sua identificação (leia-se, localização, embora um estudo sistemático das características emissivas dos diferentes hidrocarbonetos e a utilização de radiómetros especializados possam também conduzir à sua identificação).

Para qualquer dos exemplos apontados, as técnicas de detecção remota revelam-se de grande valor potencial, pela visão sinóptica que providenciam de vastas regiões. Porém, quer a dimensão destas quer a caracterização térmica pretendida impõem alguns condicionamentos na sua utilização, nomeadamente, nas resoluções geométrica, radiométrica e espectral dos radiómetros. Com efeito, se na cartografia térmica da superfície do mar para apoio às pescas se "aceita" uma resolução geométrica (dimensão do pixel no "terreno") da ordem dos 500 a 1000 metros e uma resolução radiométrica (i.e., térmica) de 0.2 a 0.5 graus centígrados, que os actuais termo-radiómetros instalados a bordo de satélites oferecem, a caracterização do estado térmico de superfície de áreas vizinhas de tomadas de água e das respectivas rejeições de efluentes térmicos não se compara com aquelas resoluções. Para estas aplicações, a tecnologia dos equipamentos actualmente disponíveis não permite aquele estudo senão a partir de aeronaves (aviões ou helicópteros) voando a uma altitude de 100 a 500 metros.

Impõe-se assim um estudo igualmente incisivo sobre os equipamentos termo-radiométricos, a par da metodologia de quantificação do estado térmico das superfícies, com vista à implementação de "instrumentos de trabalho" que permitam realizá-la de forma prática e eficaz, à semelhança do agora apresentado sobre as suspensões.

A este respeito, dispõe-se já em Portugal de alguns meios para a efectivação destes estudos a "baixa altitude", através da Força Aérea Portuguesa (FAP), operando um termo-radiómetro adquirido pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT), por acordo com a Comissão Permanente de Estudos do Espaço Exterior (CPEEE), da qual é membro, assim como o LNEC.

A utilização deste termo-radiómetro é, porém, limitada, pelo facto de só permitir, de momento, resultados da observação termográfica sob a forma analógica gráfica: sobre filme fotográfico, ou em resistos de papel, em diversas tonalidades de cinzento, proporcionais à temperatura aparente ou de brilho dos "objectos" (brightness temperature). Esta limitação é mais crítica quando se realizam termografias de regiões com grande diversidade de "objectos" (com diversidade de Emissividade) pela dificuldade prática de realização dos cálculos da temperatura real, a partir da aparente, por esta se não apresentar devidamente quantificada/numerizada. Mesmo em áreas de Emissividade "uniforme" (como é o caso das superfícies de água), uma eventual digitalização da imagem analógica obtida não permitiria sanho apreciável de precisão, porquanto, além da introdução de factores de erro durante o processo de digitalização (de quantificação difícil e duvidosa), a (eventual) baixa resolução radiométrica do

aparelho perdeu-se no processo de conversão do sinal saído do radiómetro em densidades de emulação fotográfica, o qual apresenta, manifestamente, resolução inferior à original.

Conseguir-se-ia mais eficácia, quicé eficiência mesmo, se em paralelo com a "saída" gráfica actualmente disponível se obtivesse um registo magnético do sinal do radiómetro, para processamento posterior da sua digitalização. A viabilidade de tal solução, que passa naturalmente pela aquisição de equipamento compatível "a montante" (eventuais conversores analógico-digitais) e "a jusante" (gravadores de alta densidade (HDTR, High Density Tape Recorders), gravadores compatíveis com computadores, etc.), tem estado a ser analisada, mas dados os custos a que tal solução parece conduzir, a hipótese de aquisição de um novo radiómetro totalmente equipado de origem com uma tal "saída" está a revelar-se como uma alternativa plausível.

4.2.3 Prosseguimento dos Estudos de Aplicação de Técnicas de Detecção Remota no Meio Marítimo e nos Estuários

Dos sub-projectos que integram o globalmente designado por "Caracterização de Formações Estuárias e do Meio Marítimo Litoral por Técnicas de Detecção Remota", referido no Capítulo 1, dois merecem particular atenção no prosseguimento dos estudos de aplicação de técnicas de detecção remota no ambiente marítimo (que aqui inclui o dos estuários). São eles:

- 1- A avaliação e caracterização de estados de mar por dados de satélite;
- 2- A avaliação de parâmetros hidrodinâmicos de estuários.

O interesse destes dois temas ultrapassa o que lhes é intrínseco. Na verdade, quem tem tido a oportunidade de acompanhar a evolução dos trabalhos de aplicação de técnicas de detecção remota nos mais diversos domínios terá constatado certamente as seguintes duas linhas evolutivas.

Por um lado, e decorrente das características próprias da informação obtida por detecção remota (sinopticidade e repetitividade das observações sobre extensas regiões, abrangência de várias áreas do conhecimento científico da geografia terrestre, entre outras), assiste-se ao desenvolvimento de metodologias de análise que visam um melhor/mais completo aproveitamento da informação assim disponível. Por exemplo, pela sua integração em instrumentos de gestão dos

recursos naturais e de apoio às decisões que se revelem oportunas de tomar quanto à sua utilização; face às opções políticas e técnicas de desenvolvimento económico e social.

Os Sistemas de Informação Geográfica (GIS, Geographic Information Systems), a que se associa a detecção remota e a cartografia (temática, de uso do solo, de erosão, etc.), constituem um poderoso instrumento de apoio às referidas atitudes de gestão e de decisão, pelo manancial de informação actual e rapidamente actualizável que veiculam, e na forma (teoricamente) mais adequada.

Por outro lado, e decorrente também do progresso tecnológico verificado em outras áreas, nomeadamente na electrónica miniaturizada e na química, a que não será alheio o esforço desenvolvido na conquista do espaço desde a década de 60, assiste-se ao projecto, construção e operação de equipamentos sensores mais sofisticados, capazes de maiores/melhores resoluções nos três níveis fundamentais: geométrico, radiométrico e espectral.

De entre alguns, destacam-se os radares, particularmente os chamados de "abertura sintetizada" (synthetic aperture radars, SAR, por oposição aos de "abertura real", real aperture radars, RAR). De facto, oferecem estes aparelhos a vantagem de operarem em condições meteorológicas adversas, por exemplo, quando da ocorrência de coberturas nebulosas persistentes sobre as regiões em estudo.

Uma outra vantagem reside na sua própria forma de operação: emissão de energia electromagnética controlada, em intensidade, tipo (comprimento de onda), polarização (de emissão e de recepção), o que lhes confere uma notável flexibilidade e especialidade.

Apesar da complexidade do processamento da enorme quantidade de informação que produzem, verifica-se hoje um particular interesse no desenvolvimento destes aparelhos, quer para operação a bordo de plataformas espaciais - como o demonstra a Agência Espacial Europeia (ESA, European Space Agency) que na carga útil (payload) do satélite ERS-1 (ESA Earth Resources Satellite), a lançar no início da década de 90, inclui dois radares de grande interesse em aplicações marítimas: o Radar Altimetro (AR, Altimeter Radar, para medições precisas do seio de terrestre e, por extensão, da asitacção marítima) e o Radar de Abertura Sintetizada para Observação Lateral (SLSAR, Side Looking Synthetic Aperture Radar, permitindo a caracterização instantânea da forma de aproximação dos trens de ondas à linha de costa, ou seja, dos planos de refração, de difracção, de reflexão, ondas internas (internal waves), etc.) - quer 'no

terreno", para observação, caracterização e medição de parâmetros hidrodinâmicos vários, como por exemplo as correntes induzidas pela maré em estuários, pela utilização de radares "portáteis".

Este interesse justifica, pois, que se invista na aquisição de conhecimentos especializados sobre um equipamento do qual se tem a perspectiva de se tratar do equipamento do futuro em detecção remota.

A propósito da caracterização de estados de mar por dados obtidos de plataformas espaciais, não se quer deixar de referir que se tem a noção clara de estes não permitirem uma verdadeira caracterização do clima de agitação de uma região da costa, pelo menos à luz do conceito que se tem do termo e das acções que, actualmente, se empreendem com esta finalidade. Com efeito, aqueles dados mais não oferecem do que um valor pontual ou um conjunto de valores pontuais correspondentes às sucessivas observações instantâneas obtidas durante a passagem do aparelho sobre a região em estudo.

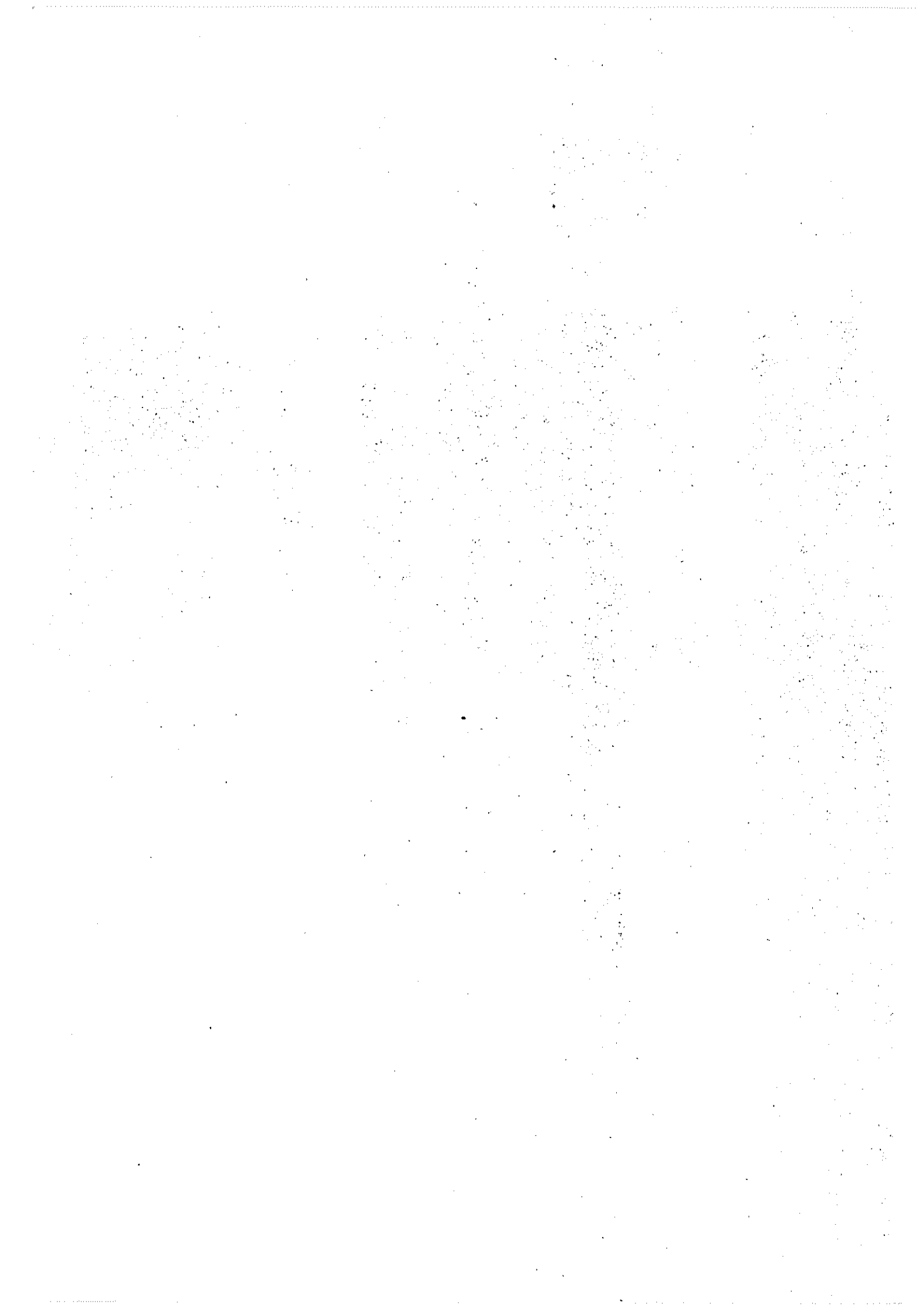
Porém, porque providenciam uma "visão" alargada desta, os valores "pontuais" assim obtidos poderão contribuir significativamente para a extensão do conhecimento da agitação marítima ocorrente em outros locais onde se não disponha de estações de observação "convencionais".

4.3 OBSERVAÇÕES FINAIS

É frequentemente referido nas publicações da especialidade, o carácter multidisciplinar e multifuncional das técnicas de detecção remota. Julga-se que tal facto ficou uma vez mais demonstrado durante a apresentação deste trabalho, em particular, no próprio enunciado das propostas de acção futura.

Na verdade, a caracterização e preservação do meio ambiente, nomeadamente do meio aquático e, neste, do mar, é assunto que respeitará a todos, mas em particular àqueles que, por gosto ou dever de ofício, delas se ocupam nos seus mais diversos aspectos, com vista a uma exploração racional dos recursos nele disponíveis e contra acções menos responsáveis, de consequências quase irreparáveis.

Se a separação por "disciplinas" dos diversos campos da Ciência, nomeadamente os que se reportam ao estudo da Terra, se pode considerar necessária e



fundamental para uma exploração mais profícua de aspectos especializados; não se deve perder de vista o "todo" que constitui a realidade à qual se aplicam os resultados parciais obtidos em cada um desses campos.

A Detecção Remota apresenta-se como uma das técnicas e/ou metodologias de trabalho mais capazes de superar algumas das limitações da informação que temos sobre a realidade que nos rodeia, em permanente mutação, constituindo, ao mesmo tempo, um possível elo de ligação entre muitos dos sectores do conhecimento científico que dela se ocupam.

A "visão" integrada que proporciona da geografia do nosso planeta exige a contribuição sectorial referida, para uma exploração eficaz do potencial considerável de informação que veicula.

Este trabalho, além de tentar satisfazer um requisito legal respeitante à Carreira de Investição em que se insere o seu autor, pretendeu ser um contributo para uma chamada de atenção da necessidade de aproximação dos técnicos e cientistas portugueses que se ocupam do estudo e gestão dos recursos naturais, pela utilização de uma das técnicas de futuro mais promissor.

Ao concluí-lo e submetendo-o à apreciação pública, o autor exprime a sua convicção de o ter realizado com isenção científica, interessado que está na compreensão e resolução dos problemas que se apresentam na utilização de uma técnica nova, numa área em que se "tateia ainda e o chão se não apresenta firme", para a sua aplicação prática e, deste modo, constituir um instrumento positivo para o desenvolvimento social, económico e tecnológico do País.

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Janeiro de 1986



Eduardo Manuel Oliveira
Assistente de Investição

APENDICE A

PRINCIPIOS FISICO-MATEMATICOS DA DETECCAO REMOTA

Da mais insénuas das fotografias familiares ou turísticas à mais sofisticada técnica de detecção remota dos radares de abertura sintetizada ou dos radiómetros de micro-ondas, passando pela fotografia aérea ou pelos radiómetros passivos multiespectrais instalados a bordo dos satélites de observação da Terra, há todo um conjunto de leis da Física, devidamente apoiadas pela Matemática, que dão o suporte científico necessário à detecção remota, para a obtenção dos registos nas melhores condições e para a sua correcta interpretação.

Resumem-se pois neste Apêndice os princípios básicos da Radiação Electromagnética, caracteriza-se a radiação solar e a propagação desta na atmosfera.

A.1 A RADIAÇÃO ELECTROMAGNETICA

A.1.1 Definições e Conceitos

Para efeitos dos estudos de detecção remota, pode dizer-se que a Radiação Electromagnética (REM), também designada por Energia Electromagnética ou Energia Radiante, é uma forma de energia originada pela variação no tempo de um Campo Eléctrico ou Magnético propagando-se sem necessidade de um meio material de suporte segundo ondas transversais e interagindo com a matéria.

De acordo com Maxwell, esta forma de energia é descrita por um Campo Eléctrico e por um Campo Magnético, oscilando em fase um com o outro mas em planos perpendiculares entre si.

As equações de Maxwell descrevem esta propagação num meio qualquer, o qual é caracterizado pelas constantes Dieléctrica (ϵ) e Magnética (ou permeabilidade magnética, μ) e que no vácuo tomam os seguintes valores:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

Entre estas duas constantes - existe uma relação que dá a velocidade de fase ou de propagação:

$$c = \frac{1}{(\epsilon_0 \mu_0)} \approx 3 \times 10^{10} \text{ cm/s} \quad (\text{A-1})$$

ou seja, a velocidade da luz.

A.1.1.1 Grandezas Básicas e Nomenclatura

A formulação de Maxwell sobre a REM surge-na sob a forma de onda, ou, para ser mais preciso, da conjugação de dois campos de forças ondulatórias indissociáveis, o eléctrico e o magnético.

Associada à propagação, existe um transporte de energia que é proporcional ao quadrado da amplitude das ondas em presença e é dada pela equação de Poynting (também designada por vector de Poynting, visto considerar produtos vectoriais entre os vectores campos):

$$\vec{P} = \left(\frac{c}{4\pi} \right) (\vec{E} \wedge \vec{H}) \quad (\text{A-2})$$

Dado tratar-se de ondas, define-se um conjunto de grandezas de modo semelhante a outros tipos de ondas. Assim:

1- Período (T):

2- Frequência (f):

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{A-3})$$

3- Pulsação (ω):

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{A-4})$$

4- Comprimento de Onda (λ):

5- Número de Onda (K):

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{A-5})$$

Entre algumas destas grandezas são válidas as seguintes relações:

$$c = \lambda f \quad (A-6)$$

$$K^2 = \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \quad (A-7)$$

Tal como em outros tipos de onda, são igualmente observáveis na REM os fenómenos de difracção (contorno, seguido de propagação lateral, da extremidade de um obstáculo colocado na direcção de propagação) e de refracção (alteração da direcção de propagação na fronteira entre dois meios de constantes dieléctricas diferentes).

Neste último caso, chama-se Índice de Refracção à relação entre as velocidades de propagação num determinado meio e no vazio:

$$\eta = c/v \quad (A-8)$$

em que 'c' é a velocidade da luz no vazio e 'v' é a velocidade da luz no meio em estudo ($v = (e\mu)^{-1/2}$).

Da relação (A-6) pode inferir-se que a REM poderá propagar-se segundo ondas de determinados e variados comprimentos de onda ou da sobreposição de vários, dando lugar ao conceito de componentes espectrais da REM.

É um conceito fundamental porquanto alguns materiais manifestam comportamentos diferenciados em função do comprimento de onda da radiação neles incidente. Está-se deste modo a falar de 'Assinatura Espectral' dos objectos, conceito muito utilizado em detecção remota tanto na fase de preparação da campanha de observação como na de interpretação e análise da informação obtida, processo designado por 'Classificação'.

Tratando-se de uma forma de energia, a sua quantificação e definição de algumas grandezas com ela relacionadas são fundamentais em todos os passos de uma experiência de detecção remota: concepção dos equipamentos sensores, caracterização dos objectos, interpretação e análise, etc.

No quadro A-I listam-se estas grandezas, assinalando-se os símbolos por que são representadas, bem como as unidades em que se exprimem.

Quadro A-I

Grandezas Características da Radiação Electromagnética

Designação	Símbolo	Unidades	Definição
Energia Radiante	Q	J,ers,kWh	Quantidade de energia
Densidade de Energia	$W=dQ/dV$	J/m ³ ,ers/m ³	Energia por unidade de volume
Fluxo de Energia	$\Phi=dQ/dt$	W,ers/s	Energia por unidade de tempo
Irradiância	$E=d\Phi/dA$	W/m ²	Energia recebida por unidade de área, de todo o hemisfério
Poder Emissivo	$M=d\Phi/dA$	W/m ²	Energia emitida por unidade de área, para todo o hemisfério
Intensidade Radiante	$I=d\Phi/d\omega$	W/sr	Fluxo radiante numa direcção
Radiância	$L=dI/(dA\cos(\theta))=$ $=d\Phi/(d\omega dA\cos(\theta))$	W/sr/m ²	Intensidade por unidade de área (θ é o ângulo zenital relativo à superfície)

Algumas das grandezas listadas no quadro A-I são também função do comprimento de onda segundo o qual são observadas ou quantificadas. Fala-se assim de grandezas espectrais.

A.1.1.2 O Espectro Electromagnético

O espectro electromagnético (EEM) é o resultado de uma espectroscopia de uma radiação electromagnética, da qual se pretende saber como varia com o comprimento de onda (ou com a frequência) uma determinada forma de energia electromagnética (de emissão, de reflexão, de transmissão ou de absorção, p.ex.) ou um seu derivado (Emissividade, Reflectância, Transmissividade, Absorvidade, etc.)

Teoricamente, a REN tem um domínio semi-infinito de comprimentos de onda ($0 < \lambda < \infty$), no qual se distinguem algumas zonas características (figura A.1):

1- até ao ultra-violeta (UV, $\lambda < 350\text{nm}$):

Nesta zona ainda se distinguem os comprimentos de onda da Radiação Gama ($\lambda < 1\text{Å}$), Radiação X ($0,05\text{Å} < \lambda < 100\text{nm}$) e Radiação UV ($100\text{Å} < \lambda < 350\text{nm}$).

2- Visível ($400\text{nm} < \lambda < 760\text{nm}$):

São característicos os seguintes comprimentos de onda desta zona, também designados por cores: azul ($\lambda \approx 460\text{nm}$), verde ($\lambda \approx 530\text{nm}$), laranja ($\lambda \approx 550\text{nm}$) e vermelho ($\lambda \approx 650$ a 760nm).

3- Infravermelhos (IV; $760\text{nm} < \lambda < 1.6\mu\text{m}$):

Distinguem-se aqui também duas zonas: IV próximo ou actínico ($800\text{nm} < \lambda < 1.1\mu\text{m}$, por ser resistível ainda em películas fotográficas), IV térmico ($3\mu\text{m} < \lambda < 14\mu\text{m}$, por corresponder à gama de comprimentos de onda de emissão de energia pelos corpos terrestres às temperaturas ambientes (≈ 300 graus K)).

4- Altas frequências ou de micro-ondas ($1\text{mm} < \lambda$):

Nesta zona também se distinguem os comprimentos de onda de actuação dos radares ($1\text{mm} < \lambda < 1\text{m}$), as ondas de rádio ($5\text{cm} < \lambda < 5\text{km}$) e as ondas áudio.

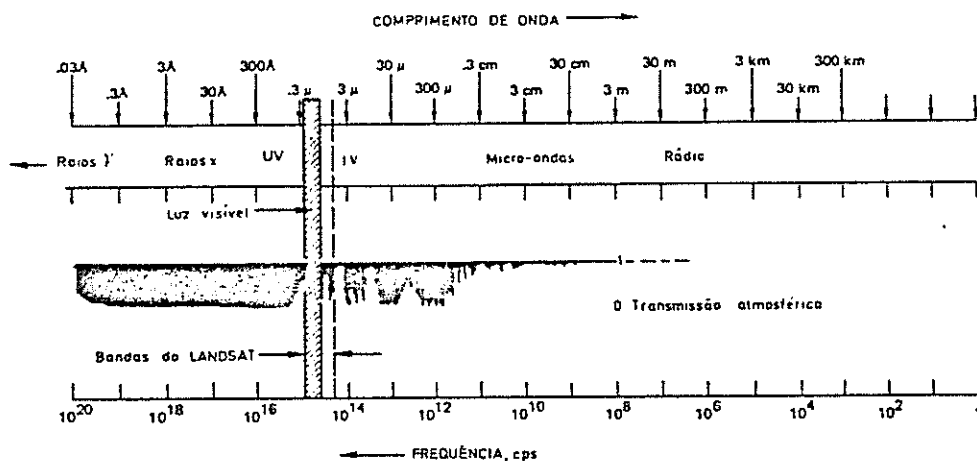


Figura A.1
Espectro Electromagnético

A.1.2 Propriedades da Radiação Electromagnética

A.1.2.1 Polarização

Diz-se que uma REM é polarizada quando o vector campo eléctrico (ou o campo magnético) oscila num plano determinado.

Para uma radiação qualquer, não polarizada, consideram-se, em geral, dois planos preferenciais relativamente aos quais a radiação pode ser polarizada: um plano vertical, originando o que se costuma designar por uma 'Polarização Vertical', e um plano horizontal dando origem à 'Polarização Horizontal'.

Chama-se 'Polarização Vertical' àquela em que o plano de polarização contém a direcção de propagação e a normal à superfície sobre a qual incide a radiação no ponto de incidência. Da definição, resulta que este plano de polarização é normal ao plano tangente à superfície no ponto de incidência.

Chama-se 'Polarização Horizontal' àquela em que o plano de polarização contém a direcção de propagação e é normal ao plano de polarização vertical. Neste caso, porque um dos vectores de campo oscila num plano paralelo ao plano tangente à superfície no ponto de incidência, também se designa por 'Polarização Paralela'.

Estas noções de polarização são frequentemente utilizadas em detecção remota, particularmente com radares e no estudo da reflectividade dos materiais.

Os radares são aparelhos fundamentalmente constituídos por um Emissor de REM e por um Receptor da radiação reflectida pelos objectos sobre os quais incidiu a radiação emitida, partilhando ambos uma Antena, a que se junta o Amplificador e o Resistador.

Através da Antena, é possível controlar e/ou seleccionar não só a intensidade e a frequência de emissão como também a própria direcção (melhor dizendo, o plano) de polarização. O receptor permite, de igual modo, seleccionar a polarização mais adequada à recepção. As polarizações mais utilizadas nos radares são precisamente a 'Vertical' e a 'Horizontal'.

Nos radares em que o resíduo do eco se faz sob a forma de imagens (imagens radars), estas podem ser obtidas segundo uma das seguintes quatro combinações de polarização emitida e reflectida:

- 1- HH: horizontal na emissão, horizontal na recepção;
- 2- HV: horizontal na emissão, vertical na recepção;
- 3- VH: vertical na emissão, horizontal na recepção;
- 4- VV: vertical na emissão, vertical na recepção.

As imagens obtidas segundo a 1a. ou a 4a. combinações citadas designam-se por 'Imagens de Polarização Paralela' (polarized ou like-polarized radar images). No entanto, não se deve confundir esta designação, intrínseca à obtenção da imagem, com a dada atrás, intrínseca ao fenómeno da polarização propriamente dita.

As imagens obtidas segundo a 2a. ou 3a. combinações designam-se por 'Imagens de Polarização Cruzada' (cross-polarized radar images).

A decisão em optar por alguma daquelas combinações de polarização da radiação emitida e recebida, é função dos 'objectos' presentes na cena a 'iluminar' com o feixe emitido a partir do radar, nomeadamente a textura que apresentam, relevo e rugosidade, entre outros factores. Não parece haver grandes diferenças entre a combinação HV e VH.

Se o radar de que se dispõe permitir a obtenção de imagens da cena segundo diversas combinações de polarização em simultâneo, é conveniente utilizar pelo menos duas, a HH e a HV, pois conterão certamente informação complementar uma da outra (Figura A.2).

A.1.2.2 Reflexão

No que respeita aos estudos de reflectividade, o tipo de polarização dita a quantidade de energia reflectida, através de relações nas quais intervêm os ângulos de incidência e de refração ou os índices de refração (fórmulas de Fresnel). Assim temos:

- 1- Reflectividade de Polarização Horizontal:

$$\rho_h = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \quad (A-9)$$

- 2- Reflectividade de Polarização Vertical:

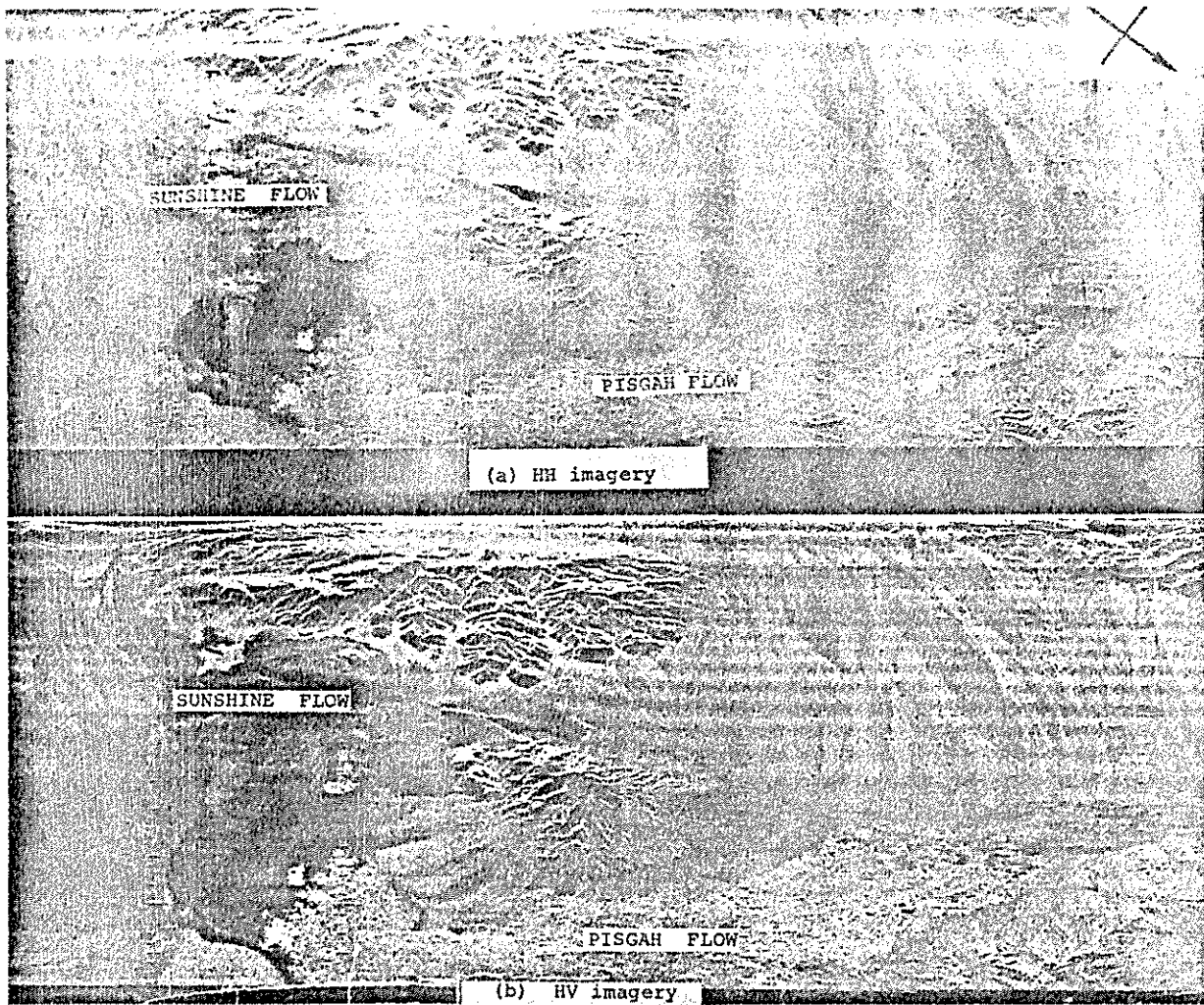


Figura A.2
 Exemplos de Polarização em Imagens de Radar
 a)-Paralela (HH);
 b)-Cruzada (HV);
 (in CAHINE 1983, LNEC cliché 83083)

$$\rho_v = \frac{\text{tg}^2(\theta_i - \theta_r)}{\text{tg}^2(\theta_i + \theta_r)} \quad (\text{A-10})$$

em que:

θ_i = ângulo de incidência;
 θ_r = " " " refração;

os quais verificam a Lei de Snell;

$$\frac{\text{sen}(\theta_i)}{\text{sen}(\theta_r)} = \eta \quad (\text{A-11})$$

com η = Índice de Refração do meio refractivo relativamente ao meio da radiação incidente.

A Reflectividade total é dada por:

$$\rho_t = \frac{1}{2} \left[\frac{\operatorname{tg}^2 (\theta_i - \theta_r)}{\operatorname{tg}^2 (\theta_i + \theta_r)} + \frac{\operatorname{sen}^2 (\theta_i - \theta_r)}{\operatorname{sen}^2 (\theta_i + \theta_r)} \right] = \frac{1}{2} (\rho_v + \rho_h) \quad (\text{A-12})$$

Acrescenta-se que, se o meio for dispersivo, i.e., se o Índice de Refracção for variável com o comprimento de onda, as Reflectividades horizontal e vertical atrás citadas serão isuslmente função do comprimento de onda.

Chama-se 'Ângulo de Brewster (θ_b)' ao valor do ângulo de incidência que anula a Reflectividade de polarização vertical, ou seja, o ângulo a partir do qual toda a energia incidente de polarização vertical é refractada.

Segundo TESSIER 1973, o ângulo de Brewster (θ_b) para os meios dieléctricos é dado por:

$$\theta_b = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[(\epsilon_i / \epsilon_r)^{1/2} \right] \quad (\text{A-14})$$

em que ϵ_i e ϵ_r representam as constantes dieléctricas dos dois meios em presença(*).

Para incidências normais às superficies tem-se:

$$\rho_h = \rho_v = \frac{[\operatorname{tg} (\theta_b) - 1]^2}{[\operatorname{tg} (\theta_b) + 1]^2} = \frac{(1 - \eta)^2}{(1 + \eta)^2} \quad (\text{A-15})$$

A.1.2.3 Efeito de Doppler

Designa-se por efeito de Doppler à alteração da frequência de emissão tal como percebida por um receptor devido ao movimento relativo das fontes emissoras e receptora.

Entre estas duas frequências existe a seguinte relação:

(* - Para a água, o ângulo de Brewster é de 53 graus, aproximadamente.

$$f_r = f_e \frac{1 - v/c}{[1 - (v/c)^2]^{1/2}} \cos(\theta) \quad (A-16)$$

com:

v = velocidade relativa das fontes emissora e receptora;

c = velocidade da luz;

θ = ângulo entre a direcção do movimento e a direcção emissor-receptor.

Se a velocidade relativa de duas fontes for consideravelmente inferior à da luz ($(v/c) \ll 1$), uma relação simplificada permite calcular a diferença de frequências:

$$df = f_e (v/c) \cos(\theta) \quad (A-17)$$

O efeito de Doppler é utilizado nos radares, e particularmente nos de abertura sintetizada.

De facto, este equipamento instalado a bordo de um avião ou de um satélite, animado de uma velocidade v relativa ao solo, emitindo uma frequência f , receberá o eco com uma frequência diferindo de f de uma quantidade dada por:

$$df = 2f (v/c) \cos(\theta) \quad (A-18)$$

em que o factor 2 nela interveniente resulta do percurso nave-solo (incidência) e solo-nave (reflexão).

E deste modo que se conseguem determinar com grande precisão, entre outros parâmetros, altitudes, alturas de ondas do mar (radares altímetros), velocidades e direcções de vento (difusómetros, scatterometers).

A.1.2.4 Outras propriedades

Outras propriedades da REM (difusão, absorção, etc.) são analisadas mais adiante na sua interacção com a matéria, nomeadamente com a atmosfera. Não se abordam, porém, a Fluorescência, a Fosforescência nem o Efeito de Raman, por terem menos interesse no tipo de estudos de que se ocupa o presente trabalho.

A.1.3 Fontes de Radiação Electromagnética

Da definição de REM poderá concluir-se que qualquer variação temporal de um campo eléctrico ou de um campo magnético constituirá uma fonte de radiação electromagnética.

As fontes de REM podem ser de dois tipos, naturais ou artificiais, sendo caracterizadas pelo espectro da radiação emitida.

Consoante a forma do espectro, assim este se classifica em:

- 1- espectro de riscas, quando a energia emitida se concentra num número discreto de frequências;
- 2- espectro de bandas, quando a energia emitida se concentra num conjunto discreto de frequências, caracterizadas por um valor central e uma largura de banda;
- 3- espectro contínuo, quando a energia emitida varia de forma contínua com a frequência.

As fontes naturais, como o Sol e a própria Terra, emitem segundo um espectro contínuo, mas algumas fontes de REM utilizadas em detecção remota, como as antenas dos radares, emitem segundo um espectro de riscas.

Analisam-se em seguida algumas fontes de REM:

- 1- De origem atómica e molecular;
- 2- Produzida pelos corpos;
- 3- A radiação do corpo negro;
- 4- A radiação solar;

4.1.3.1 Radiação Electromagnética de Orizem Atómica e Molecular

A evolução dos conhecimentos no domínio da radiação electromagnética esteve e tem estado intimamente ligada ao progresso dos conhecimentos sobre a estrutura atómica e molecular da matéria.

De entre os numerosos estudiosos neste campo, destaca-se Planck que, com a sua teoria do "quantum" de luz, em 1900, introduz o conceito de emissão descontínua de energia, traduzida pela expressão

$$E = hf \quad (A-20)$$

em que:

$h = 6.6252E-34$ Js, constante de Planck;

f = frequência segundo a qual é emitida ou absorvida a quantidade de energia E .

Inerente a esta expressão está o modelo de arranjo dos electrões em torno do núcleo do átomo: agrupados num certo número de "órbitas" às quais correspondem determinados níveis de energia fundamentais, e que no seu todo definem o nível energético do sistema (do átomo), caracterizando-o relativamente a outros.

Quando solicitado, por um campo electromagnético ou por colisão com outras partículas, algum ou alguns dos electrões poderão ver alterados os níveis de energia em que se encontram (mudar de órbita, numa visualização "geométrica"), se a acção exercida for de intensidade energética igual à diferença de energia entre quaisquer dois níveis electrónicos de energia fundamental do átomo.

Nesta circunstância, o "desequilíbrio" causado é "compensado" pela emissão de energia se há transição de um nível energético mais elevado para um menos elevado, ou pela absorção no caso contrário, e de valor igual à diferença dos níveis energéticos entre os quais se dá a transição.

Este valor, a que Planck chamou "quantum" de luz, é dado pela expressão (A-20), pelo que a "transferência" de energia é feita segundo uma frequência $f = \Delta E/h$.

Um registo espectrográfico desta reacção atómica mostrará um conjunto de frequências, ou de comprimentos de onda, discreto segundo os quais se dá a emissão de energia. É um espectro de riscas por esse motivo.

Um aspecto importante do comportamento atómico no que respeita à emissão ou absorção de energia é o facto das frequências envolvidas serem somente

dependentes das perdas ou ganhos de energia envolvidos; as quais, por sua vez, caracterizam os diversos tipos de átomos. Por outras palavras, o espectro de raios de um átomo, constitui a 'Assinatura Espectral' desse átomo e é, assim, um instrumento de identificação dos diversos átomos conhecidos.

As moléculas podem emitir REM por processos idênticos, mas por serem constituídas por agrupamentos de átomos, algumas das quais de átomos diferentes, a forma de radiação é mais complexa.

Além disso, o arranjo orbital dos electrões atómicos é consideravelmente modificado quando os átomos são integrados em moléculas, pelo que é de esperar respostas espectrais de emissão diferentes das obtidas quando considerados individualmente.

Assim, os níveis energéticos associados à estrutura da molécula correspondem, quer ao do movimento orbital dos electrões atómicos no seu arranjo molecular, quer aos movimentos vibracionais dos núcleos, quer aos movimentos rotacionais da molécula propriamente dita. Resultam pois inúmeras possibilidades de 'transferência' de energia capaz de emitir radiação electromagnética, pelo que o espectro de radiação é agora descrito não por um conjunto discreto de frequências mas por um conjunto de bandas de frequências.

Por este motivo, o espectro é agora designado de 'Espectro de Banda' mas, curiosamente, é ainda identificador do tipo de moléculas.

Do conjunto de bandas espectrais registadas numa espectrografia molecular, verifica-se que as de menor comprimento de onda (maior frequência) são devidas ao movimento orbital dos electrões (região do ultravioleta), o movimento vibracional emite na região do infravermelho e o rotacional na gama das micro-ondas.

A.1.3.2 Radiação Electromagnética Produzida pelos Corpos

Os corpos são constituídos por agrupamentos de moléculas pelo que é de esperar também uma maior complexidade nas suas características espectrais, particularmente na sua capacidade de radiarem energia electromagnética.

Como se viu no caso atómico e molecular, a radiação da energia electromagnética é função das ligações ou dos movimentos permitidos entre os elementos constituintes (electrões, núcleo, moléculas) e essas ligações determinam os estados energéticos possíveis, conseqüentemente, o tipo de resposta espectral ou, por

outras maneiras, a forma de radiação de energia electromagnética.

Dadas as ligações existentes entre as moléculas de um corpo, as possibilidades de vibração são/estão mais condicionadas, mas, como é sabido, estas podem ser modificadas por alteração do estado térmico do corpo.

De facto, a energia calorífica emitida por um corpo é a expressão da energia cinética de vibração das partículas que o constituem. Daí que a radiação electromagnética produzida seja função da temperatura a que se encontra o corpo. E assim, o

Princípio de Prévost:

"Todo o corpo cuja temperatura seja superior ao Zero Absoluto, emite radiação electromagnética".

Este é um princípio fundamental da REM dos corpos ou da teoria da radiação electromagnética em geral.

O espectro electromagnético da radiação emitida (ou absorvida) pelos corpos não é descontínuo como no caso atómico e molecular atrás descrito e é dependente da temperatura a que se encontra o corpo.

No estudo da REM dos corpos, tem interesse a consideração de um corpo modelo ou ideal relativamente ao qual se definem um certo número de propriedades baseadas precisamente no estado térmico em que se encontra e no equilíbrio termodinâmico com o exterior.

A.1.4 Corpo Negro. Leis Gerais da Radiação

Chama-se 'Corpo Negro' a um corpo ideal capaz de absorver toda a radiação electromagnética nele incidente e tal que, quando em equilíbrio termodinâmico com o exterior, emite a mesma quantidade de energia recebida.

Para o corpo negro (cn) definem-se as seguintes propriedades, as quais caracterizam a radiação electromagnética em função da temperatura, decorrente do Princípio de Prévost atrás enunciado.

1- Lei de Wien, ou do Radiamento:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)} \quad (A-21)$$

2- Lei de Rayleigh-Jeans:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi k c T}{\lambda^4} \quad (A-22)$$

A aparente incompatibilidade entre estas duas leis ficou conhecida na História da Física da radiação electromagnética como a 'catástrofe do ultravioleta', por a última conduzir a valores energéticos 'infinitos' para os pequenos comprimentos de onda (altas frequências), o que não era verificado na prática.

O problema foi resolvido por Planck, na sequência da sua teoria dos 'quanta' de luz, dando lugar à:

3- Lei de Planck:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (A-23)$$

e que é a expressão do espectro de REM do corpo negro.

A expressão (A-23), para cada temperatura, tem um máximo local, cujo comprimento de onda é definido pela:

4- Lei de Wien, ou do Deslocamento:

$$\lambda_{max} T \cong 2897 \mu\text{m} \text{ } ^\circ\text{K} \quad (A-24)$$

Desta lei, conclui-se que o comprimento de onda correspondente ao máximo de energia emitida para cada temperatura, 'desloca-se' para valores mais baixos com o aumento desta, o que é verificado pela experiência:

a) Sol: $T=6000^\circ\text{K}$, $\lambda_{max} \cong 483\text{nm}$ (azul-verde);

b) Ferro ao rubro: $\lambda_{max} \cong 664\text{nm}$ (vermelho), $T \cong 4500^\circ\text{K}$.

5- Lei de Stefan-Boltzmann, ou de Energia Total:

$$M = \sigma T^4 \quad (A-25)$$

Nas expressões referidas, os parâmetros intervenientes têm os seguintes significados:

h = constante de Planck = $6.6252E-34$ Js;

k = constante de Boltzmann = $1.38E-23$ J/°K;

σ = constante de Stefan-Boltzmann = $5.6687E-8$ W/m²/°K ;

T = temperatura, em graus Kelvin;

c = velocidade da luz;

λ = comprimento de onda;

M = Poder Emissivo, ou energia emitida.

Pode dizer-se que, pelo princípio da conservação de energia, a totalidade de energia incidente num corpo é "decomposta" em 3 parcelas: energias absorvida, transmitida e reflectida

$$E_i = E_a + E_t + E_r \quad (A-26a)$$

ou, se se trata de densidade de energia (ou energia monocromática),

$$E_i(\lambda) = E_a(\lambda) + E_t(\lambda) + E_r(\lambda) \quad (A-26b)$$

definindo-se então os seguintes 3 parâmetros:

1- Absorvidade (espectral ou total):

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}; \quad \alpha(\lambda) = \frac{E_a(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (A-27a)$$

2- Transmissividade, ou transmitância:

$$\tau = \frac{E_t}{E_i}; \quad \tau(\lambda) = \frac{E_t(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (A-27b)$$

3- Reflectividade, ou reflectância:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} \quad (A-27c)$$

tendo-se:

$$I = \alpha + \tau + \rho \quad (\text{A-28a})$$

$$I = \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) \quad (\text{A-28b})$$

Da definição de corpo negro, para este corpo tem-se, e para qualquer comprimento de onda:

$$\tau_{cn} = \rho_{cn} = 0 \quad \alpha_{cn} = 1 \quad (\text{A-29})$$

Por analogia, define-se Corpo Branco aquele que reflete toda a energia nele incidente:

$$\tau_{cb} = \alpha_{cb} = 0 \quad \rho_{cb} = 1 \quad (\text{A-30})$$

Os corpos reais situam-se entre estes dois casos extremos, idênticos, podendo, no entanto, em certas gamas de comprimento de onda, comportarem-se, aproximadamente, como corpos negros ou como corpos brancos.

Considere-se agora um corpo real sujeito à Irradiação $E(\lambda)$ proveniente de um corpo negro. Quando em equilíbrio, o referido corpo disporá da capacidade emitir energia $M(\lambda)$, pelo facto de ter absorvido energia e , consequentemente, ter aumentado a sua temperatura. Tem-se então

$$M_{cr}(\lambda) = \alpha_{cr}(\lambda) E_{cn}(\lambda) = k M_{cn}(\lambda) \quad (\text{A-31})$$

O coeficiente 'k' chama-se 'Emissividade (E)' do corpo real e traduz a relação existente entre a energia emitida por um corpo e a energia que um corpo negro emitiria se estivesse à mesma temperatura.

$$e(\lambda, T) = \frac{M_{cr}(\lambda, T)}{M_{cn}(\lambda, T)} \quad (\text{A-32})$$

Kirchoff mostrou que o Poder Emissivo de um corpo real e a respectiva Absorvidade não são independentes entre si, sendo o seu quociente dado por uma função universal, somente dependente da temperatura do corpo e do comprimento de onda, sendo independente da natureza do corpo (Lei de Kirchoff). Esta função universal é expressa pela lei de Planck, atrás referida.

Se o corpo for não reflector, $(\rho(\lambda, T) = 0)$, tem-se:

o que traduz um corolário da Lei de Kirchoff:

'Em condições de equilíbrio termodinâmico, todo o corpo absorvedor de energia em determinado comprimento de onda é emissor nesse mesmo comprimento de onda'.

Este princípio é de consequências práticas muito importantes, porquanto, no estudo dos corpos reais é mais acessível a determinação da Absorvidade do que da Emissividade, ϵ .

Este parâmetro pode ser considerado aproximadamente independente da temperatura (embora dependente do comprimento de onda) para a maioria das substâncias naturais, com excepção daquelas em que, consoante o estado térmico, assim se apresentam num ou noutro estado físico (líquido, sólido ou gasoso). É o caso da água, cuja emissividade varia consoante se trate de gelo, de água líquida ou de vapor de água (a neve também tem uma Emissividade diferente da do gelo).

Esta característica resulta do diferente arranjo molecular apresentado pelas substâncias que mudam de estado com a temperatura, originando modos de vibração diferentes e, conseqüentemente, modos diferentes de emissão de energia.

E a partir da Emissividade que se determina a temperatura dos corpos reais por detecção remota, através do conceito de 'Temperatura de Brilho' ou 'Aparente' (brightness temperature):

$$T_{\text{brilho}} = \epsilon T_{\text{real}} \quad (A-34)$$

traduzindo a temperatura a que se encontraria um corpo negro para emitir uma quantidade de energia igual à recebida pelo sensor.

A.1.5 A Radiação Solar

O Sol é a maior fonte de energia electromagnética disponível na Terra, sendo também a mais utilizada nas aplicações de detecção remota.

E, de facto, é energia solar que se deve a ocorrência de toda a fenomenologia física e química na Terra, incluindo a própria existência da atmosfera terrestre.

A REM emitida pelo Sol distribui-se por uma larga gama de comprimentos de onda. No entanto, cerca de 99% concentra-se numa região espectral situada entre 0,15 e 4µm.

Na figura A.3, ilustra-se o espectro da radiação solar tal como é recebida no topo da atmosfera e à superfície do mar, assinalando-se também o espectro de radiação de um corpo negro à temperatura de 5900 graus Kelvin.

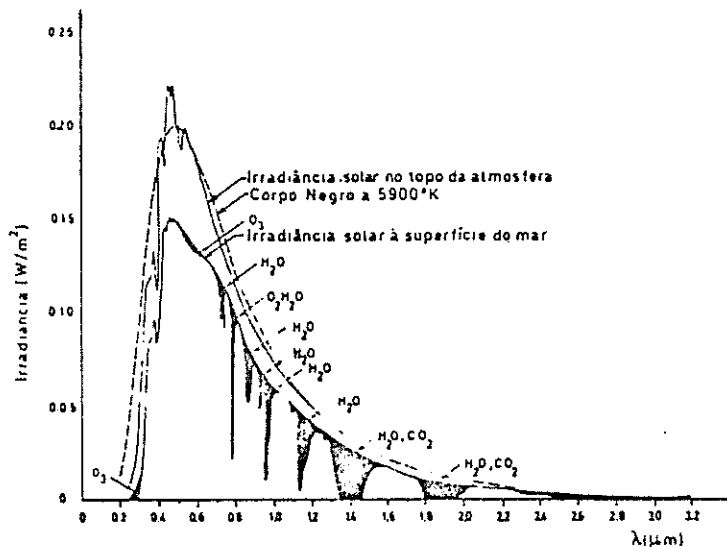


Figura A.3
Espectro da Radiação Solar

O máximo de energia solar radiante verifica-se para um comprimento de onda de 480nm (azul-verde).

Pela diferença entre as curvas do espectro no topo da atmosfera e à superfície do mar, pode fazer-se uma ideia do efeito atenuador da atmosfera na propagação entre aqueles 2 níveis de altitude.

A Irradiância solar no topo da atmosfera tem variações cíclicas devidas à elipticidade da órbita terrestre em torno do Sol, cerca de 3,4% da Irradiância média anual.

Esta variação é dada pela expressão

$$E_o(d) = E_s \left[1 + \varepsilon \cos \left(\frac{2\pi}{365} (d-3) \right) \right]^2$$

(A-35)

com:

E : excentricidade da órbita (0.01672);

d : dia Juliano (Jan1=1;...;Fev1=32;...;Dez31=365);

E_s : Constante Solar (136.8mW/cm²)(%).

Devido à curvatura da Terra, a Irradiância solar decresce da região equatorial para as polares, embora ainda sujeita às variações periódicas da inclinação do eixo de rotação relativamente ao plano da Eclítica, ao longo do ano.

Esta variação em Latitude é dada pela expressão (PEIXOTO 1981);

$$E_s(\theta(\phi)) = E_s \left[\frac{D_m}{D} \right]^2 \cos(\theta(\phi)) \quad (A-36)$$

com:

D_m = distância média da Terra ao Sol;

D = distância da Terra ao Sol no instante;

$\theta(\phi)$ = ângulo zenital na Latitude ϕ , no instante, dado por:

$$\cos(\theta(\phi)) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(t) \quad (A-37)$$

em que ' δ ' é a Declinação e ' t ' o Ângulo Horário do Sol no instante (vd. Apêndice B).

A conjugação destas expressões permite determinar a distribuição da radiação solar no topo da atmosfera em função da Latitude e ao longo do ano (Figura A.4).

(* - A Constante Solar traduz a Irradiância solar média anual, que seria recebida no topo da atmosfera se a órbita terrestre fosse circular. É, afinal, o módulo do vector de Poynting da REM Solar.

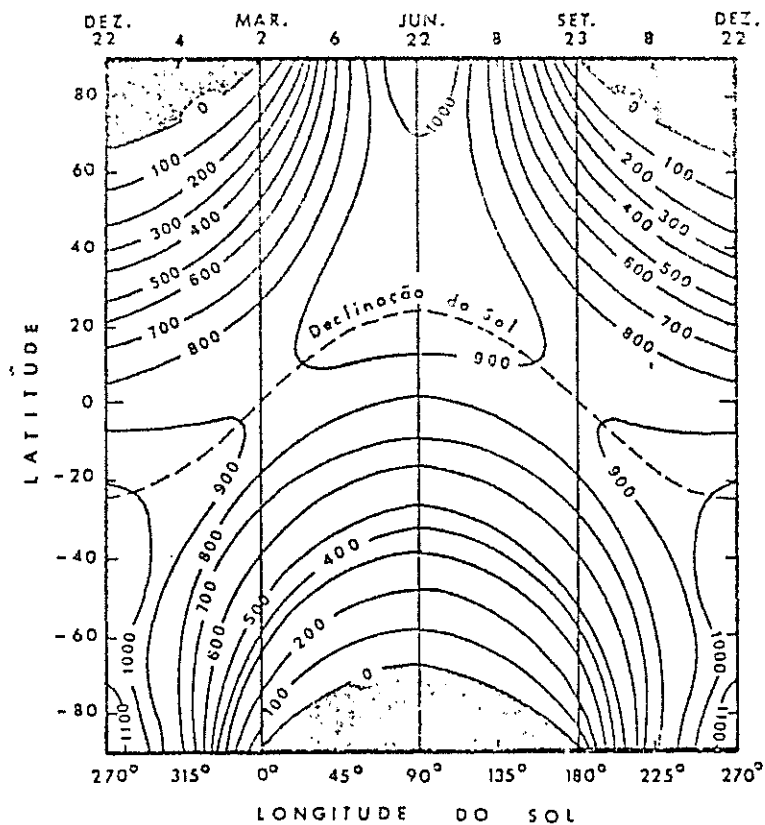


Figura A.4
 Variação Anual e em Latitude
 da Irradiância Solar no Topo da Atmosfera
 (in PEIXOTO 1981)

A.2 INTERACÇÃO DA RADIACAO SOLAR COM A ATMOSFERA

Os fenómenos de interacção da REM de origem solar com a atmosfera são dos tipos seguintes:

- 1- Absorção;
- 2- Difusão;
- 3- Refracção;
- 4- Transmissão;
- 5- Reflexão;
- 6- Difraccção e
- 7- Emissão.

A maior ou menor intensidade por que se fazem sentir está directamente relacionada com a constituição/composição da atmosfera. Outras características físicas, como a densidade e pressão, condicionam igualmente o comportamento radiométrico da atmosfera, ou seja, a propagação da radiação solar.

Dado que somente 1% da massa total atmosférica se encontra acima de 32km de altitude, nos estudos de detecção remota por satélite são desprezados os efeitos atmosféricos acima daquela altitude (CAHINE 1983).

A.2.1 Composição da Atmosfera

Em geral, em detecção remota a atmosfera é considerada ser basicamente constituída pelos dois conjuntos de substâncias seguintes:

1- Gases:

De entre estes, pelo seu comportamento radiométrico, destacam-se o Azoto (≈78%, em atmosferas secas), o Oxidénio (≈21%), o vapor de água (variável), o Dióxido de Carbono e o Ozono.

2- Partículas e/ou Aerosóis:

De distribuição e concentrações variáveis nas camadas baixas da atmosfera, são constituídas por poeiras, fumos ou gotículas de água, que se mantêm suspensas no ar devido ao vento e ao seu reduzido peso e dimensões.

Na figura A.3, identificam-se algumas regiões espectrais onde os gases citados manifestam comportamento característico.

O Dióxido de Carbono e o Vapor de Água apresentam-se como grandes absorvedores (e emissores) de energia na gama dos infravermelhos (4.3 a 15 μ m; 1.37, 1.84, 2.66, 2.74, 6.25 e 20 μ m, respectivamente). O vapor de água ainda tem uma forte absorção entre 0.7 e 2 μ m.

O Ozono é o "escudo" da superfície terrestre para a radiação ultravioleta, pela forte absorção que manifesta naquela gama de comprimentos de onda. Esta capacidade absorvente nesta região espectral é responsável pelo aumento de temperatura que se observa nas camadas superiores da atmosfera. Em torno dos 550nm, há outro pico absorvedor por parte do Ozono, embora fraco, aumentando de novo

entre os 9.6 e os 14 μ m.

O Azoto e o Oxigénio não apresentam comportamento radiométrico activo nas bandas de comprimento de onda geralmente usadas em detecção remota passiva.

O espectro de absorção e de transmissão dos gases presentes na atmosfera permitem a definição do conceito de 'janelas espectrais', de particular importância na definição de 'zonas de trabalho' útil em detecção remota passiva (p.ex., na concepção e projecto de radiómetros).

Quanto às partículas, de dimensões superiores às das moléculas gasosas, o seu comportamento radiométrico traduz-se por uma atenuação da transmissividade da radiação solar.

A sua origem pode ser natural (areias finas, cinzas e poeiras vulcânicas, partículas de água e de sal do mar, etc.) ou resultantes da actividade do Homem (fumos e outras emissões devidas a processos combustivos).

É fundamental o conhecimento das formas, das dimensões, das concentrações e do Índice Refractivo das Partículas para se poder estimar quantitativamente o seu efeito na propagação da radiação solar. Porém, a variabilidade espacial por que se caracterizam leva à consideração de um certo número de hipóteses simplificativas na elaboração de modelos de Correção Atmosférica para os estudos de detecção remota.

Um dos modelos mais usados é traduzido pela Lei de Distribuição de Junse, que relaciona a densidade atmosférica, (n), a uma altitude 'h' da superfície, com a dimensão das partículas (consideradas esféricas de raio r) e a quantidade de partículas presentes (N):

$$\frac{d}{dr} n(r, h) = a N(h) r^{-b}, \quad 0.02 \mu\text{m} < r < 10 \mu\text{m} \quad (\text{A-38})$$

com 'a' e 'b' constantes, tomando esta última os valores 4 e 5 consoante a Visibilidade Atmosférica(*), V , é inferior ou superior a 10km, respectivamente, e $N(h)$ dado por (STURM 1980):

(*) - conceito meteorológico, definido mais adiante.

$$N(h) = \begin{cases} 55 \exp\left(-\frac{(h-5.5)}{(0.886+0.0222V)}\right) & h < 5.5 \text{ km} \\ 55 & 5.5 < h < 18 \text{ km} \\ 55 \exp\left(-\frac{(h-18)}{3.77}\right) & h > 18 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{A-39})$$

A.2.2 Propagação da Radiação Solar na Atmosfera

A.2.2.1 Equação de Transferência Radiativa

A propagação da REM de origem solar na atmosfera é matematicamente descrita pela Equação de Transferência Radiativa, ETR. Embora expressa sob diversas formas, traduz basicamente a conservação de energia num ponto do espaço atmosférico no qual incide uma certa quantidade de energia I , que vai ser absorvida, difundida e (re)emitida:

$$\frac{d}{dz} I(z, \lambda, \theta, \phi) = -c(z, \lambda) I(z, \lambda, \theta, \phi) + I'(z, \lambda, \theta, \phi, \theta', \phi') \quad (\text{A-40})$$

A primeira parcela do 2o. membro exprime a perda ou consumo de energia devida à absorção, sendo $a(z, \lambda)$ um coeficiente de absorção. A 2a. parcela traduz os efeitos difusores e emissores resultantes da interacção da REM no ponto z , podendo, assim ser decomposta em 2 outras que traduzam os referidos efeitos (supostos independentes):

$$I' = I'_{df} + I'_{em} = b(z, \lambda) \int_0^{2\pi} d\phi' \int_0^\pi d\theta' [I(z, \lambda, \theta, \phi) p(\theta, \phi, \theta', \phi') \sin(\theta') \cos(\theta)] + \\ + \varepsilon(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1\right)} \quad (\text{A-41})$$

na qual se reconhece a expressão de Planck, sendo $p(\theta, \phi, \theta', \phi')$ a Função de Fase e que traduz a probabilidade de um fóton incidente segundo a direcção (θ, ϕ) ser desviado para a direcção (θ', ϕ') .

A resolução da ETR é difícil, sobretudo por não se conhecer com exactidão a composição da atmosfera (aerosóis, que intervêm no processo de difusão). Por esse motivo, recorre-se a soluções numéricas baseadas em modelos da função $p(\theta, \phi, \theta', \phi')$, os quais, por sua vez, dão origem aos conceitos de Difusão Simples (single scattering, os fótons são deflectidos apenas uma vez) e de Difusão

Múltipla (multiple scattering).

A.2.2.2 Parâmetros Característicos

Devido à acção da atmosfera, a radiação solar que atinge a superfície terrestre é apenas uma fracção da disponível no topo desta. A medida de atenuação provocada é dada pela Lei de Lambert-Bouguer ou de Beer, e que permite a definição de um conjunto de parâmetros caracterizadores da propagação através da atmosfera.

Dado o valor da radiancia $L_0(\lambda)$ no topo da atmosfera, incidente segundo o ângulo $\theta (< 70^\circ)$, a radiancia disponível à superfície é dada por, de acordo com aquela lei:

$$L(\lambda, z) = L_0(\lambda) \exp\left(-\frac{1}{\cos(\theta)} \int_0^z c(\lambda, z) dz\right) \quad (A-42)$$

Ao coeficiente $c(z, \lambda)$ chama-se 'Coeficiente de Extinção' ou de 'Atenuação' ($[L^{-1}]$). O factor exponencial daquela expressão designa-se por 'Transmissividade', $T(\lambda, \theta)$, e ao integral chama-se 'Profundidade Óptica', ou 'Opacidade' (optical thickness ou optical depth), $\tau(\lambda)$:

$$\tau(\lambda) = \int_0^z c(\lambda, z) dz \quad (A-43a)$$

$$T(\lambda, \theta) = \exp\left(-\frac{1}{\cos(\theta)} \tau(\lambda)\right) \quad (A-43b)$$

O Coeficiente de Atenuação pode ser decomposto em duas parcelas, a referente à Absorção (Coeficiente de Absorção, $a(z, \lambda)$) e a referente à Difusão ($b(z, \lambda)$):

$$c(z, \lambda) = a(z, \lambda) + b(z, \lambda) \quad (A-44a)$$

Dada a singularidade do comportamento dos componentes atmosféricos na propagação da radiação solar, é usual considerarem-se ainda aqueles parâmetros subdivididos nas suas componentes Molecular e Particular (Partículas, aerossóis):

$$c(z, \lambda) = c_M(z, \lambda) + c_A(z, \lambda) = a_M(z, \lambda) + a_A(z, \lambda) + b_M(z, \lambda) + b_A(z, \lambda) \quad (A-44b)$$

Chama-se ainda 'Albedo de Difusão Simples' ao parâmetro:

$$\omega(\lambda) = \frac{b(\lambda)}{c(\lambda)} \quad (A-44c)$$

que, para a maioria dos gases tem o valor aproximado unitário, à exceção do Ozono, por apresentar uma banda de absorção na região 500-600nm do espectro, valendo aquele valor 0,04.

Da definição de Opacidade e da decomposição do Coeficiente de Atenuação, também se pode exprimir:

$$\tau(\lambda) = \tau_M(\lambda) + \tau_A(\lambda) + \tau_o(\lambda) \quad (A-44d)$$

em que a última parcela explicita o comportamento do Ozono.

Através do Coeficiente de Atenuação, $c(z, \lambda)$, define-se ainda 'Visibilidade Atmosférica', V (em quilómetros), pela relação:

$$V = \frac{3.912}{c(0.550)} \quad (A-45)$$

expressa relativamente ao comprimento de onda 550nm, por ser a este que o olho humano apresenta maior sensibilidade. Traduz a distância à qual a Transmissividade Atmosférica horizontal ao nível do mar é reduzida para 2%.

No estudo da difusão pelos aerossóis e outros componentes da atmosfera, define-se a 'Função de Fase', e que 'traduz a probabilidade' de um feixe incidente numa partícula segundo uma dada direcção ser desviada segundo outra. Supõe-se que esta função é dependente das dimensões estimadas das partículas (p.ex., por uma lei de Junge) e do ângulo entre as duas direcções (γ), e não dependente do comprimento de onda.

Algumas expressões correntemente utilizadas para esta função são:

1- Difusão Simples (AUSTIN 1982):

$$p(\gamma) = \frac{3}{4} [(1 + \cos^2(\gamma))] \quad (A-46a)$$

$$P(\gamma) = x \frac{(1-k_1^2)}{[1+k_1^2-2k_1 \cos(\gamma)]^{3/2}} + (1-x) \frac{(1-k_2^2)}{[1+k_2^2-2k_2 \cos(\gamma)]^{3/2}} \quad (A-46b)$$

com x , k_1 e k_2 parâmetros caracterizadores da atmosfera (0,9168, 0,7130, -0,7596, respectivamente, para uma atmosfera de tipo L, GORDON 1980).

A.2.2.3 A Absorção na Atmosfera em Aplicações de Detecção Remota

A Absorção consiste no processo de transformação da energia incidente em outras formas de energia, geralmente, calor. Na atmosfera, são os constituintes gasosos os principais absorvedores da radiação solar incidente, e também da energia emitida pela Terra. Destacam-se neste efeito o oxigénio, o ozono, o anidrido carbónico e o vapor de água, como se viu (Figura A.3).

Na maioria das aplicações de detecção remota, pelas mesmas de comprimentos de onda em que normalmente se opera, os principais agentes absorvedores são o ozono e o vapor de água. Consoante a soma de comprimentos de onda utilizada, assim se considera mais importante a influência de um ou do outro (ou de ambos) no processo de absorção que tem lugar na propagação da radiação natural (solar, em detecção remota passiva) ou artificial (em detecção remota activa, com os radares).

Dado que este trabalho se refere à utilização de dados radiométricos da gama visível e infravermelha próxima, somente se caracteriza a acção do ozono como responsável principal pela absorção da radiação solar no percurso "descendente", desde o topo da atmosfera até à superfície terrestre, e no percurso "ascendente", desde esta após reflexão até ao radiómetro, suposto em órbita acima da atmosfera.

De facto e como se viu (Figura A.3), tanto o anidrido carbónico como o vapor de água "exercem" a sua acção absorvedora predominantemente em comprimentos de onda superiores (infravermelhos longos e micro-ondas), sendo necessária a consideração do seu efeito quando se utilizem equipamentos operando naquelas bandas espectrais (termoradiómetros e radares).

Em certa medida, pode dizer-se que à Absorção se associa o conceito de

Transmissão, em particular se houvesse não corresponder uma Absorvidade unitária. Por outras palavras, a menos de outros fenómenos associados à propagação (como a difusão e a reflexão de superfície), a existência de elementos não totalmente absorvedores numa camada de certa espessura da atmosfera induz a disponibilidade de uma energia radiante após o percurso absorvente que é proporcional ao complemento unitário da Absorvidade. Ora este factor de proporcionalidade é a Transmissividade, por definição.

O efeito absorvedor na propagação de radiação é, assim, simulado por um efeito de transmissão, ou seja, a Absorvidade representada por uma 'Transmissividade Equivalente' e, por extensão, uma 'Opacidade Equivalente', pela semelhança formal das leis de Bousquer e Beer.

Deste modo, no processo de correcção atmosférica do sinal captado pelos radiómetros, o efeito absorvedor do ozono é incluído na Transmissividade da atmosfera, cuja atenuação induzida na propagação de radiação (descendente ou incidente, ascendente ou reflectida) é provocada pela presença de outras moléculas gasosas e pelos aerossóis (os componentes Molecular e Particular da expressão A-44d).

A partir de observações sistemáticas de diferentes tipos de atmosferas e a várias Latitudes, foi possível caracterizar a 'Opacidade Equivalente' do ozono, cujos valores característicos se reproduzem no Quadro A-II, para os comprimentos de onda em que opera o radiómetro CZCS.

A.2.2.4 A Difusão na Atmosfera em Aplicações de Detecção Remota

Contrariamente à Absorção, a Difusão não envolve transformação da energia radiante em outras formas de energia, mas tão somente uma modificação da direcção de propagação inicial, ou seja, uma redistribuição espacial da energia incidente, mantendo-se todas as outras características (os mesmos comprimentos de onda, p.ex.).

Pela definição, resulta que a difusão é função da relação entre as dimensões das partículas difusoras e o comprimento de onda, concluindo-se que para determinado valor deste, a ocorrência do fenómeno da difusão é dependente das dimensões das partículas interpostas na direcção de propagação. Diz-se, então, que a difusão é selectiva.

Rayleigh, em 1909, desenvolveu uma teoria sobre a difusão da luz, exprimindo-a

Quadro A-II
Opacidade Espectral Equivalente do Ozono
(segundo VIGROUX 1953, in STURM 1981)

comprimento de onda λ (nm)	440	520	550	670	750
Latitude tropical	0.0002	0.0128	0.0215	0.0084	0.0033
Latitude média (inverno)	0.0004	0.0213	0.0356	0.0139	0.0054
Latitude média (verão)	0.0003	0.0173	0.0289	0.0113	0.0044
Latitude subártica (verão)	0.0003	0.0187	0.0312	0.0122	0.0048
Latitude subártica (inverno)	0.0005	0.0245	0.0409	0.0160	0.0062

em termos de um 'Coeficiente de Difusão, k ', função das características dos difusores (índice de refração, η ; densidade de partículas, N) e da radiação incidente (comprimento de onda, λ), dado pela expressão (PEIXOTO 1981):

$$k(\lambda) = \frac{32 \pi^3 (\eta - 1)^2}{3 N} \lambda^{-4} \quad (A-47)$$

onde se mostra ser aquele coeficiente inversamente proporcional à 4a. potência do comprimento de onda.

A semelhança da Absorção, o efeito da Difusão na atmosfera é também simulado por uma Transmissividade, traduzida de usual modo por leis formalmente semelhantes às de Bouguer e Beer atrás citadas.

A Opacidade é usualmente dada por expressões do tipo:

$$\tau = A \lambda^B \quad (A-48)$$

tomando 'A' e 'B' valores dependentes do tipo de difusores presentes na atmosfera.

A selectividade da difusão, e o próprio processo de difusão, são considerados em função de um parâmetro dado pelo quociente entre o perímetro das partículas e o comprimento de onda ($\alpha = 2\pi r/\lambda$), cujos valores permitem a consideração dos seguintes casos, em deteção remota:

- 1- Partículas de dimensões muito pequenas quando comparadas com o comprimento de onda ($\alpha \ll 1$):

Diz-se tratar-se de uma Difusão de Rayleigh ou Molecular. Para os comprimentos de onda visível e infravermelho próximo, utilizados em deteção remota passiva, são os componentes moleculares gasosos da atmosfera os responsáveis por este tipo de difusão, cujo efeito é comprovado nos dias de céu limpo, pela cor azulada que este apresenta.

De facto, dada a dependência do comprimento de onda expressa pela equação (A-47), é a radiação azul consideravelmente mais difundida do que as de maior comprimento de onda.

Neste caso, o valor da Opacidade atmosférica é dado pela expressão (LINKE 1956, in STURM 1981):

$$\tau_M(\lambda) = 0.00879 \lambda^{-4.09} \quad (A-49)$$

Com base em valores observados por TREES 1982 e aplicação de um ajustamento por mínimos quadrados, que se mostra na Figura A.5, encontraram-se para 'A' e 'B' da expressão (A-48) valores muito semelhantes aos de Linke (A=0.00882, B=-4.01, r=0.9999).

- 2- Partículas de dimensões da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda ($\alpha \approx 1$):

Mie, em 1908, mostrou que a difusão é, neste caso, inversamente proporcional ao comprimento de onda, somente, donde se conclui ser a difusão menos selectiva do que no caso anterior. A distribuição angular da radiação difusa é agora mais complexa, com predomínio na direcção de propagação relativamente à de retrodifusão (difusão anisotrópica).

DIFUSAO DE RAYLEIGH

Opacidade

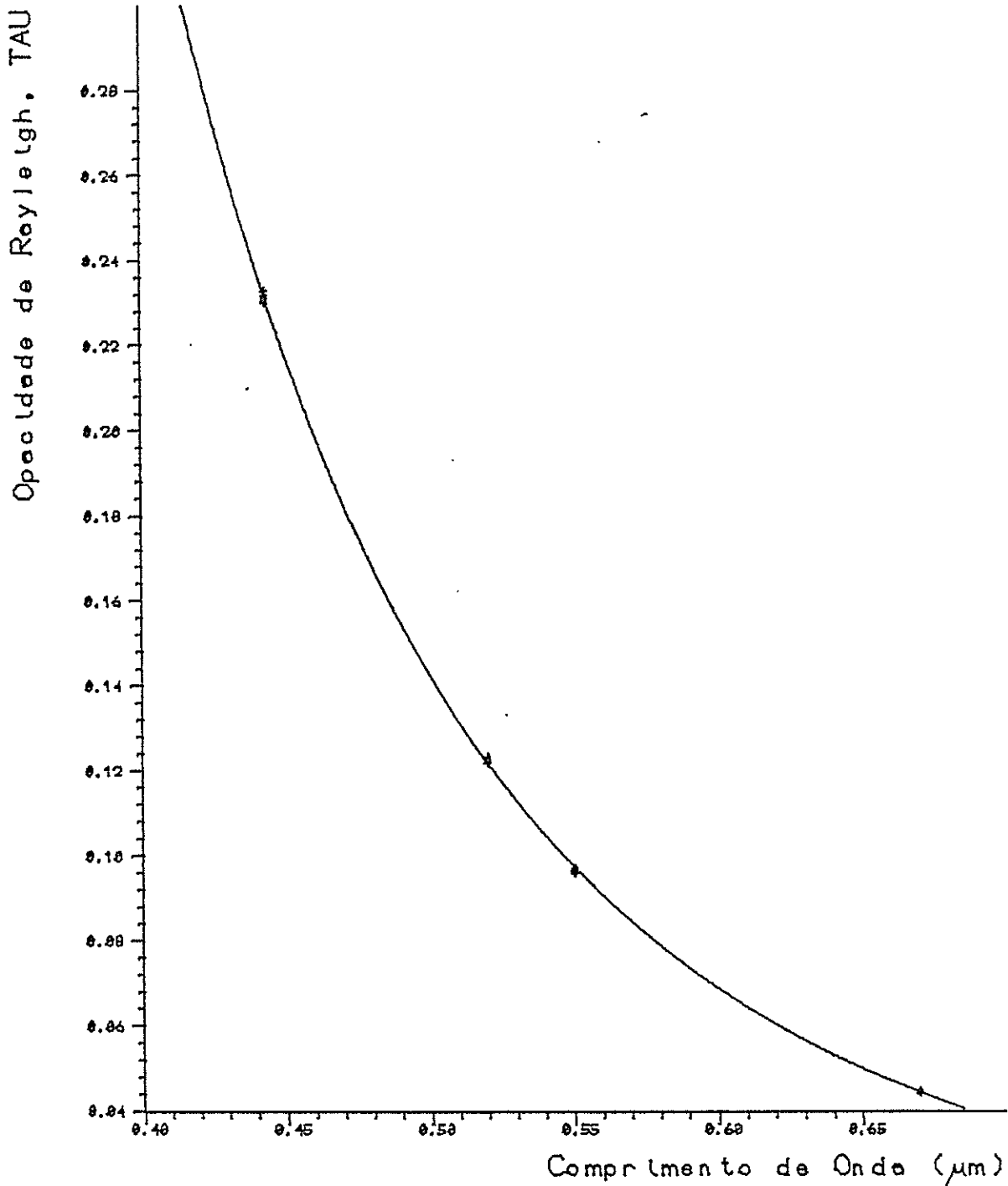
Dados de TREES, C. 1982

$$y = A_1 x^{A_2}$$

$$A_1 = 0.00882$$

$$A_2 = -4.01$$

Coefficiente de Ajustamento = 0.9999



LNEC/DH/NET/PROG. HQ.ALG(JUL/77); S.SILVA JR./E.OLIVEIRA; REVISTO POR E.OLIVEIRA(JUN/82)

Figura A.5

Difusão de Rayleish

são responsáveis por este tipo de difusão as poeiras, os flocos, os aerossóis.

De acordo com STURM 1981, citando trabalhos de WEMPE 1947, os valores de 'A' e 'B' da expressão (A-48) são muito variáveis, oscilando entre 0.01 e 0.24 (A) e 0.8 e 1.5 (B), respectivamente. A este último parâmetro dá-se o nome de 'Expoente de Angstrom'.

Alguns controvérsia tem surgido a respeito daqueles valores quando aplicados a aerossóis marinhos (partículas de sal e gotículas de água, postas em suspensão pelo vento). A partir de observações disponíveis de STURM e NYKJAER 1983, em ambiente marinho, por mínimos quadrados obteve-se a seguinte expressão para a Opacidade dos aerossóis:

$$\tau_A(\lambda) = 0.123 \lambda^{-1.73} \quad (r=0.9541) \quad (A-50)$$

que será tomada no decorrer deste trabalho, à falta de melhor informação (Figura A.6).

3- Partículas de dimensões superiores ao comprimento de onda ($\alpha \gg 1$):

Neste caso, a experiência mostrou não ser a difusão dependente do comprimento de onda. Em boa verdade, o fenómeno observado deixa de ser de Difusão para se tratar antes de Reflexão difusa, dada a não selectividade que manifesta.

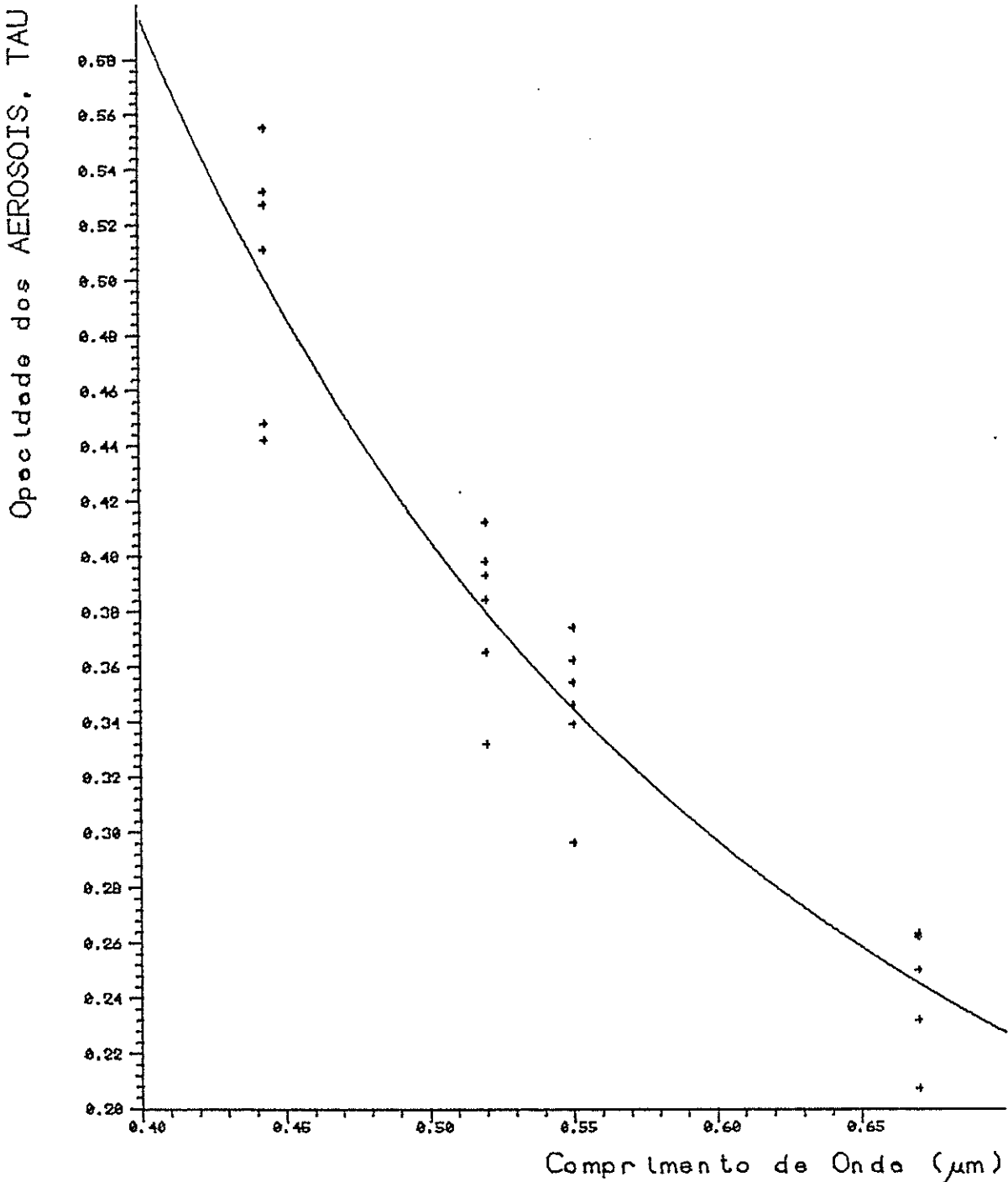
VERIFICACAO DA FORMULA DE ANGSTROM
 Opacidade dos AEROSOIS marinhos
 Dados de STURM e NYKJAER 1983

$$y = A_1 x^{A_2}$$

$$A_1 = 0.123$$

$$A_2 = -1.73$$

Coefficiente de Ajustamento = 0.9541



LNEC/DM/NET; PROG. 19. ALG/JUL/77; S. SILVA JR./E. OLIVEIRA; REVISTO POR E. OLIVEIRA (JUN/89)

Figura A.6

Verificação da Fórmula de Angstrom

Opacidade dos Aerossóis Marinhos

BIBLIOGRAFIA

AMBAR, Isabel L.

'Propriedades Ópticas da Água do Mar'

Faculdade de Ciências de Lisboa, FCL, Lisboa, 1980.

BECKER, F.

'Physique Fondamentale de la Télédétection'

in Principes Physiques et Mathématiques de la Télédétection, Strasbourg,
16Ago-15Set 1978, CNES, Toulouse, 1978.

CHAHINE M. et al.

'Interaction Mechanisms Within the Atmosphere'

in Manual of Remote Sensing, Vol.I, Cap.5, 2a. Ed. ASP, 1983.

IVANOFF, Alexandre

'Facteurs Physiques, Chimiques et Biologiques Affectant la Propagation de la
Lumière dans les Eaux de Mer'

in Optics of the Sea, AGARD Lect.Ser., N61, NATO, 1973.

JERLOV, N.G.

'Marine Optics'

Elsevier, NY, 1976.

MOREL, A.

'Diffusion de la Lumière par les Eaux de Mer. Résultats Expérimentaux et Ap-
proche Théorique'

in 'Optics of the Sea', AGARD Lect.Ser., N61, NATO, 1973.

NYGARD, Kjell

'Radiance Distribution below the Sea Surface'

in Optics of the Sea, AGARD Lect.Ser., N61, NATO, 1973.

PEIXOTO, José P.

'A Radiação Solar e o Ambiente'

Col. 'O Ambiente e o Homem', Comissão Nacional do Ambiente, Lisboa, 1981.

PEIXOTO, José P.

'A Radiação Solar e o Sistema Atmosfera-Globo da Terra'

in Rev. Electricidade, N20, Lisboa, 1961.

PRIEUR, L.; MOREL, A.

'Aperçu sur les Théories du Transfert Radiatif Applicables à la Propagation dans la Mer'

in Optics of the Sea, AGARD Lect.Ser., N61, NATO, 1973.

STURM, R.

'The Atmospheric Correction of Remotely Sensed Data and the Quantitative Determination of Suspended Matter in Marine Water Surface'

in Rem.Sens. on Meteorology, Oceanography and Hydrology, A.P.Cracknell Ed., Ellis Horwood, Chicester UK, 1981.

SUITS, Gwinn H.

'The Nature of Electromagnetic Radiation'

in Manual of Remote Sensing, Vol.I, Cap.2, 2a.Ed., Am. Soc. Photogrametry, 1983.

TESSIER, R.; ALOUGES, A.

'Rappel des Bases de Physique'

in La Télédétection des Ressources Terrestres, Tarbés, 21Ago-20Set 1973, CNES-ONU, 1973.

ZANEVELD, J.R.V.

'Variation of Optical Sea Parameters with Depth'

in Optics of the Sea, AGARD Lect.Ser., N61, NATO, 1973.



APENDICE B

SISTEMAS DE COORDENADAS CELESTES E TERRESTRES. O TEMPO

A observação sumária de uma imagem de satélite ou mesmo de uma fotografia aérea faz, por vezes, esquecer um conjunto de relações analítico-geométricas existentes entre os seus pontos e entre estes e o ponto de observação.

No entanto, é fundamental conhecerem-se as condições em que a imagem foi obtida para que se possa explorar convenientemente o conteúdo nela expresso.

Algumas dessas condições referem-se às posições em que se encontram no momento da tomada de vistas os três intervenientes principais da imagem: os objectos observados (a Terra ou uma zona restrita desta), o observador (os sensores) e o iluminante (o Sol, no caso de detecção remota passiva).

Neste Apêndice, descrevem-se sumariamente os diversos parâmetros de posição ou posicionamento (coordenadas) que permitem localizar de modo inequívoco um ponto observado, bem como as noções fundamentais relativas ao Tempo.

B.1 NOÇÃO DE ESFERA CELESTE

O estudo do movimento aparente e relativo dos diversos corpos celestes faz uso de modelos conceptuais destinados a quantificar um certo número de grandezas que descrevam e expliquem de modo realista os fenómenos observados.

Um destes modelos é a 'Esfera Celeste' e que traduz uma superfície esférica imaginária, de raio incomensurável, abrangendo todo o Universo, animada de movimento de rotação aparente, no qual participam todos os corpos celestes, por projecção radial sobre a superfície.

Dadas as distâncias a que se encontram os corpos celestes em estudo, é indiferente a localização do centro da esfera, considerando-se, porém, 4 localizações privilegiadas:

- 1- no local de observação, designada por 'Esfera Celeste do Lugar' ou 'Topocêntrica';
- 2- no centro da Terra, ou 'Esfera Geocêntrica';

- 3- no centro do Sol, ou 'Esfera Heliocêntrica';
- 4- no centro de gravidade do sistema solar, ou 'Esfera Baricêntrica'.

Assim, a definição de um qualquer sistema de coordenadas apoiar-se-á em medições angulares planas e em ângulos sólidos, pela consideração de planos de referência, uma vez que os raios não são mensuráveis e para todos os efeitos considerados constantes.

B.1.1 Elementos Referenciais da Esfera Celeste

Considere-se uma 'Esfera Celeste Local' e, nesta, a linha designada por 'Vertical do Lugar' (que para efeitos desta descrição pode ser a linha de fio de prumo do lugar).

O ponto de intersecção desta linha com a Esfera Celeste, acima do lugar, designa-se por 'Zénite' do lugar. O ponto diametralmente oposto àquele tem a designação de 'Nadir' do lugar (Fig. B.1).

O plano perpendicular à Vertical do lugar passando pelo centro da Esfera é designado por 'Horizonte' do lugar. A intersecção deste plano com a Esfera é uma circunferência que, por o plano passar pelo centro, define um 'círculo máximo'.

O eixo de rotação da Terra, quando prolongado indefinidamente, intersecta a Esfera Celeste em 2 pontos denominados 'Pólos Celestes': 'Pólo Norte (PN)', o que se encontra do lado da Estrela Polar (hemisfério Norte), e 'Pólo Sul (PS)', o que se encontra do lado da constelação Cruzeiro do Sul (hemisfério Sul).

Relativamente a este eixo 'PN-PS', considere-se ainda o plano que lhe é perpendicular e passante pelo centro da esfera. Designa-se este plano, juntamente com a circunferência da sua intersecção com a Esfera, de 'Plano do Equador Celeste' ou simplesmente de 'Equador'.

Os planos 'Equador' e 'Horizonte' intersectam-se segundo uma linha diametral da Esfera que intersecta esta em dois pontos denominados de 'Oeste (W)' e 'Este (E)', respectivamente à esquerda e à direita da direcção Norte.

O 'Norte (N)' geográfico do lugar é um ponto sobre o 'Horizonte' e que resulta da intersecção deste com um plano definido pela 'Vertical' e pelo 'Eixo de

Rotação'. Naturalmente que este plano intersecta a Esfera segundo uma circunferência, definindo assim, o 'Círculo Meridiano Celeste' do lugar ou simplesmente o 'Meridiano' do lugar.

Do mesmo modo, o 'Sul (S)' do lugar é o ponto da Esfera diametralmente oposto ao 'Norte', constituindo os 4 pontos 'N', 'S', 'E' e 'W' os 'Pontos Cardiais' do lugar e designando-se a linha 'N-S' por 'Meridiana'.

Os círculos que contenham a 'Vertical' do lugar (normais ao 'Horizonte') chamam-se 'Círculos Verticais' e aos círculos que contenham o 'Eixo de Rotação' chamam-se 'Círculos Meridianos' ou ainda 'Círculos Horários'.

A Figura B.1 ilustra geometricamente os elementos referenciais acabados de descrever.

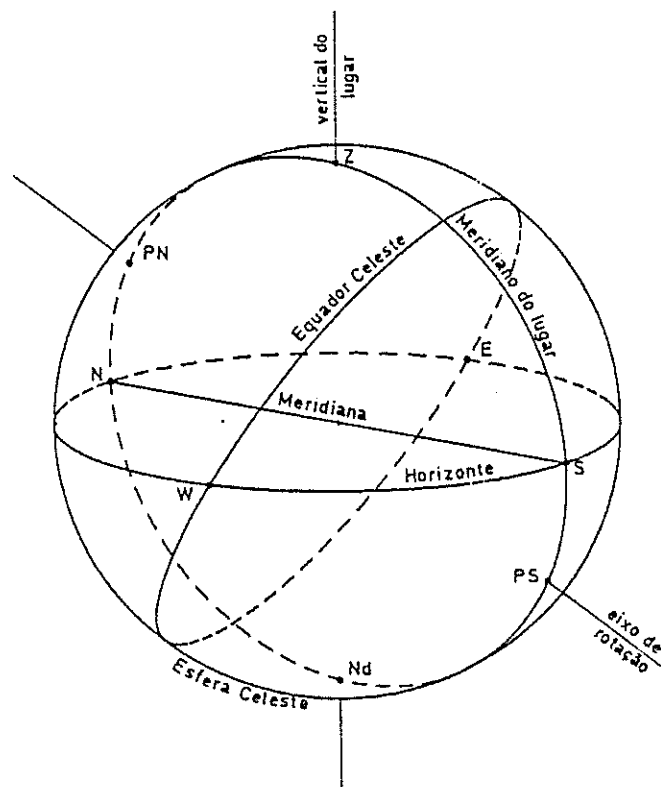


Figura B.1

Elementos Referenciais da Esfera Celeste

De entre estes, destacam-se dois conjuntos constituídos por um eixo e um plano (círculo) que lhe é normal:

- 1- A 'Vertical' do lugar e o 'Horizonte';
- 2- O 'Eixo de Rotação' da Terra e o 'Equador'.

A cada um destes conjuntos corresponderá um sistema de coordenadas, designados, respectivamente, de 'Horizontal' e 'Equatorial'.

B.2 SISTEMAS DE COORDENADAS CELESTES

B.2.1 Sistema de Coordenadas Horizontais

Neste sistema, as coordenadas definidoras da posição de um corpo celeste são medidas sobre o círculo do 'Horizonte' e sobre o círculo vertical que passa pelo corpo celeste.

As coordenadas deste sistema designam-se por:

1- AZIMUTE (Az):

Ângulo no plano do 'Horizonte' medido desde o ponto Sul e no sentido dos ponteiros do relógio (sentido 'Retrógrado'), até à intersecção com o círculo vertical passante pelo corpo celeste.

A gama de valores que esta coordenada pode tomar é de 0 a 360 graus.

2- ALTURA ou ELEVACÃO (h):

Ângulo no círculo vertical passante pelo astro ou corpo celeste, medido acima do plano do 'Horizonte' até ao corpo celeste.

A 'Altura' pode tomar valores positivos de 0 a 90 graus.

Do valor complementar da 'Altura' chama-se também 'Distância Zenital' ($d=90-h$).

Os círculos paralelos ao 'Horizonte' designam-se por 'Paralelos de Altura' ou 'Almucantaras'.

B.2.2 Sistema de Coordenadas Equatoriais

Apoia-se este sistema de coordenadas no círculo fundamental 'Equador' e no 'Eixo de Rotação' da Terra que lhe é normal.

As coordenadas definidoras da posição de um corpo celeste neste sistema medem-se sobre o 'Equador' e sobre os 'Meridianos'.

Neste sistema distinguem-se ainda 2 subsistemas que diferem entre si na origem de uma das coordenadas, que para não se confundirem, têm designações diferentes. Assim, temos os sistemas de coordenadas 'Equatoriais Horárias' e 'Equatoriais Uranográficas'.

B.2.2.1 Coordenadas Equatoriais Horárias

Neste sistema, as coordenadas são:

1- ANGULO HORARIO (t):

Ângulo no plano do 'Equador' entre o 'Meridiano' do lugar e o 'Meridiano' do corpo celeste, medido no sentido retrógrado.

A gama de valores que pode tomar é de 0 a 360 graus, e dada a correspondência entre um círculo e um dia (24 horas), o 'Ângulo Horário' também se pode exprimir em 'Horas' (15 graus \leftrightarrow 1 hora).

2- DECLINAÇÃO (δ):

Ângulo medido no 'Meridiano' do corpo celeste, medido a partir do 'Equador' até ao corpo celeste.

Esta coordenada pode tomar valores de 0 a ± 90 graus, sendo positiva quando acima do 'Equador' e negativa abaixo (hemisfério Sul).

Ao complemento da 'Declinação' chama-se 'Distância Polar' ($\beta = 90 - \delta$).

B.2.2.2 Coordenadas Equatoriais Uranográficas

Não será difícil perceber a forte dependência do lugar de observação que os sistemas de coordenadas atrás descritos manifestam. Tal facto dificulta a comparação de resultados da observação de fenómenos celestes a partir de lugares diferentes, o que levou à consideração de outros(s) sistema(s) de coordenadas, independente(s) do lugar.

No seu 'movimento diário' em torno da Terra, o Sol descreve ao longo do ano uma espiral dupla, intersectando em cada dia o plano do 'Horizonte' em dois pontos: 'Nascente (Nt)', do lado Este; e o 'Poente (Pt) ou Ocaso' do lado Oeste do lugar.

Ao longo do ano, estes dois pontos vão tendo coordenadas horizontais de 'Azimute' sucessivamente diferentes, embora sempre de 'Altura' constante (nula).

Se, relativamente ao lugar, se fixar o instante de passagem do Sol sobre o 'Meridiano' (fixação do 'Azimute'), verifica-se que, ao longo do ano, a 'Altura' do Sol nesses instantes varia de um valor máximo a um valor mínimo. O conjunto de pontos da Esfera Celeste ocupados pelo Sol naquelas instantes ao longo do ano definem o plano da 'Eclitica'.

Num sistema de coordenadas Equatoriais Horárias, verificar-se-ia que os valores da 'Declinação' daquelas duas posições extremas da 'Altura' são simétricos, e com valores de $\pm 23,5$ graus, aproximadamente, provando que, ao longo do ano, o Sol 'atravessara' por duas vezes o 'Equador' (a 'Declinação' anulou-se por duas vezes).

Aos pontos de cruzamento da 'Eclitica' com o 'Equador' chamam-se 'Pontos Equinociais' e aos pontos de 'Declinação' máxima e mínima chamam-se 'Pontos Solsticiais'. De igual modo, os instantes de passagem do Sol por estes pontos denominam-se por 'Equinócios' e 'Solstícios', respectivamente.

Os 'Equinócios' têm, ainda, as seguintes designações:

- 1- 'Equinócio da Primavera' ou 'Equinócio Vernal' (*), o que tem lugar em 21 de Março de cada ano, e cuja ocorrência assinala a passagem do Sol do _____ Hemisfério Sul para o Hemisfério Norte, designando-se, também, o respectivo (*) - Do grego, Vernal, sinónimo de Primavera.

ponto Equinocial] por 'Ponto Vernal (γ)' ou '1o. Ponto de Aries';

- 2- 'Equinócio de Outono', o que ocorre em 22 de Setembro, invertendo-se a posição do Sol relativamente ao 'Equador', e designando-se o respectivo ponto Equinocial por '2o. Ponto de Libra'.

De igual modo, aos dois instantes 'Solsticiais' chamam-se 'de Verão' o que ocorre em 21 de Junho, e 'de Inverno' o de 22 de Dezembro.

O 'Ponto Vernal' é, assim, um marco de referência no espaço que, por ser independente do lugar, é a origem preferencial de uma das coordenadas do sistema Equatorial Uranográfico.

As coordenadas deste sistema são:

- 1- ASCENSAO RECTA (α):

Ângulo no plano do 'Equador' medido desde o 'Ponto Vernal' até ao 'Meridiano' do astro ou corpo celeste, no sentido directo.

Esta coordenada toma valores de 0 a 360 graus.

- 2- DECLINAÇÃO (δ):

Ângulo agudo no plano do 'Meridiano' do astro, medido desde o 'Equador' até ao astro.

Esta coordenada toma valores de 0 a ± 90 graus, sendo positiva para corpos celestes acima do 'Equador' (hemisfério Norte).

Da definição, verifica-se que esta última coordenada é comum aos dois sistemas Equatoriais.

Na Figura R.2 ilustram-se os sistemas de coordenadas acabadas de definir para um astro arbitrário A.

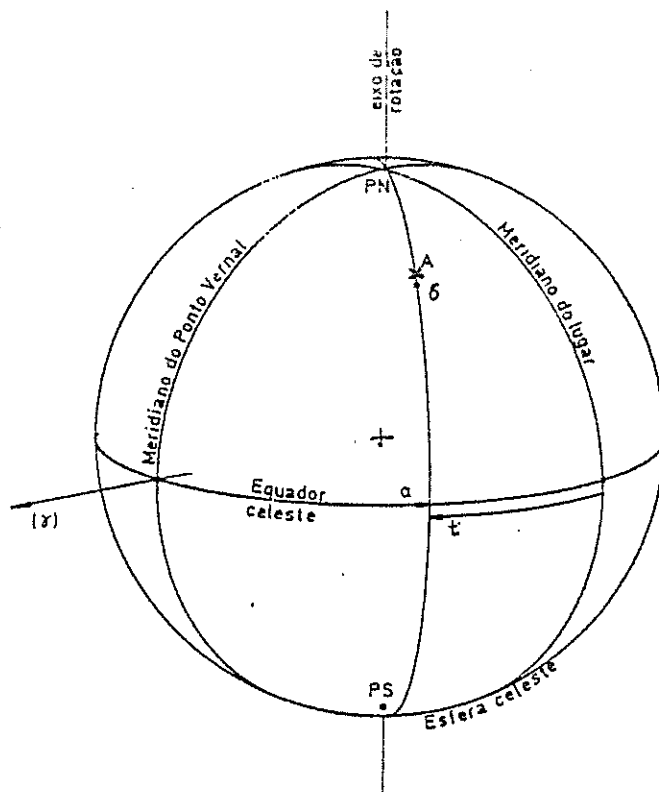


Figura B.2
Coordenadas Equatoriais de um Astro

B.2.3 Sistema de Coordenadas Eclíticas

Tomando como referência a 'Eclítica' e um eixo passante pelo centro e que lhe seja normal, um outro sistema de coordenadas pode então ser definido, à semelhança dos anteriormente descritos,

Num tal sistema, os elementos de referência são:

1- POLO BOREAL (PB):

Ponto de intersecção do eixo normal à 'Eclítica' com a Esfera Celeste, no hemisfério Norte;

2- POLO AUSTRAL (PA):

Ponto diametralmente oposto, no hemisfério Sul;

3- PONTO VERNAL (γ):

Tal como anteriormente definido.

Aos círculos que contêm os Pólos 'Boreal' e 'Austral', normais à 'Eclítica', chamam-se 'Meridianos Eclíticos' e, naturalmente que é sobre eles que será medida uma das coordenadas deste sistema.

Assim, as coordenadas são:

1- LONGITUDE CELESTE (λ):

Ângulo medido no sentido directo sobre a 'Eclítica' desde o 'Ponto Vernal' até ao 'Meridiano Eclítico' do astro.

Esta coordenada pode tomar valores de 0 a 360 graus.

2- LATITUDE CELESTE (θ):

Ângulo azado no 'Meridiano Eclítico', medido desde a 'Eclítica' até ao astro.

Esta coordenada toma valores de 0 a ± 90 graus, considerando-se os valores positivos no sentido do 'Pólo Boreal'.

B.2.4 Sistemas de Coordenadas Orbitais

Sendo a 'Eclítica' a linha que descreve a 'órbita' do Sol em torno da Terra, pode designar-se o sistema de coordenadas nela apoiado de 'Orbital'.

Deste modo e por semelhança, tomando como plano de referência o plano orbital de um astro ou satélite em movimento aparente (ou real) em torno do ponto de observação e como eixo de referência o eixo que lhe é normal e passante pelo centro da esfera, pode definir-se um sistema de Coordenadas Orbitais baseado nos elementos referenciais do astro ou satélite em causa.

Num tal sistema, os elementos referenciais seriam:

- 1- Círculos Meridianos, contendo o eixo normal ao plano orbital e normais a este;
- 2- 'Nodo Ascendente (NA)', ponto de intersecção do plano orbital com o 'Ecuador' (*), correspondente à passagem do astro definidor do sistema do hemisfério Sul para o hemisfério Norte.

As coordenadas do sistema seriam:

1- LONGITUDE ORBITAL:

Ângulo medido no sentido directo sobre o plano orbital, desde o 'Nodo Ascendente' até ao círculo Meridiano do corpo celeste em observação.

2- LATITUDE ORBITAL:

Ângulo usado medido no círculo Meridiano do corpo celeste, desde o plano orbital, até àquele.

No Quadro B-I listam-se os sistemas de coordenadas mencionados, descrevendo-se para cada um, os Elementos Referenciais principais, as coordenadas e outras indicações pertinentes.

B.3 SISTEMA DE COORDENADAS TERRESTRES

B.3.1 Forma e Dimensões da Terra

Supondo a Terra homogénea, o prolongamento da superfície dos oceanos sob os continentes produziria um esferóide cuja superfície seria a de nível gravítico, designada por 'Geóide'.

Dada a semelhança deste sólido com um elipsóide de revolução, o Geóide é frequentemente modelizado por aquela forma geométrica regular, achatada nos polos. Por medições geodésicas e astronómicas, obtiveram-se os seguintes valores para

(* - ou com a 'Eclítica', como também pode ser definido.

QUADRO B - I
Sistemas de Coordenadas Celestes

SISTEMA	ELEMENTOS REFERENCIAIS	COORDENADAS	VALORES POSSIVEIS	OBSERVAÇÕES
Horizontal	Plano: Horizonte Eixo: Vertical Polos: Zénite, Nadir Pontos Cardeais	Azimute Altura Distância Zenital	(Az) 0-360 (h) 0-90 (d) 90-0	A partir do Sul A partir do Horizonte; A partir dos Polos;
Equatorial Horário	Plano: Equador Eixo: Rotação Polos: Norte, Sul	Ângulo Horário Declinação Distância Polar	(t) 0-360 (δ) 0-±90 (β) 90-0	A partir do Meridiano do lugar A partir do Equador; A partir dos Polos;
Equatorial Uranográfico	Plano: Equador Eixo: Rotação Polos: Norte, Sul Ponto Vernal (γ)	Ascensão Recta Declinação	(α) 0-360 (δ) 0-±90	A partir do Ponto Vernal (γ) A partir do Equador;
Eclítico	Plano: Eclítica Eixo: normal à Eclítica Polos: Boreal, Austral Ponto Vernal (γ)	Longitude Celeste (λ) Latitude Celeste (β)	0-360 0-±90	A partir do Ponto Vernal (γ) A partir da Eclítica;
Orbital	Plano: órbita Eixo: normal ao plano Nodo Ascendente	Longitude Orbital Latitude Orbital	0-360 0-±90	A partir do Nodo Ascendente A partir do Plano Orbital;

o referido elipsóide:

1- Raio Médio Equatorial:

$$a = 6378,214\text{km}; \\ 6378,160\text{km}.$$

2- Raio Médio Polar:

$$b = 6356,829\text{km}; \\ 6356,775\text{km}.$$

3- Raio Médio Terrestre:

$$c = (2a + b)/3 = 6371,086\text{km}$$

Para esta forma, definem-se ainda os seguintes parâmetros:

1- Excentricidade:

$$(a) \quad e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (B-1a)$$

2- Achatamento:

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (B-1b)$$

entre os quais se podem definir também as seguintes relações:

1- excentricidade vs achatamento:

$$e = \sqrt{2f - f^2} \quad (B-2a)$$

2- achatamento vs excentricidade:

$$f = 1 - \sqrt{1 - e^2} \quad (B-2b)$$

3- e ainda:

$$\frac{b}{a} = 1 - f = \sqrt{1 - e^2} \quad (B-2c)$$

B.3.2 Coordenadas Terrestres

Considerando o lugar de observação situado no centro da Terra (Esfera Celeste Geocêntrica), é possível também definir um sistema de coordenadas para a 'esfera' terrestre.

Serão seus elementos de referência o Eixo de Rotação da Terra e o 'Equador' terrestre. Este não é mais do que o círculo que resulta da intersecção do plano do 'Equador Celeste' com a 'esfera' terrestre.

Os círculos que contenham o Eixo de Rotação designam-se por 'Meridianos Terrestres'. Neste modo, o 'Meridiano Terrestre' é um círculo contido no plano definidor do 'Meridiano Celeste' (ver B.1.1).

Neste sistema, as coordenadas são:

1- LONGITUDE GEOCENTRICA (λ):

Ângulo no plano do 'Equador', desde o 'Ponto Vernal' até ao 'Meridiano Terrestre' do lugar.

Esta coordenada toma valores de 0 a 360 graus.

2- LATITUDE GEOCENTRICA (θ):

Ângulo usado no 'Meridiano Terrestre' do lugar, desde o 'Equador' até ao lugar.

Esta coordenada toma valores de 0 a ± 90 graus, contando-se os valores positivos para os lugares do hemisfério Norte Terrestre.

Não sendo a Terra perfeitamente esférica, manifestando um ligeiro achatamento nos 'Pólos' (i.e. raios polares inferiores aos raios equatoriais), a coordenada 'Latitude' atrás definida tem que ser ajustada de modo a contemplar este facto.

Assim, define-se também:

3- LATITUDE GEOGRAFICA (ϕ):

Ângulo agudo medido no Meridiano do lugar, desde o 'Equador' até à 'Vertical' do lugar.

Entre as Latitudes Geográfica e Geocêntrica, por considerações de ordem geométrica baseadas no elipsóide de revolução terrestre, é possível deduzirem-se as seguintes expressões:

1- Latitude Geográfica vs Latitude Geocêntrica:

$$\text{tg}(\phi) = \text{tg}(\phi') \frac{1}{(1-e^2)} \quad (\text{B-3a})$$

2- Latitude Geocêntrica vs Latitude Geográfica:

$$\text{tg}(\phi') = \text{tg}(\phi)(1-e^2) \quad (\text{B-3b})$$

B.4 O TEMPO

"O que é o Tempo?
Se não me perguntam, sei o que é...;
...se me perguntam, não sei!"
(Sto. Agostinho)

B.4.1 Generalidades

Abordando-se neste parágrafo os aspectos relativos à quantificação da duração dos fenómenos, e que se exprimem na sua formulação matemático-física por uma variável designada por 'Tempo', impõe-se a apresentação prévia da sua definição.

Porém, depara-se desde logo com uma dificuldade em o conseguir de forma inequívoca e precisa, dele se tendo apenas uma noção e que corresponde à expressão "medida arbitrária da duração das coisas" (cf. Dicionário de Português, Porto Editora, Lda., 3a. Edição).

Tem-se, também, a noção de que a 'tempo' se associa relógio, cronómetro e calendário, ritmo e mudança, movimento e velocidade, História e acontecimentos, Filosofia, Religião e até comportamento social. Em suma, "...associa-se a ideia de que o tempo é algo que nos é exterior, sobre o qual não se tem qualquer controle, que é absoluto."

Num contexto mais restrito, o vocábulo 'tempo' é muitas vezes ambíguo, pois ele poderá referir-se:

- 1- ao instante referenciado, p.ex., a indicação de uma data e hora concreta;
- 2- ao sistema de unidades de medida de tempo a que um instante citado se refere, p.ex., Tempo Médio de Greenwich ou Tempo Solar Verdadeiro;
- 3- ou ainda à duração de determinada ocorrência, p.ex., um corredor percorre 100 metros no tempo de 10.8 segundos.

O primeiro e terceiro exemplos são na sua essência idênticos: uma data traduz o tempo (no contexto do 3o. exemplo) que decorreu desde a origem do calendário em que se apoia, até àquele instante, embora em "escalas" diferentes. No

entanto, é necessário que se compreenda a diferença entre eles. O primeiro exemplo refere-se a um instante determinado, uma 'posição numa hipotética estrada em que se caminha', o terceiro refere-se antes à noção de duração, intervalo entre 'duas posições (partida e chegada)'. .

O segundo exemplo citado sobre o vocábulo evidencia uma utilização intrinsecamente diferente dos outros dois.

De facto, a consideração de 'Sistemas de Unidades de Medida do Tempo' é o resultado de diversas tentativas em dispor de uma unidade convenientemente uniforme para esta variável, de modo a permitir a regulação apropriada das actividades do Homem e a compreensão dos fenómenos que manifestam variabilidade (no tempo!) e de cujo estudo se ocupa.

A propósito dos referidos 'sistemas de unidades de medida do tempo', poder-se-ia estabelecer uma certa analogia entre estes e os sistemas de unidades de medidas das grandezas físicas, como as de comprimento (unidades do Sistema Internacional ou unidades do sistema Inglês) ou as de temperatura (escala Celsius ou escala Fahrenheit).

B.4.2 Sistemas de Unidades do Tempo

Desde sempre que o Homem se tem 'regulado' pelo Sol, constituindo assim o elemento de referência para a contagem do tempo, a sucessão dos dias e dos anos.

Porém, desde cedo que se deu conta da irregularidade, ou melhor, da não uniformidade desta referência. De facto, sendo elíptica a órbita da Terra em torno do Sol, na qual o planeta tem velocidade variável (mais rápida no perihélio, mais lenta no afélio) e dada a obliquidade da Eclíptica (cerca de 23.5 graus relativamente ao Equador), não só os dias têm durações diferentes como os próprios anos (devido à Precessão dos Equinócios).

Assim, embora manifeste periodicidade, a contagem do tempo baseada no Sol não oferece a uniformidade que a quantificação 'da duração das coisas' exige, nomeadamente em ciência.

Admitindo uniformidade no movimento de rotação da Terra, só um 'Sol' cujo movimento aparente se efectuasse no plano do Equador garantiria igualdade dos períodos diurnos e nocturnos em toda a superfície da Terra.

Além disso, se o seu movimento aparente fosse uniforme ao longo do ano, i.e.,

se a órbita terrestre fosse circular e de velocidade de translação constante, estaria encontrada a base de referência para a quantificação do tempo, pois a periodicidade e uniformidade requeridas estavam, assim, asseguradas.

Repare-se, porém, que é o que se passa com as estrelas e constelações, que parecem manter-se em posições fixas na esfera celeste e entre si, pelo que bastaria escolher uma e, relativamente a ela, estabelecer as unidades de tempo adequadas e, deste modo, o sistema de unidades de tempo único.

De facto, e como se descreve adiante, este método de definição do tempo (observação da passagem de determinadas estrelas pelo meridiano do lugar) é o que serve de base para a cronometragem do tempo, acerto de relógios padrão, etc.

Seria, no entanto, pouco prático para a vida corrente impô-lo como sistema de referência, pois, pela sua 'presença periódica' e influência que tem no comportamento de todos os corpos terrestres (fala-se mesmo no 'ritmo biológico' a que o Sol estará associado), o Sol 'comandaria' invariavelmente as acções do Homem.

Assim, houve que encontrar um sistema que, ao garantir a uniformidade exigida, estivesse de algum modo associado ao Sol.

B.4.2.1 Unidades Fundamentais

Nestas considerações sobre o Tempo, referiram-se já duas unidades, o Dia e o Ano, que convém definir, e que são as unidades fundamentais de todos os sistemas de medida e dos calendários, a partir das quais se definem os múltiplos e submúltiplos.

Assim:

- 1- DIA, é o intervalo de tempo que decorre entre duas passagens superiores consecutivas de um astro de referência pelo meridiano do lugar;

2- ANO, é o intervalo de tempo que decorre entre duas passagens consecutivas da Terra, no seu movimento de translação, por uma linha imaginária que une o Sol a um ponto referencial do espaço.

Consoante o astro de referência é o Sol ou um ponto fixo da esfera celeste (p.ex., o Ponto Vernal), assim se definem Dia e Ano Solares e Dia e Ano Siderais, unidades base de sistemas de tempo (Tempo Solar e Tempo Sideral).

Por considerações de ordem geométrica, pode demonstrar-se que o Ano Sideral tem exactamente mais um dia que o Ano Solar, ou, por outras palavras, que os Dias Siderais são ligeiramente mais curtos que os Dias Solares, devido ao movimento de translação da Terra em torno do Sol, ao longo do período de Tempo atrás designado por Ano.

Considerando um contador de tempo equivalente aos nossos relógios, o encurtamento do Dia Sideral relativamente ao Dia Solar, ou, o que é equivalente, o atraso diário do Dia Solar relativamente ao Dia Sideral é de cerca de 4 minutos ($(360 \text{ graus} / 365,25d) \times (24h/360 \text{ graus}) \approx 3m 56s$).

As fracções de qualquer destas duas unidades (Dia e Ano), em qualquer sistema, foram arbitrariamente estabelecidas: os Anos subdividem-se em meses e os Dias em horas, minutos e segundos.

Para o estabelecimento das horas e subfracções destas, é porém necessário considerar referenciais relativamente aos quais se definem as posições que tomam os astros escolhidos para a quantificação do tempo.

Os referenciais são o Meridiano do lugar e o Meridiano que contém o astro, em cada instante. Neste modo, a noção de tempo corresponde aos valores das coordenadas do astro. Mais especificamente, Tempo é o Ângulo Horário do astro de referência.

O valor horário de uma fracção do dia é então o equivalente em horas, minutos e segundos do Ângulo Horário do astro considerado definindo-se, assim:

1- TEMPO SIDERAL:

Ângulo Horário do Ponto Vernal;

2- TEMPO SOLAR:

Angulo Horário do Sol.

São estes os dois sistemas fundamentais para a contagem do tempo. No que se segue, e pelo que se disse no parágrafo anterior sobre a conveniência prática de um sistema de contagem do tempo baseado no Sol, será sobre o Tempo Solar que nos debruçaremos em pormenor.

B.4.2.2 Tempo Solar Verdadeiro

O Sol Verdadeiro é o Sol 'real' que nos ilumina diariamente. A designação justifica-se porquanto há necessidade de se considerar 'outro Sol', fictício ou artificial, distinto do real ou Verdadeiro, por este se mostrar inadequado para a consecução de um dos objectivos do estabelecimento de um sistema de contagem de tempo: uniformidade e constância.

Como se tem vindo a referir, pelo facto de o plano da Eclíptica não coincidir com o do Equador, nem as velocidades de rotação e de translação da Terra serem constantes, os Dias e os Anos Solares não têm duração uniforme.

Somente os relógios de Sol podem traduzir o comportamento 'errático' do Sol no seu movimento aparente. Mas, como se depreende facilmente da própria definição de Tempo Solar, são pouco práticos de se utilizarem na vida moderna, pela enorme dependência que manifestam da sua instalação (construção e orientação, p.ex.).

A variabilidade dos dias solares ao longo do ano tem a sua origem no tipo de órbita descrita pela Terra (elíptica, com velocidades superiores na vizinhança do perihélio (dias mais longos) e menores junto ao afélio (dias mais curtos)) e na obliquidade da Eclíptica (atraso progressivo da passagem do Sol pelo Meridiano do lugar).

A conjugação destes dois efeitos pode ampliar ou reduzir o progressivo retardamento da passagem do Sol pelo Meridiano, traduzindo-se na prática, por dias mais longos durante o Inverno do que no Verão.

Define-se então DIA SOLAR VERDADEIRO, como sendo o intervalo entre 2 passagens consecutivas superiores do Sol Verdadeiro pelo Meridiano do lugar.

Dada a Precessão dos Equinócios, os Anos Solares não são constituídos por um número inteiro de Dias Solares, sendo mesmo variável de ano para ano. Em média, e utilizando um contador de tempo igual aos nossos relógios, a duração do Ano Solar é de 365.25 dias Solares Médios (a definir oportunamente). Esta ocorrência repercute-se na definição de um calendário, e na necessária subdivisão do Ano em Meses e/ou Estações.

B.4.2.3 Tempo Solar Médio

Das considerações sobre a variabilidade dos Dias Solares Verdadeiros e da necessidade de dispor de um sistema de contagem de tempo que garanta uniformidade e constância como requerida, verifica-se que a solução parece residir na consideração de um Sol 'fictício', cujo movimento aparente se realizasse sobre o Equador e com uma 'velocidade' constante ao longo do ano, igual à 'velocidade' média do Sol Verdadeiro, e com igual período.

O 'Sol' assim artificialmente concebido designa-se por Sol Médio e o sistema de contagem de tempo nele baseado designa-se por sistema de Tempo Solar Médio. A semelhança dos dois anteriormente considerados (Sideral e Solar Verdadeiro) define-se:

1- Tempo Solar Médio:

Angulo Horário do Sol Médio.

2- Dia Solar Médio:

Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens superiores consecutivas do Sol Médio pelo Meridiano do lugar.

E, assim, o Tempo Solar Médio que serve de base à cronometragem do tempo actualmente em uso. Por outras palavras, é a partir do Tempo Solar Médio que se regulam os relógios que usamos.

Os dias foram subdivididos em 24 horas Solares Médias e estas em minutos e segundos tais que 1 segundo = 1/86400 do dia Solar Médio = 1/3600 da Hora Solar Média = 1/60 do Minuto.

B.4.2.4 Equação do Tempo

Entre os Tempos Solares Verdadeiro e Médio existe uma relação designada por Equação do Tempo (ET) e dada pela diferença entre aqueles Tempos, ou seja, a diferença em cada instante entre os Ângulos Horários do Sol Verdadeiro e do Sol Médio.

Os valores da Equação do Tempo são variáveis ao longo do ano, traduzindo o avanço ou retardamento do Sol Verdadeiro relativamente ao Sol Médio.

O Sol Verdadeiro "passa" simultaneamente com o Sol Médio pelo Meridiano do lugar em 4 dias do ano, manifestando a variação anual 4 extremos locais, 2 de atrasos e 2 de avanços.

São eles em Fevereiro e Julho e em Maio e Novembro, respectivamente, embora, pelas razões que se tem vindo a apontar, estas ocorrências variem de intensidade e de instante de ano para ano.

B.4.2.5 Tempo Local

A necessidade de ordenar cronologicamente os acontecimentos passados e prever a ocorrência de futuros, ligados às actividades do Homem, levou à elaboração de calendários, que registassem adequadamente a sucessão dos dias e dos anos.

Para isso, foi necessário definir os instantes de mudança de data, ou de dias. Dado que a maior parte das actividades do Homem se realiza durante o período diurno dos dias, convencionou-se que a sucessão destes, para efeitos da sua contagem, se efectuará durante o período nocturno, dando origem ao sistema de Tempo Local.

Define-se então Tempo Local, como o Ângulo Horário do Sol Médio do lugar, acrescido de 12 horas.

Da definição, dois locais da Terra com diferentes valores de Longitude, próximos que estejam, terão Tempos Locais diferentes. Por outras palavras, a diferença de Longitude entre dois locais é igual à diferença de Tempos Locais respectivos.

A necessidade de programação da vida moderna, decorrente sobretudo da melhoria dos meios de comunicação terrestre, mostraram a conveniência de se dispor de um

sistema de contagem de tempo que, embora baseado no Sol (Verdadeiro e/ou Médio), permitisse a disponibilidade de um sistema de Tempo comum a um conjunto de locais com afinidades, p.ex., pertencentes a um mesmo país. Surgem assim os Tempo Universal e o Tempo Legal.

B.4.2.6 Tempo Universal e Tempo Legal. Os Fusos Horários

Por decisão da União Astronómica Internacional, convencionou-se considerar o Meridiano de Greenwich, em Inglaterra, como um Meridiano de referência não só para efeitos geográficos, como para efeitos de contagem do Tempo.

Deste modo define-se:

TEMPO UNIVERSAL (TU) ou TEMPO MÉDIO DE GREENWICH (TMG) como sendo o Ângulo Horário do Sol Médio do Meridiano de Greenwich.

E o Observatório de Greenwich que estabelece assim a referência base para as contagens de Tempo, tomando-se em devida conta todas as irregularidades dos movimentos da Terra e/ou do Sol, algumas delas descritas atrás.

Com vista ao estabelecimento de zonas da Terra nas quais o Tempo oficialmente considerado pudesse obviar os inconvenientes motivados pelas diferenças de Tempos Locais, considerou-se esta subdividida em 24 meridianos a contar do Meridiano de Greenwich, espaçados de 15 graus, designados por Meridianos Centrais.

Chamam-se Fusos Horários às zonas compreendidas no intervalo de -7.5 a +7.5 graus em torno de cada um dos Meridianos Centrais.

Define-se Tempo Legal de um ponto da superfície da Terra como sendo o Tempo Solar Médio do Meridiano Central que lhe fica mais próximo.

Notar-se-á certamente que, se no alto mar a consideração de Tempos Legais baseada nos Fusos Horários (ou nos Meridianos Centrais) não é conflituosa, nas proximidades da linha de costa e sobre os continentes, a localização ou identificação dos Fusos Horários tem de ser ajustada por medidas legislativas tomadas pelos governos dos países, consoante preferências e necessidades locais. De facto, as fronteiras entre países ou as subdivisões administrativas internas de alguns com grande extensão territorial em Longitude (como é o caso do Canadá, dos Estados Unidos da América e da União Soviética, p.ex.) não se orientam segundo os meridianos terrestres.

Assim se estabelece o conceito de Hora Legal. Em Portugal, é o Decreto-Lei 309/76, de 27 de Abril que o define, havendo ajustamentos para as Resiões Autónomas decorrentes das condições locais.

No Continente, aquele diploma estipula que a Hora Legal é a do Fuso do Meridiano de Greenwich (TU, ou TMG) no período compreendido entre as 0 horas do último domingo de Setembro até às 0 horas do último domingo de Março do ano seguinte (período em que vigora a chamada Hora de Inverno). No período complementar àquele, a Hora Legal no continente é a do TMG adicionada de 1 hora (Fuso -1).

Para os Açores, um diploma regional (Dec. Regional 9/77/A, de 17 de Maio) estabelece como Hora Legal para o Arquipélago a do Fuso -1 durante todo o ano. Para a Madeira, é o Decreto-Lei 47233, de 1 de Outubro de 1966, que estabelece o TMG como Hora Legal durante todo o ano.

B.4.3 Importância da Noção de Tempo em Estudos de Detecção Remota

A semelhança de inúmeros documentos de que se faz uso para os mais diversos fins, a indicação da Data e Hora de uma experiência de detecção remota é um dado fundamental para a compreensão adequada da realidade observada e registada no "instante" em que se realizou.

Se para algumas aplicações a Data pode ser suficiente, noutras, a Hora do dia é indispensável, como nos estudos sobre o litoral de zonas costeiras em que a maré desempenhe papel activo. E da informação sobre o instante da passagem sobre o local que se poderá deduzir a situação de maré a partir de outras fontes e, assim, permitir a interpretação dos fenómenos observados, de algum modo, relacionados com a maré.

A maioria dos satélites de observação da Terra por detecção remota dispõe de equipamentos que permitem a identificação dos locais observados, o posicionamento dos satélites e as condições de iluminação solar (quando em observação sobre o lado iluminado da Terra), além dos equipamentos sensores propriamente ditos.

Esta informação é adicionada aos dados referentes à radiometria das zonas sobrevoadas, permitindo a sua consideração no processamento que sobre eles recairá posteriormente.

A informação referente ao instante de observação é, em geral, dada pela posição que o Sol ocupa relativamente ao satélite e ao Nadir deste sobre a superfície terrestre. Em muitos casos, esta informação é já dada em Tempo, como acontece nos dados do radiómetro MSS do satélite LANDSAT.

Compreender-se-á que a informação sobre o instante de observação dada em Tempo, se refira ao Sol Verdadeiro, porquanto o Sol Médio, base para a cronometragem do Tempo, é uma concepção, não observável fisicamente. É o Sol Verdadeiro que é observado pelos equipamentos de bordo.

A determinação da Hora Legal local em que se efectuou a observação e registo dos dados radiométricos para a sua consideração no processamento e interpretação deve pois ter em consideração as noções que se descreveram anteriormente, nomeadamente, a Equação do Tempo, o Tempo Solar Verdadeiro(*) e as coordenadas geográficas locais.

(*) - no conjunto de dados do radiómetro MSS designa-se por Local Solar Time, Tempo Solar Local.

BIBLIOGRAFIA

BAKER, Robert H.

'Astronomia'

Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1971.

CAVALEIRO E SILVA, A.; MALATO, J.J.

'Geometria da Insolação de Edifícios'

Inf. Téc. 'Edifícios', LNEC, Lisboa, 1969.

COBOS, N.B.

'Astronomia Practica'

Inst. Inv. Tec. Ind., Univ. Nac. Tucuman, BUENOS AIRES, 1938.

ELTON, L.R.B.; MESSER, H.

'Time and Man'

Persamon Press, NY, 1978.

MEHLIN, T.G.

'Astronomy'

John Wiley Sons, Inc., NY, 1959.

RUDAUX, Lucien; VAUCOULEURS, G.

'Astronomy'

Larousse Enciclopedy of Astronomy, London, 1967.

SILVA, Inácio F.

'Astronomia Fundamental'

Sebenta da Cadeira de Astronomia, FCL, Lisboa, 1970.

SMITH, Eric A.

'Orbital Mechanics and Analytic Modelins of Meteorological Satellite Orbits. Applications to the Satellite Navigation Problem'

Atm. Sc. Paper #321, Col. St. Univ., Fort Collins, 1980.

Observatório Astronómico de Lisboa

'Dados Astronómicos para os Almanagues de 1981'

Obs. Astronómico de Lisboa, LNEC, 1981.

APENDICE C

MECANICA ORBITAL DOS SATELITES DE DETECCAO REMOTA

Apresenta-se neste Apêndice um resumo das noções básicas do movimento orbital dos satélites artificiais, particularmente dos vocacionados para a detecção remota dos recursos terrestres.

Para além das leis fundamentais que regem a gravitação dos corpos celestes, abordam-se as condições do movimento e analisam-se algumas órbitas de interesse na detecção remota por satélite.

C.1 INTRODUÇÃO

O lançamento de um satélite para a detecção remota dos recursos terrestres a partir do espaço pressupõe a prossecução de objectivos, definidos de modo mais específico do que a designação genérica 'detecção remota' ou 'detecção remota dos recursos terrestres' faz supor.

As órbitas a descrever por um satélite são pois condicionadas pelos objectivos definidos para a missão a que se destina (além de o serem evidentemente pelas leis físicas da gravitação), de modo a obter-se o melhor rendimento dos dados a adquirir pelos sensores instalados a bordo.

Condicionar uma órbita por 'objectivos' corresponde a impor determinados valores num conjunto de parâmetros caracterizadores das órbitas a descrever.

Por outro lado, do conhecimento dos elementos orbitais (geometria da órbita, posição instantânea do satélite) e da geometria da aquisição dos dados (dependente do modo de funcionamento dos sensores) podem estabelecer-se as relações geométricas entre a informação colhida e os pontos da superfície terrestre a que correspondem; isto é, a cartografia das zonas observadas.

C.1.1 Elementos Geométricos

Como é sabido, a órbita descrita por um corpo celeste, um satélite p.ex., em torno de outro corpo celeste tem a forma de uma cónica em que este ocupa um dos focos.

Uma cónica é genericamente descrita pela equação, em coordenadas polares (r,θ):

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\theta)} \quad (C-1)$$

em que:

p = parâmetro característico da cónica;

e = excentricidade da cónica;

θ = valor angular centrado no foco e medido no sentido directo a partir da direcção do Periéu (Ps).

De acordo com a teoria das cónicas, a soma de valores que a excentricidade 'e' toma, determina o tipo de cónica, tendo-se:

1- Circunferência: e=0;

2- Elipse: 0<e<1;

3- Parábola: e=1;

4- Hipérbole: 1<e;

As órbitas parabólicas e as hiperbólicas não têm interesse para os estudos de detecção remota, sendo geralmente consideradas em estudos de trajectórias interplanetárias ou dos cometas.

A título de curiosidade, refere-se que o tipo de órbita conseguida é função da relação existente entre a 'Velocidade de Lançamento' do satélite (V_{lsat}) e a 'Velocidade de Libertação' (V_{lib}) da atracção gravítica. Esta é dada pela expressão:

$$V_{lib} = (2gR)^{1/2} \quad (C-2)$$

tendo-se:

- 1- Órbita elíptica, se $V_{\text{sat}} < V_{\text{lib}}$;
- 2- Órbita parabólica, se $V_{\text{sat}} = V_{\text{lib}}$;
- 3- Órbita hiperbólica, se $V_{\text{sat}} > V_{\text{lib}}$.

No caso da Terra e da Lua, as Velocidades de Libertação são de 11km/s e $2,5\text{km/s}$, respectivamente.

Se a Terra fosse geometricamente regular e graviticamente homogénea, e se pudessem ser desprezadas as acções perturbadoras de outros corpos celestes bem como as de outros agentes, as órbitas seriam circulares e o movimento orbital uniforme, ocupando a Terra o centro.

Não se verificando esta situação "ideal", é a elipse a forma da trajectória descrita pelos satélites em órbita em torno da Terra, onde esta ocupa um dos focos.

Sendo assim, há conveniência em referir os elementos geométricos da elipse aos seus eixos maior e menor, escrevendo-se então a equação (C-1) da seguinte forma (Figura C.1):

$$r = \frac{a(1-e)}{1+e \cos(\theta)} = \frac{b^2/a}{1+e \cos(\theta)} \quad (\text{C-3})$$

em que:

a = semi-eixo maior da elipse;

b = semi-eixo menor: $a(1-e^2)^{1/2}$

e = excentricidade da elipse: $\frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a}$

5- Argumento do Periseu (ω):

Ângulo medido no plano orbital no sentido directo(*), entre o Nodo Ascendente e o Periseu.

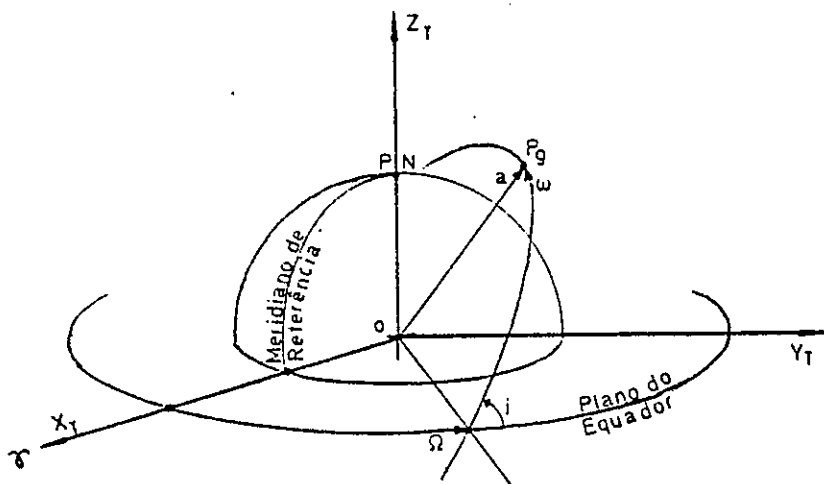


Figura C.2
Elementos Orbitais

C.1.3 Parâmetros de Posição de um Satélite

Os parâmetros anteriormente descritos caracterizam a orientação do plano orbital relativamente a um referencial terrestre, mas nada dizem sobre a posição ocupada pelo satélite em cada instante.

Em Mecânica Orbital, esta posição é referenciada por um valor angular, a Anomalia Verdadeira (True Anomaly). No entanto, dois outros valores angulares são também utilizados nas expressões do movimento, por conveniência. Assim, os três ângulos referidos são (Figura C.1):

1- Anomalia Verdadeira (θ , True Anomaly):

Ângulo no plano orbital centrado no foco e medido no sentido directo, entre as direcções do Periseu e do satélite.

(*) - que neste caso coincide com a direcção do movimento.

2- Anomalia Média (M, Mean Anomaly):

Ângulo no plano orbital centrado no centro de uma órbita circular média que o satélite descreveria a velocidade constante e de período igual ao Período Anomalístico, medido no sentido directo entre as direcções do Perigeu e a do satélite (posição média).

3- Anomalia Excêntrica (E, Eccentric Anomaly):

Ângulo no plano orbital centrado no centro de uma circunferência circunscrita à órbita elíptica, medido no sentido directo entre as direcções do Perigeu e a da projecção da posição do satélite na referida circunferência segundo o eixo menor da elipse.

Por considerações geométricas, podem estabelecer-se as seguintes relações entre estes três ângulos:

1- Anomalia Verdadeira (θ) vs. Anomalia Excêntrica (E):

$$\cos(\theta) = \frac{\cos(E) - e}{1 - e \cos(E)} \quad (C-4a)$$

$$\sin(\theta) = \frac{\sin(E) (1 - e^2)^{1/2}}{1 - e \cos(E)} \quad (C-4b)$$

$$\operatorname{tg}(\theta) = \frac{\sin(E) (1 - e^2)^{1/2}}{\cos(E) - e} \quad (C-4c)$$

2- Anomalia Excêntrica (E) vs. Anomalia Verdadeira (θ):

$$\cos(E) = \frac{\cos(\theta) + e}{1 + e \cos(\theta)} \quad (C-5a)$$

$$\sin(E) = \frac{\sin(\theta) (1 - e^2)^{1/2}}{1 + e \cos(\theta)} \quad (C-5b)$$

$$\operatorname{tg}(E) = \frac{\sin(\theta) (1 - e^2)^{1/2}}{\cos(\theta) + e} \quad (C-5c)$$

3- Anomalia Média (M) vs. Anomalia Excêntrica (E):

$$M = E - e \sin(E) \quad (C-6)$$

(E e M em radianos).

4- Anomalia Excêntrica (E) vs. Anomalia Média (M):

A inversão da equação (C-6), por ser transcendente, é feita com o recurso à

expansão em série de Fourier e ao uso das funções de Bessel, resultando a seguinte expressão (SHITH 1980):

$$\begin{aligned}
 E = & M + e \operatorname{sen}(M) + \\
 & + e^2 \operatorname{sen}(M) \cos(M) + e^3 \left(\operatorname{sen}(M) + \frac{3}{2} \operatorname{sen}^3(M) \right) + \\
 & + e^4 \left(\operatorname{sen}(M) \cos(M) - \frac{8}{3} \operatorname{sen}^3(M) \cos(M) \right) + \\
 & + e^5 \left(\operatorname{sen}(M) - \frac{17}{3} \operatorname{sen}^3(M) + \frac{125}{24} \operatorname{sen}^5(M) \right) + \\
 & + \dots
 \end{aligned}
 \tag{C-7}$$

Porém, para excentricidades pequenas, como são as órbitas dos satélites de detecção remota, a expressão (C-7) pode ser simplificada sem erro apreciável, desprezando-se os termos da excentricidade de grau superior a 1. Assim:

$$E \cong M + e \operatorname{sen}(M) \tag{C-8}$$

(M e E em radianos).

De salientar a aparente simetria existente nas relações acima indicadas, entre o grupo 1 (equações (C-4a) a (C-4c)) e o grupo 2 ((C-5a) a (C-5c)), e entre as expressões (C-6) e (C-8).

Tratando-se de um movimento periódico, há lugar para a definição de Período. No entanto, o vector velocidade é não só variável ao longo da órbita elíptica (maior junto do Perigeu do que junto do Apogeu), como as acções perturbadoras do movimento orbital induzem flutuações que se repercutem no comportamento do satélite na sua órbita, modificando-lhe continuamente a Atitude e os valores de alguns parâmetros de posição. Esta componente flutuante provoca naturalmente variações nos sucessivos períodos de órbita.

No estudo das órbitas dos satélites artificiais em torno da Terra é usual considerarem-se as seguintes duas localizações relativamente às quais se referenciam os Períodos de revolução: o Nodo Ascendente e o Perigeu.

Assim, têm-se:

1- Período Anomalístico (T_P):

Intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas pelo Perigeu.

2- Período Sinódico (T_S):

Intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas pelo Nudo Ascendente.

C.1.4 Atitude de um Satélite. Parâmetros de Atitude

Designa-se por 'Atitude' de um satélite o estado de orientação de um sistema de eixos que lhe é intrínseco relativamente a um outro sistema de eixos de referência.

A Atitude pode ainda considerar-se 'Diferencial' quando o estado de orientação é referido à posição nominal dos eixos do satélite (avaliam-se assim os desvios) e 'Absoluta' quando o sistema de referência é fixo.

Chamam-se 'Parâmetros de Atitude', às grandezas que caracterizam os 6 graus de liberdade de movimentos que são permitidos a um corpo no espaço, as quais têm as seguintes designações (Figura C.3):

1- Balanço Transversal (em inglês/americano, Roll; em francês, Roulis), ou também Balanço de Bombordo-Estibordo:

Valor angular da rotação em torno de um eixo paralelo à direcção de movimento.

2- Gálear (Pitch; Tangage), ou Balanço Proa-Popa ou Longitudinal:

Valor angular da rotação em torno de um eixo 'horizontal' normal à direcção do movimento, provocando um 'levantar ou baixar do nariz' do satélite relativamente à linha do horizonte (artificial).

3- Guinada (Yaw; Lacet):

Valor angular da rotação em torno de um eixo 'vertical', normal à direcção do movimento.

4- Arfagem (Heave; Cavalement):

Valor do deslocamento linear ao longo do eixo vertical.

5- Oscilação lateral (Sway, Dérapage):

Valor do deslocamento linear ao longo do eixo 'horizontal' normal à direcção do movimento.

6- Oscilação Longitudinal (Surge, Pilonnement):

Valor do deslocamento linear na direcção do movimento.

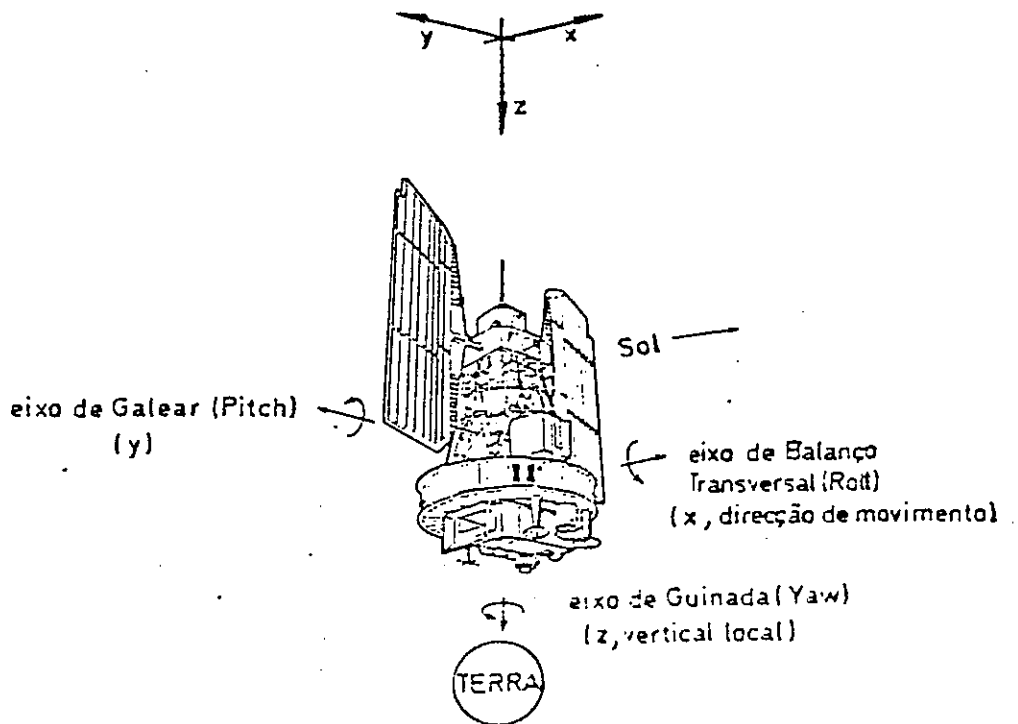


Figura C.3
Parâmetros de Atitude

A terminologia portuguesa aqui apresentada(*) é a que se utiliza em linguagem náutica, o que aliás também acontece em outras línguas, considerando-se contudo, que a terminologia deveria ser diferente, pelo menos em alguns dos parâmetros, pois é difícil identificar num satélite uma 'Proa' e uma 'Popa', como acontece com um navio.

E o caso de alguns satélites geostacionários (METEOSAT, p.ex.), de forma cilíndrica, em permanente rotação em torno de um eixo.

(*) - transmitida pelo colega Eng. Marcos Rita, a quem se agradece.

Destes 6 parâmetros de Atitude, somente os 4 primeiros têm interesse no estudo das órbitas dos satélites de detecção remota, em especial nos trabalhos de correção geométrica das imagens deles obtidas.

De facto, o Galear (Pitch) e a Guinada (Yaw) provocam um 'cavaleamento' das linhas observadas (quando a observação é feita por radiómetros de varrimento, p.ex.), 'paralelo' no primeiro caso e 'obliquo' no segundo. O Balanço Transversal (Roll) provoca desfazamento 'horizontal' paralelo entre as linhas e a Arfagem (Heave) provoca uma alteração nas dimensões das linhas (mais longa e mais larga se há aumento de altitude, o inverso se diminuição) ou dos elementos da linha (pixeis) entre si (Figura C.4).

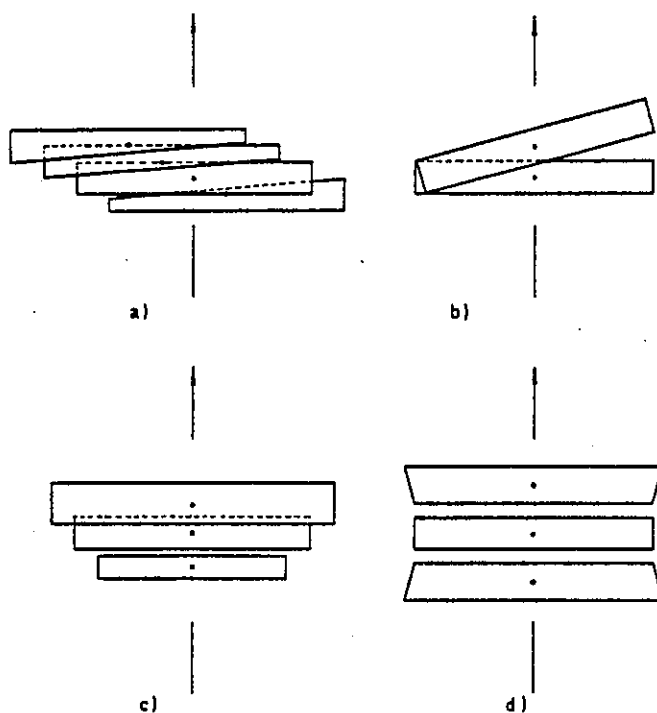


Figura C.4

Efeitos da Atitude Diferencial nas Linhas Observadas

- a) Balanço Transversal (Roll);
- b) Guinada (Yaw);
- c) Arfagem (Heave);
- d) Galear (Pitch);

C.2 EQUACÖES GERAIS DO MOVIMENTO ORBITAL

C.2.1 Leis Fundamentais

O movimento dos corpos celestes no espaço é regido por leis físicas das quais se destacam as de Kepler (ou das órbitas planetárias) e as de Newton (ou da atracção universal).

C.2.1.1 Leis de Kepler

Por observações astronómicas, Kepler deduziu um conjunto de relações empíricas sobre o movimento dos planetas do sistema solar.

1- 1ª. Lei (sobre as órbitas):

"No sistema solar, todos os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, o qual ocupa um dos focos".

2- 2ª. Lei (ou das áreas):

"O raio vector dirigido do Sol a cada planeta descreve áreas iguais em tempos iguais".

Desta lei e da anterior, conclui-se que a velocidade dos planetas é maior no Perihélio do que no Afélio.

3- 3ª. Lei (ou dos períodos):

"O quadrado dos períodos de revolução dos planetas é proporcional ao cubo das suas distâncias médias ao Sol".

C.2.1.2 Leis de Newton

Na sequência das leis do movimento, Newton deduziu também a que ficou conhecida por:

Lei da Gravitação Universal:

"Quaisquer 2 corpos do universo exercem uma atracção mútua cuja força é directamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente

proporcional ao quadrado das distâncias que os separam'.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (C-9)$$

A constante de proporcionalidade, G, chama-se 'Constante de Gravitação Universal' e tem o valor $6.373E-8 \text{ dine.cm}^2/\text{g}^2$.

C.2.2 Condições de Equilíbrio ou do Movimento

O movimento adquirido por um satélite é resultado da conjugação da acção de duas forças: a da atracção exercida pelo corpo celeste em torno do qual gira (Lei de Newton); e da força centrífuga criada pelo estado de movimento de rotação ou orbital:

$$\vec{F}_{atr} + \vec{F}_{cent} = 0$$

Num referencial ortogonal, centrado no corpo celeste de maior massa (por hipótese a Terra), a Lei de Gravitação Universal pode escrever-se, para cada um dos eixos:

$$F_{atr_x} = F_{atr} \cos(\theta_x) = F_{atr} \frac{x_s - x_T}{d} = G m_T m_s \frac{x_s - x_T}{d^3} \quad (C-10a)$$

$$F_{atr_y} = G m_T m_s \frac{y_s - y_T}{d^3} \quad (C-10b)$$

$$F_{atr_z} = G m_T m_s \frac{z_s - z_T}{d^3} \quad (C-10c)$$

ou, genericamente:

$$\vec{F}_{atr} = G m_T m_s \frac{\vec{d}}{d^3} \quad (C-11)$$

Recorrendo à 2ª. Lei do movimento de Newton (as forças são proporcionais às acelerações que provocam) tem-se, para condição de equilíbrio:

$$\vec{F}_{atr} = G m_T m_s \frac{\vec{d}}{d^3} = m_s \frac{d^2 \vec{d}}{dt^2} = \vec{F} \quad (C-12)$$

donde se obtém a equação do movimento:

$$\frac{d^2 \bar{d}}{dt^2} = -G m_T \left(\frac{m_s + m_T}{m_T} \right) \frac{\bar{d}}{d^3} \quad (C-13)$$

ou, como também é conhecida esta equação:

$$\frac{d^2 \bar{d}}{dt^2} = -\mu \frac{\bar{d}}{d^3} \quad (C-14)$$

com:

$$K^2 = G m_T$$
$$\mu = \frac{m_s + m_T}{m_T}, \text{ unidade de massa normalizada.}$$

A dupla integração da equação (C-14) dá a posição que o satélite ocupa em cada instante, a qual se exprime, num referencial apropriadamente escolhido, em função dos valores que tomam os 6 parâmetros orbitais e de posição do satélite atrás referidos: Inclinação, Ascensão Recta do Nódo Ascendente, Argumento do Periseu, Anomalia Verdadeira (ou Média ou Excêntrica), Semi-eixo Maior e Excentricidade.

C.3 SISTEMAS DE COORDENADAS

Além do posicionamento do satélite na sua órbita, obtido pela equação (C-14), há conveniência em determinar as suas coordenadas sobre a superfície terrestre, ou seja, as coordenadas do Nadir do satélite, como também são designadas.

Estas coordenadas sobre a superfície terrestre definem, no seu conjunto, o 'Traço' do satélite (Ground Track).

O sistema de coordenadas em que se representam pode ser o Horizontal (Azimute da rota, p.ex.) ou o Geográfico (Latitude, Longitude). E este último o mais utilizado.

C.3.1 Sistemas de Eixos

Em Mecânica Orbital, são geralmente considerados os seguintes referenciais:

C.3.1.1 No Plano Orbital

Sistema de eixos ortogonais X_s , Y_s , com origem no foco da elipse (centro da Terra) e com a seguinte orientação (Figura C.5):

- 1- Eixo X_s , orientado para o Periseu;
- 2- Eixo Y_s , contido no plano orbital, normal a X_s no sentido directo.

Neste sistema de eixos, as coordenadas rectangulares de posição do satélite num determinado instante, conhecidas as suas coordenadas polares, são:

$$x_s = r \cos(\theta) \quad (C-15a)$$

$$y_s = r \sin(\theta) \quad (C-15b)$$

As expressões (C-4), (C-5), (C-6) e (C-8) permitem obter os valores destas coordenadas se forem conhecidos os valores das Anomalias Média (M) ou Excêntrica (E). Por exemplo, em função da Anomalia Excêntrica, ter-se-ia:

$$x_s = a (\cos(E) - e) \quad (C-16a)$$

$$y_s = a \sin(E) (1 - e^2)^{1/2} \quad (C-16b)$$

C.3.1.2 Referencial Terrestre

Como é sabido, qualquer ponto da superfície terrestre é univocamente determinado pelos pares de valores (Latitude, Longitude). No entanto, por ser relativo a um meridiano de referência (o de Greenwich, por convenção internacional), não exprime convenientemente a posição do ponto NO TEMPO; devido aos movimentos de rotação e translação da Terra.

Por outras palavras, sendo a variável "tempo" a representação analógica das coordenadas de determinados astros de referência (o Sol, em particular), o

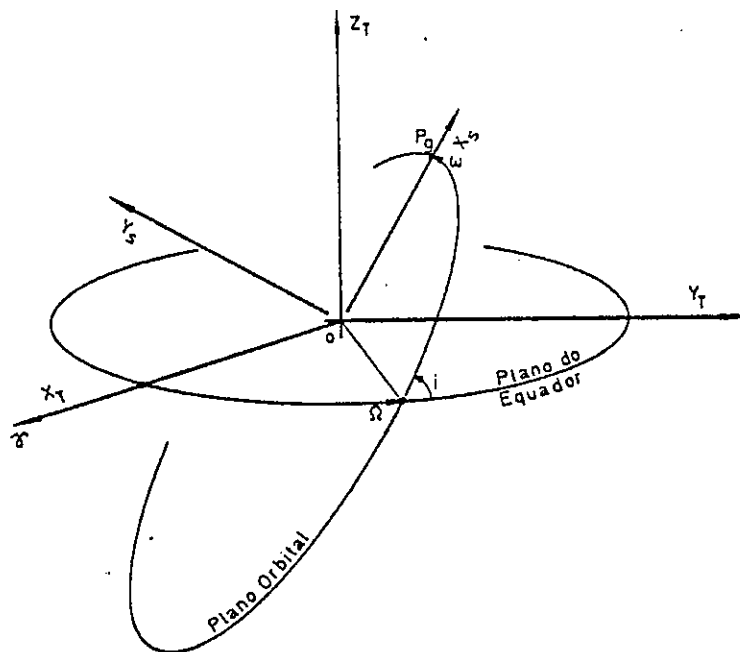


Figura C.5
Sistemas de Coordenadas

o sistema de coordenadas "Latitude, Longitude terrestres" não é um referencial de inércia.

Para que seja satisfeita esta condição, o referencial terrestre considerado é um sistema de eixos X_T, Y_T, Z_T , de origem no centro da Terra e com a seguinte orientação (Figura C.5):

- 1- Eixo X_T , para o Ponto Vernal, no plano do Equador;
- 2- Eixo Y_T , no plano do Equador, normal a X_T no sentido directo;
- 3- Eixo Z_T , normal ao plano do Equador, coincidente com o eixo de rotação da Terra e orientado para o Pólo Norte.

C.3.2 Transformação de Coordenadas

A partir dos elementos orbitais (Ω, ω, i) , os dois sistemas (X_t, Y_t, Z_t) e (X_s, Y_s) relacionam-se através das seguintes equações:

$$x_T = [\cos(\omega) \cos(\Omega) - \sin(\omega) \sin(\Omega) \cos(i)] x_s - [\sin(\omega) \cos(\Omega) + \cos(\omega) \sin(\Omega) \cos(i)] y_s \quad (C-17a)$$

$$y_T = [\cos(\omega) \sin(\Omega) + \sin(\omega) \sin(\Omega) \cos(i)] x_s - [\sin(\omega) \sin(\Omega) - \cos(\omega) \cos(\Omega) \cos(i)] y_s \quad (C-17b)$$

$$z_T = [\sin(\omega) \sin(i)] x_s + [\cos(\omega) \sin(i)] y_s \quad (C-17c)$$

ou seja

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} \\ A_{zx} & A_{zy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (C-18)$$

ou ainda mais simplificada:

$$C_T = A C_s \quad (C-19)$$

em que C_t é o vector das coordenadas no sistema (X_t, Y_t, Z_t) , C_s o das coordenadas no sistema (X_s, Y_s) do plano orbital e A a matriz de transformação das coordenadas.

C.3.3 Coordenadas Geográficas do Nadir

O ponto de intersecção do vector de posição do satélite com a superfície terrestre chama-se 'Nadir do satélite', e corresponde ao ponto de encontro do eixo vertical deste com aquela.

Conhecidas as coordenadas no plano orbital (X_s, Y_s) , em determinado instante, tem interesse saber que ponto da superfície está a ser sobrevoado, ou, se atendermos aos sensores de bordo, que pontos da superfície estão a ser observados 'naquele' instante.

Fala-se assim das coordenadas geográficas do Nadir ou, mais genericamente, do conjunto de pontos correspondentes a sucessivos instantes, determinando a trajectória superficial ou o Traço do Nadir.

A Latitude e a Longitude do Nadir em cada instante são obtidas, a partir das

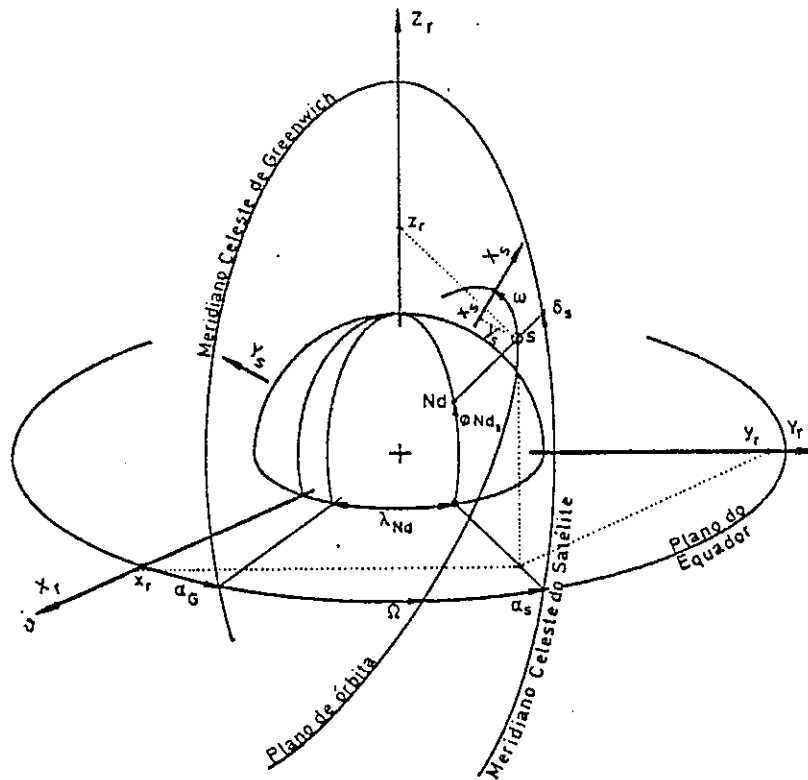


Figura C.6
Coordenadas Instantâneas de Posição

coordenadas (x_t, y_t, z_t) pelas expressões:

- 1- Relação entre a Latitude do Nadir (ϕ_{Nd}), ou a Declinação (δ_s) do satélite, e as coordenadas (x_T, y_T, z_T) :

$$\phi_{Nd} = \delta_s = \text{arc tg} \left(\frac{z_T}{(x_T^2 + y_T^2)^{1/2}} \right) \quad (C-20)$$

- 2- Relação entre a Longitude do Nadir (λ_{Nd}) e as Ascensões Rectas do Meridiano Celeste que contém o satélite neste instante (α_s) e do Meridiano de Greenwich (α_G):

$$\lambda_{Nd} = \alpha_s - \alpha_G \quad (C-21)$$

tal que:

- a) se $\lambda_{Nd} < 0$, o satélite encontra-se a Oeste de Greenwich;

b) se $\lambda Nds > 0$, o satélite está a Este de Greenwich.

A Ascensão Recta do Meridiano do satélite (α_s) nesse instante é, evidentemente, função das coordenadas (x_T, y_T, z_T):

$$\alpha_s = \text{arc tg} \left(\frac{y_T}{x_T} \right) \quad (C-22)$$

A Ascensão Recta do Meridiano de Greenwich (α_G) é, por sua vez, função do instante (Ano, Mês, Dia, Hora, Minuto e Segundo), dado em Tempo Universal (em geral) e é tabelado nos Almanaques Astronómicos. Pode também calcular-se a partir da Ascensão Recta deste Meridiano no instante equinocial Vernal, o que também é tabelado.

Para se calcular a posição geográfica do Nadir do satélite, i.e., aplicar as expressões (C-18) e (C-19) (através de (C-20)), é, antes de mais, necessário exprimir as coordenadas (x_T, y_T, z_T) em função dos valores conhecidos dos parâmetros orbitais, ou seja, das coordenadas (x_S, y_S).

C.4 ESTUDO DO MOVIMENTO ORBITAL

Como se disse em parágrafo anterior, o movimento adquirido por um satélite é resultante da acção conjugada das forças atractiva e centrífuga exercidas sobre o satélite. Outros agentes, designados por 'perturbadores', condicionam no entanto e também a órbita "exacta" descrita pelo satélite, desviando-a do modelo "ideal" circular.

Alguns desses agentes permitem, curiosamente, que se obtenham órbitas de particular interesse em detecção remota dos recursos terrestres, como o são as órbitas hélio-síncronas, de que se falará mais adiante.

C.4.1 Acções e Efeitos Perturbadores

Os principais agentes perturbadores da órbita teoricamente descrita por um satélite são os seguintes:

- 1- Não esfericidade e irregularidade gravítica (ou gravimétrica) da Terra;
- 2- Atrito Atmosférico;
- 3- Variabilidade da acção atractiva do Sol, da Lua e de outros planetas;
- 4- Vento solar; pressão radiométrica; bombardeamento de partículas; etc.

O último agente é particularmente importante em satélites de grandes dimensões e/ou orbitando a altitudes elevadas devendo o seu efeito ser devidamente considerado no projecto das suas missões.

Do 3o. agente listado, destaca-se a Lua como o mais importante (cerca de 3 vezes superior à acção perturbadora do Sol), causando uma variação diária da altitude e, com período mais longo, da Inclinação (i) da órbita.

DUCK et al. 1983 citam que para uma Inclinação inicialmente nula (caso dos satélites geostacionários), esta variação pode vir a atingir valores de $+14.67$ a -14.67 graus num período de 26.6 anos.

Conhecedores deste efeito, e de modo a reduzir o consumo de combustível em manobras de correcção permanente de órbita, as condições de lançamento dos satélites (Data, Hora, Velocidade de lançamento, Inclinação, etc.) são cuidadosamente conjugadas para se tirar partido do efeito: Inclinação inicial de sentido oposto ao que a acção gravítica da Lua induz e escolha apropriada dos Nodos Ascendentes, permitindo que o satélite se mantenha por tempo prolongado numa órbita tão próxima da nominalmente pretendida quanto possível, ao longo do seu tempo de vida (aproximadamente 5 anos), sendo os desvios corrigidos por meio dos foguetes de correcção de órbita (cf. ob. citada).

Quanto ao Atrito Atmosférico, ele é, obviamente, mais importante para os satélites de órbita de baixa altitude (inferior a 850km, segundo diversos autores, incluindo-se neste grupo de satélites o Space Shuttle, o Skylab, etc.) e tem como efeito uma diminuição progressiva da altitude se não se aplicam as manobras correctivas adequadas

São a não esfericidade da Terra (protuberância equatorial) e a heterogeneidade gravítica deste planeta os principais agentes perturbadores das órbitas dos satélites.

O seu efeito é o da indução de uma variabilidade no tempo dos 6 parâmetros orbitais, sendo particularmente importante nos seguintes 3: Ascensão Recta do Nodo Ascendente (Ω); Argumento do Perigeu (w) e Período orbital.

As variações do Semi-eixo Maior (a), da Excentricidade (e) e da Inclinação (i) são consideradas de menor importância, traduzindo-se por pequenas oscilações em torno de um valor médio.

Os efeitos das acções perturbadoras sobre aqueles 3 parâmetros são então os seguintes:

1- Precessão do Nodo Ascendente, no sentido retrógrado:

De acordo com ESCOBAL 1965, citado por SMITH 1980, a precessão é dada pela expressão, simplificada:

$$\frac{d\Omega}{dt} \cong - \left[\frac{3}{2} J_2 (a(1-e^2))^{-2} \cos(i) n \right] \quad (C-23)$$

com:

$J_2 = 1082.28E-6$, termo de uma função de Bessel de 12.ª espécie cujo argumento é dependente da Excentricidade, e

$$n \cong K \left(\frac{\mu}{a^3} \right)^{1/2} \left[1 + \frac{3}{2} J_2 a^{-2} (1-e^2)^{-1/2} \left(1 - \frac{3}{2} \sin^2(i) \right) \right] \quad (C-24)$$

designado por 'Movimento Médio', relacionado com o período pela expressão

$$T = \frac{2\pi}{n} \quad (C-25)$$

ALOUGES 1973 apresenta uma expressão mais simplificada ainda, dada em função do Raio terrestre (R_T) por:

$$\frac{d\Omega}{dt} \cong -9.97 (R_T/a)^{7/2} \cos(i) \quad (C-26)$$

As expressões (C-23) e (C-26) ilustram a dependência da precessão do Nodo Ascendente com a Inclinação (i), entre outros parâmetros envolvidos, mostrando ser fraca para grandes inclinações (órbitas polares) e elevada para pequenas inclinações (órbitas geostacionárias).

De facto, no caso das órbitas geostacionárias ($i \neq 0$, $e \neq 0$), a precessão toma o valor de 0.01332 graus/dia, no sentido Este-Oeste. Este efeito, conjugado com o da Rotação do Perigeu, confere à órbita geostacionária uma trajectória em forma helicoidal, ou de sucessivos "oitos" em torno da linha equatorial.

2- Rotação do Perigeu:

As irregularidades geométricas e gravíticas da Terra provocam uma deslocação da posição do Perigeu no espaço, dando origem a uma 'Velocidade de Rotação' do Perigeu, que, segundo SMITH 1980 (continuando a citar ESCOBAL 1965), é dada por:

$$\frac{d\omega}{dt} \cong \left[\frac{3}{2} J_2 a^{-2} (1-e^2)^{-1} (2 - \sin^2(i)) \right] n \quad (C-27)$$

em que os parâmetros interventores têm o significado atrás referido.

ALDREES 1973 apresenta também uma fórmula simplificada para esta variação da posição do Perigeu

$$\frac{d\omega}{dt} \cong 4.98 (R_T/a)^{7/2} (5 \cos^2(i) - 1) \quad (C-28)$$

em graus/dia, referindo ainda que o movimento de rotação induzido ao Perigeu é no sentido directo para inclinações inferiores a 63.44 graus e retrógrado para inclinações superiores. RUCK et al. apresentam uma expressão semelhante.

Devido a esta rotação, o período de revolução é também variável no tempo e dependente do ponto de referência, como se mencionou atrás. A 3a. consequência das acções perturbadoras da protuberância equatorial é então:

3- Variação do período orbital:

Este é o parâmetro de avaliação mais incerta devido à rotação do Perigeu.

SMITH 1980 apresenta a expressão

$$T = 2 |t_{E_4}^+ - t_{E_4}^-| \quad (C-29)$$

para o valor do período orbital, em função dos instantes de cruzamento com o Equador nos Nodos Descendente ($t_{E_4}^-$) e Ascendente ($t_{E_4}^+$).

C.4.2 Análise de Algumas Orbitas Particulares

C.4.2.1 Orbitas Circulares

Estas são órbitas de existência teórica, pois como se viu, a 1ª. Lei de Kepler e o conjunto de acções exercidas sobre os corpos gravitacionais "obrigam" a que sejam elípticas.

No entanto, o seu estudo justifica-se na medida em que é possível colocar em órbita satélites de trajectória quase circular, considerando-se, para efeitos práticos como "verdadeiramente" circulares.

Assim, da equação de equilíbrio (C-14), pode escrever-se:

$$m_s \frac{V^2}{d} = m_s \frac{k^2 \mu}{d^2} \quad (C-30)$$

Desta equação, que traduz a igualdade das forças gravítica e centrífuga, obtêm-se as expressões da velocidade e do período de revolução, V e T :

$$V = K (\mu/d)^{1/2} \quad (C-31)$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{k^2 \mu} d^3 \quad (C-32)$$

C.4.2.2. Orbitas Geostacionárias

Chamam-se 'Geostacionárias' as órbitas que têm período de revolução igual ao de uma rotação completa da Terra em torno de seu eixo (24 horas), e no mesmo sentido.

Com tal período de revolução, e uma inclinação nula, o satélite parece manter-se fixo (estacionário) sobre o mesmo ponto geográfico (do Equador).

Pela equação (C-32), para $T=24$ horas (1440 minutos), conclui-se que a altitude de um satélite geostacionário é cerca de 36000km.

São órbitas particularmente úteis em telecomunicações intercontinentais e em Meteorologia, pois, nesta última aplicação, permitem o acompanhamento da evolução da situação meteorológica de vastas regiões sob o satélite, embora limitadas a latitudes pouco acima das médias, por a curvatura do globo terrestre introduzir distorções geométricas consideráveis, reduzindo o interesse da observação de regiões vizinhas dos polos (latitudes superiores a 60 graus, aproximadamente) por este modo.

C.4.2.3. Orbitas Hélio-síncronas

Chamam-se órbitas 'Hélio-síncronas' àquelas cujo plano mantém um ângulo 'constante' com os raios solares (figura C-7).

Esta condição é conseguida através do aproveitamento do fenómeno 'Precessão do Nodo Ascendente' e com uma escolha criteriosa de outros parâmetros orbitais.

De facto, obrigando a protuberância equatorial à precessão do Nodo Ascendente, em sentido retrógrado (directão Este-Oeste), traduzida analiticamente pela equação (C-26) por exemplo, consegue-se uma órbita hélio-síncrona obrigando a que o ritmo desta precessão seja igual à 'velocidade média' diária do Sol Médio 'em torno' da Terra.

Esta 'velocidade média', é igual a 360 graus (translação angular anual) dividido pelo número de dias solares médios (365,25, aproximadamente) ou seja, cerca de 0.9856 graus/dia.

Assim, a condição de hélio-sincronicidade é dada pela equação

$$\frac{d\Omega}{dt} = 0.9856 \text{ graus/dia} = -9.97 \left(\frac{R_T}{a} \right)^{7/2} \cos(i) \quad (C-33)$$

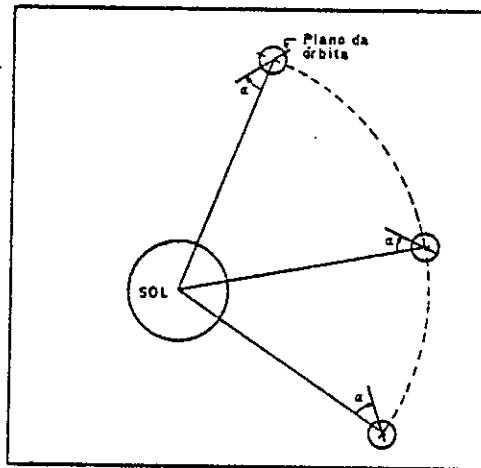


Figura C.7
Órbitas Helio-síncronas

Desta equação, dois parâmetros, 'i' e 'a' permitem uma escolha particular para a órbita, função de determinados objectivos.

A propósito de Inclinação e de órbitas helio-síncronas, é curioso notar que estas, pela equação (C-33), impõem um valor para a Inclinação superior a 90 graus.

A terminar estas considerações sobre as órbitas helio-síncronas, refere-se que o seu principal interesse resulta do facto de os dados obtidos a partir delas serem colhidos, para cada local, à mesma Hora Solar Local (HSL), a qual é só função da Latitude, para uma dada Inclinação e uma dada órbita.

Esta característica é particularmente útil no estudo de fenómenos cíclicos ou variáveis no tempo, e para os quais haja interesse em acompanhar a sua evolução em condições de observação 'constantes' ('mesmo' Azimute solar).

Não se deve confundir esta 'constância' do instante, ou das condições de observação, com constância das condições de iluminação, como é referido em alguns textos, pois estas variam naturalmente ao longo do ano com a Altura (Elevação) do Sol.

C.4.3 Padrões de Repetição da Passagem sobre um Local

No projecto de órbitas de satélites de detecção remota para o estudo dos recursos naturais interessa impor determinadas condições de repetitividade da observação sobre determinado local, permitindo o acompanhamento periódico de qualquer fenómeno que ocorra na superfície terrestre, nesse local.

Fala-se, assim, de 'Padrões de Repetição' da cobertura permitida por determinada órbita.

Para além da dependência da Inclinação, que indica que locais podem ou não ser observados, e da eventual sobreposição lateral permitida pela largura das faixas de observação dos equipamentos sensores entre duas órbitas contíguas, obviamente que as condições de passagens sucessivas sobre um mesmo local serão função da relação entre as velocidades angulares de rotação do satélite e da Terra, e dos respectivos períodos.

Dois casos se podem considerar desde logo:

- 1- O quociente entre os períodos de rotação da Terra e do satélite é um número inteiro, I .

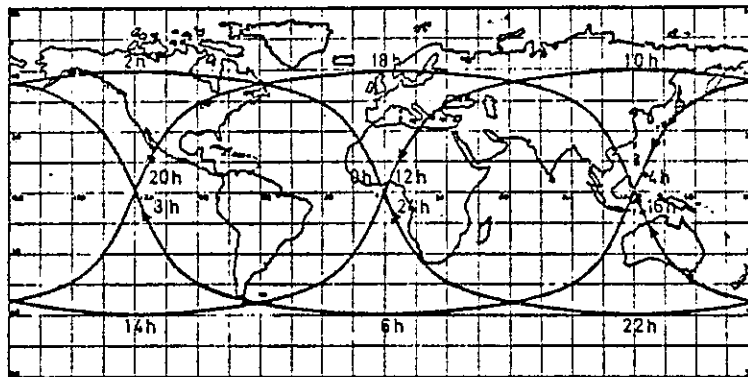
Este número representa, afinal, o número de órbitas ao fim das quais o satélite volta a sobrevoar o mesmo ponto.

Sendo o quociente um número inteiro, os locais sobrevoados são sempre os mesmos, i.e., as órbitas percorreriam sempre os mesmos traços do Nadir.

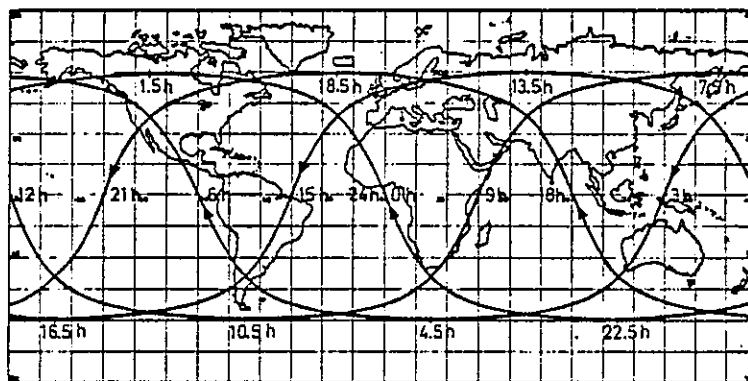
As figuras C.8a e C.8b ilustram este casos com $I=3$ e $I=4$, respectivamente.

Resulta desta conclusão que, exceptuando as perturbações anteriormente referidas, e que afectam os planos orbitais, e as de valores elevados de I , que garantem um espaçamento estreito entre órbitas contíguas, um padrão de repetição baseado numa relação inteira entre os períodos não oferece uma cobertura extensiva do globo terrestre (em Longitude, para dada Inclinação).

Um aproveitamento mais eficaz da missão do satélite seria conseguido providenciando uma precessão do Nodo Ascendente de tal modo que todas as regiões do globo terrestre (confinadas entre duas latitudes, a Norte e a Sul do



a) $1 = \frac{T_T}{T_S} = 3$



b) $1 = \frac{T_T}{T_S} = 4$

Figura C.8
Padrões de Repetição de Orbitas Helio-síncronas

Equador, definidas pela Inclinação orbital) fossem sobrevoadas periodicamente, mas com periodicidade (frequência) não necessariamente diária (como a que se obtém com uma relação inteira entre os períodos).

2- O quociente entre os períodos é um número real, R.

Neste caso, o Padrão de Repetição é dado pela expressão:

$$\frac{T_T}{T_S} = R = \frac{I_s}{I_T} \tag{C-34}$$

em que I_s e I_t são dois números inteiros.

Uma vez que T_t é fixo e inteiro (quando expresso em dias (1), horas (24), minutos (1440) ou segundos (86400)), aquela expressão é equivalente a

$$I_s T_s = I_T T_T = \text{número inteiro} \quad (C-35)$$

Ao número I_t , que satisfaz a relação (C-35), dá-se o nome de 'Ciclo de Cobertura', 'Período de Repetição', ou 'Padrão de Repetição' (PR), e traduz o número de dias findos os quais se repetem as órbitas.

O valor I_s traduz o número de órbitas percorridas pelo satélite para realizar o Ciclo de Cobertura.

Um método de cálculo dos valores I_s e I_t é o da decomposição de cada um dos períodos T_t e T_s nos menores múltiplos comuns respectivos, seguido da eliminação dos termos ou factores comuns.

Outro método de cálculo do Período de Repetição baseia-se na relação entre as Precessões 'inter-órbitas' e 'inter-dias' (ou entre dias consecutivos) dos Nodos Ascendentes.

Seja R (número real) o número de órbitas diárias (T_t/T_s). Seja I um número inteiro tal que $R = I - \epsilon$, com ϵ pequeno.

A Precessão inter-órbita (P_{io}) é dada pelo valor angular da rotação da Terra durante um período de revolução do satélite em torno daquela

$$P_{io} = \frac{360}{\left(\frac{T_T}{T_S}\right)} = \frac{360}{R} \quad (C-36)$$

e a Precessão entre dois dias consecutivos (P_{dc}) é dada por

$$P_{dc} = (R + \epsilon)P_{io} - 360^\circ \quad (C-37)$$

Se ' P_{io} ' for múltiplo de ' P_{dc} ', então o Período de Repetição é dado pelo quociente entre ambos:

$$PR = \frac{P_{io}}{P_{dc}} = \frac{1}{\epsilon} \quad (C-38)$$

A finalizar estes comentários sobre os Períodos de Repetição, refere-se que, na prática, os valores por que se exprimem são aproximados, baseados na sobreposição de zonas geográficas observadas pelos radiómetros instalados a bordo, e não pela sobreposição 'exacta' das órbitas descritas.

Assim, por exemplo os satélites LANDSAT 4 e 5, com um período de 98 minutos, teriam um Padrão de Repetição de 49 dias de acordo com as relações atrás apresentadas, mas as referências disponíveis sobre estes satélites citam um valor de 16 dias apenas para aquele parâmetro.

BIBLIOGRAFIA

ALOUGES, A.

'Notions de Mécanique d'Orbite'

in 'La Télédétection des Ressources Terrestres', Tarbés, 21Aso-20Set 1973,
CNES-ONU, 1973.

DUCK, Keneth I.; KING, Joseph C.

'Orbital Mechanics for Remote Sensing'

in Man. Rem. Sensing, Vol.I, Cap.16, 2a.Ed., ASP, 1983.

SMITH, Eric A.

'Orbital Mechanics and Analytic Modeling of Meteorological Satellite Orbits'

Atm. Sc. Paper No. 321, Colorado St. Univ., Fort Collins, 1980.

APENDICE D

O SATELITE NIMBUS-7, O RADIOMETRO CZCS E OS DADOS CRT

Descrevem-se neste Apêndice algumas das características do satélite Nimbus-7, lançado em Outubro de 1978, a bordo do qual estava instalado equipamento variado de detecção remota e de que se destaca o radiômetro CZCS, cujas características também se descrevem.

Os dados registados por este radiômetro constituem o que é costume designar por "dados CRT (Calibrated Radiance and Temperature)", os quais, após pré-processamento e formatação nas estações de recepção, são distribuídos em banda magnética, cujo formato é também descrito.

D.1 O SATELITE NIMBUS-7

D.1.1 Características Gerais

Estruturalmente, o satélite Nimbus-7 mantém as características das versões anteriores da série Nimbus (5 e 6, pelo menos) e que são semelhantes às dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3 (Figura D.1).

Distinguem-se no conjunto 3 partes:

1- Base de suporte (payload bay):

Na parte inferior do satélite, e que se mantém permanentemente voltada para a superfície terrestre, encontram-se os diversos equipamentos sensores, bem como alguns dos equipamentos de controle da Atitude do satélite.

Fazendo parte do conjunto dos equipamentos de detecção remota, também se localizam na base as antenas e os emissores de dados recolhidos para as estações de recepção em terra. Estes podem ser temporariamente arquivados a bordo em gravadores, enquanto o satélite não sobrevoa uma zona de "visão" de uma das estações de recepção capaz de os receber.

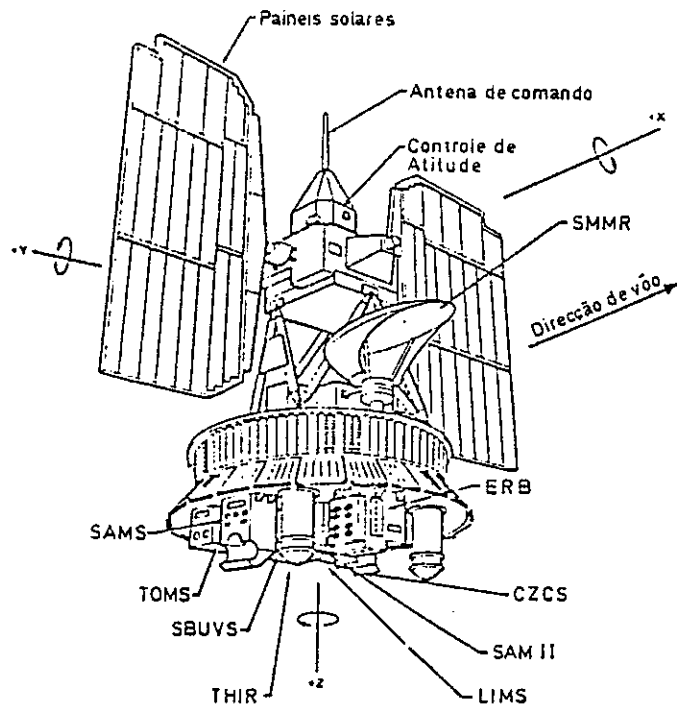


Figura D.1
O Satélite NIMBUS-7

2- Parte intermédia;

Esta parte intermédia é como um porão de carga. É aqui que se localizam os motores de correção orbital e os depósitos de combustível (hidrazina) que os alimentam.

Outros equipamentos também "arrumados" nesta zona, são as baterias de energia eléctrica, equipamento electrónico de controle de todo o processo de aquisição e de comando, etc.

3- Parte superior;

Na parte superior localizam-se a antena, os emissores/receptores de comando do satélite e os instrumentos de controle de Atitude, que têm por função garantirem com grande precisão a estabilidade deste.

4- Painéis solares:

Estes formam as grandes "asas" de 2,40x1,0m, que nos habituámos a ver nas gravuras dos satélites LANDSAT, constituídas por células foto-voltaicas capazes de transformar a energia solar nelas incidente em energia eléctrica, necessária ao funcionamento de todo o equipamento de bordo (entre 560 e 980 Watt).

Através de um microprocessador acoplado a motores, por sua vez ligados aos braços de sustentação dos painéis, estes adquirem relativamente ao Sol a posição mais adequada para a geração da quantidade de energia necessária em cada instante.

Os excessos de energia produzida são armazenados nas baterias, cuja presença se destina a "alimentar" os equipamentos nos instantes em que o satélite se encontra em sombra, havendo também um controle destinado a evitar que sejam sobrecarregadas ou danificadas por esse motivo.

D.1.2 Parâmetros e Características Orbitais

- 1- Tipo de órbita: helio-síncrona, quase circular, cruzando o Equador às 12 horas solares locais no trânsito ascendente;
- 2- Altitude: aproximadamente 935km;
- 3- Excentricidade: aproximadamente 0,000843;
- 4- Período: 104 minutos;
- 5- Inclinação: 99,3 graus;
- 6- Ciclo de repetição: 6 dias, 83 órbitas, com um erro aproximado de 1,3 graus Oeste (~144km) no Equador;
- 7- Número de órbitas diárias: 14;

- 8- Precessão do Nodo Ascendente entre órbitas consecutivas: 26,04 graus (~2890km) no Equador;
- 9- Precessão do Nodo Ascendente entre dias consecutivos: 4,56 graus Oeste (~506km) no Equador;
- 10- Peso: 750ks.

No Quadro D-I listam-se, para efeitos comparativos, as características de alguns dos satélites mais conhecidos, activos, desactivados (Skylab, HCMH, LANDSAT 1,2,3, por exemplo), ou a lançar em breve (SPOT).

QUADRO D-I
Parâmetros Orbitais de Alguns Satélites

Nome	Período (min)	Altitude (km)	Inclinação (graus)	Peso (ks)	C. Repet. (dias)
Nimbus-7	104	955	99,3	750	6
HCMH	97,2	620	97,6	134	16
LANDSAT(1,2,3)	103	~900	~99,1	~900	18
LANDSAT(4,5)	98	705	98,2	1630	16
SEASAT	100,8	800	108	2290	3
SKYLAB	93,2	450	50	90607	var
SPOT	101,4	832	98,7	800	26
TIRDS-N	102,1	856	98,9	785	10

D.1.3 Objectivos da Missão Nimbus-7

O programa da missão Nimbus-7 foi desenvolvido com vista à prossecução dos seguintes objectivos (ALLISON et al, 1983):

- 1- Desenvolvimento de equipamento radiométrico e espectrométrico para a observação diária da atmosfera terrestre, constituindo-se assim uma extensa base de dados meteorológicas que permitisse a previsão a "longo" prazo com mais fidelidade.
- 2- Desenvolvimento de equipamento passivo e activo para a observação da atmosfera e superfície terrestres.
- 3- Desenvolvimento de tecnologia espacial avançada, bem como das capacidades tecnológicas da componente terrestre (ground segment) para os programas meteorológicos, e outros, por satélite.
- 4- Desenvolvimento de novas técnicas e de conhecimentos que permitam o estudo da atmosfera de outros planetas por detecção remota.
- 5- Participação no Programa de Observação Meteorológica Mundial (World Weather Watch, WWW).

Deste modo e com estes objectivos ambiciosos, foi o satélite construído e lançado em Outubro de 1978, servindo de plataforma espacial a todo um conjunto de equipamentos desenvolvidos para teste de uma nova série de aparelhos a instalar nos satélites meteorológicos de órbita polar: os TIROS e os NOAA.

E, assim, um satélite experimental, e a maior parte dos dados obtidos pelos aparelhos a bordo têm um carácter experimental também, não sendo divulgados senão a um grupo restrito de investigadores.

E neste ambiente experimental do programa Nimbus-7 que se integra um sub-programa de observação oceanográfica, com a recolha de dados de radiação oceânica, para estudos de qualidade de água (suspensões e temperatura, p.ex.), os quais permitirão o traçado de cartas térmicas de superfície e, certamente, inferir sobre a produção primária sazonal de zonas de particular interesse económico para a indústria das pescas.

D.1.4 Equipamentos de Detecção Remota Instalados no Satélite Nimbus-7

Os equipamentos de detecção remota instalados a bordo do Nimbus-7 (payload) são os seguintes:

- 1- Radiómetro Multiespectral para a Determinação da Cór do Oceano (Coastal Zone Color Scanner, CZCS):

Este é o radiómetro que recolhe os dados para o sub-programa oceanográfico atrás referido e que é detalhado em parágrafo específico mais adiante.

- 2- Radiómetro Multiespectral de Micro-ondas (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR):

Provido de 5 canais (observa e mede a radiação em 5 frequências) adquire dados para o estudo do estado do mar (sea surface roughness), temperatura superficial (sea surface temperature, SST), ventos (direcção e intensidade), conteúdo de água equivalente do vapor de água atmosférico e das nuvens, quantidade de precipitação, identificação de áreas cobertas de neve e/ou gelo e humidade dos solos.

- 3- Sonda Estratosférica e Mesosférica (Stratospheric and Mesospheric Sounder, SAMS):

Observa e mede as concentrações dos constituintes atmosféricos (vapor de água, óxidos nítricos, gás metano e monóxido de carbono, p.ex.), tracando ainda o perfil térmico da atmosfera numa extensão vertical de cerca de 90km.

- 4- Espectrómetro das Radiações Solar e Ultravioleta na Atmosfera (Solar and Backscatter Ultraviolet Spectrometer/Total Ozone Mapping System, SBUVS/TOMS):

Tem por objectivo a medição da radiação solar incidente e da radiação ultravioleta directa e retrodifundida na atmosfera, avaliando-se deste modo a concentração de ozono, e, assim, o estado de poluição da atmosfera.

5- Radiómetro Estratosférico dos Aerossóis (Stratospheric Aerosol Measurement II Experiment, SAM II):

Observa e mede as concentrações e propriedades ópticas dos aerossóis estratosféricos, em função da altitude, latitude e longitude.

6- Radiómetro Infravermelho de Temperatura e Humidade (Temperature and Humidity Infrared Radiometer, THIR):

Mede a radiação terrestre em duas bandas de comprimento de onda (670 e 1100nm), para a cartografia da cobertura nebulosa, da termografia continental, oceânica e das nuvens, bem como da humidade atmosférica. É um sensor particularmente orientado para os estudos do balanço energético-radiativo global.

7- Radiómetro Infravermelho para a Estratosfera (Limb Infrared Monitor for the Stratosphere, LIMS):

Destina-se à observação selectiva dos gases presentes entre a Troposfera e a Mesosfera.

D.2 O RADIOMETRO CZCS

Tal como é referido na bibliografia, este radiómetro foi concebido para a observação exclusiva dos oceanos e das zonas costeiras.

Trata-se de um radiómetro passivo, operando em 6 bandas de comprimento de onda, especialmente escolhidas para o estudo dos parâmetros ópticos da água do mar.

De facto, dada a fraca capacidade reflectora e emissora das superfícies oceânicas, os sensores do radiómetro foram construídos de modo a apresentarem uma relação sinal/ruído elevada, saturando o sinal quando o campo de visão é constituído por massas continentais ou massas nebulosas.

D.2.1 Objectivos do Radiómetro CZCS

Como já se referiu atrás, este radiómetro foi projectado e construído de modo a fornecer informações e medir as propriedades ópticas das águas oceânicas.

Tendo em conta que estas são função da presença, da quantidade e da qualidade dos constituintes da água, é de esperar que os dados forneçam indicações sobre essa mesma presença, qualidade e quantidade.

Resumidamente, os objectivos a atingir com este radiómetro eram os seguintes:

- 1- Qualificação e quantificação de suspensões na água do mar, bem como da temperatura superficial;
- 2- Desenvolvimento experimental e contribuição para a definição das características radiométricas de futuros radiómetros especialmente orientados para a observação oceânica (de que é exemplo o Ocean Color Scanner, OCS).

QUADRO D-II
Características Radiométricas do CZCS

Canal	Banda Espectral (nm) (valor central)	Radiação Saturante (mW/cm ² /μm/sr)		Aplicação
		senho 0/1/2/3		
1	433- 453(443)	11.46/ 9.23/7.64/5.41		Clorofila
2	510- 530(520)	7.64/ 6.20/5.10/3.50		Clorofila
3	540- 560(550)	6.21/ 5.10/4.14/2.86		Sub. Amarela, Sedimentos
4	660- 680(670)	2.88/ 2.32/1.91/1.34		Separação terra-água
5	700- 800(750)	10.8 /10.8 /10.8/10.8		Separação terra-água
6	10500-12500(11500)	---		Temperatura

D.3 OS DADOS CZCS CRT

A informação recolhida pelo radiómetro CZCS é enviada via rádio para as estações de recepção onde sofre um tratamento prévio antes de ser formatada e gravada em banda magnética para distribuição e processamento propriamente dito.

D.3.1 Estações de Recepção e de Distribuição de Dados CZCS CRT

São várias as estações de recepção dos dados CZCS. Na Europa, a Agência Espacial Europeia, ESA, é a entidade que se ocupa desta tarefa, dispondo para o efeito de 2 estações oficiais de recepção, pré-processamento, arquivo e distribuição: em LANNION, França, e em MASPALOMAS, Ilhas Canárias.

Outras estações há com capacidade de recepção destes dados, nomeadamente em DUNDEE, Escócia (universidade local); em FARNBOROUGH, Inglaterra (RAE, Royal Aircraft Establishment) e, ao que se julga, em OBERPFAFANHOFEN, República Federal Alemã.

No entanto, somente as 2 estações atrás referidas são consideradas oficiais para a recepção e distribuição dos dados CZCS adquiridos "sobre" a Europa, estando integradas na rede EARTHNET(*) da ESA.

A figura D.3 reproduz o horizonte de recepção daquelas 2 estações.

O pré-processamento efectuado após a recepção consiste na formatação adequada dos dados, aos quais se juntam informações adicionais, como sejam, as referências geográficas (Image Location), solares, orbitais, temporais e radiométricas (parâmetros de calibração, p.ex.).

A pedido, o utilizador pode requerer imagens sob forma fotográfica expedita (quick looks) do conjunto de imagens (dados) existente em arquivo, permitindo-lhe assim a selecção das imagens de maior interesse para o estudo em vista, em função da zona geográfica, cobertura nebulosa, época do ano, etc.

Este pré-processamento dá origem à constituição de bandas magnéticas para processamento posterior em computador, designadas por "CZCS CRT CCTs" (CZCS Calibrated Radiance and Temperature Computer Compatible Tapes), gravadas a 1600bpi de densidade, 9 pistas.

(*) - Esta organização distribui também outros dados, nomeadamente os da série LANDSAT, do METEOSAT, do HCMH e do SEASAT.

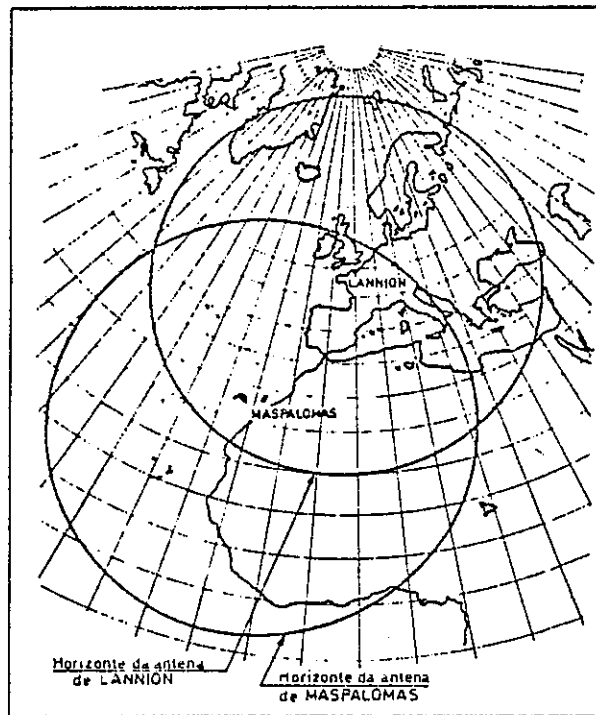


Figura D.3
 Estações da ESA de Recepção de Dados CZCS
 e Respectivo Horizonte de Recepção
 (in ESA BR-18)

D.3.2 Organização dos Dados CZCS CRT nas Bandas Magnéticas

D.3.2.1 Conceito de Imagem numa Banda CZCS CRT

Entre as diversas operações de pré-processamento efectuadas pelas estações de recepção e distribuição de dados, conta-se a da formatação.

A formatação consiste não somente em organizar os elementos relevantes dos dados adquiridos (radiações codificadas dos diversos canais, parâmetros de calibração, geometria orbital, etc.), em registos sequencialmente gravados numa banda magnética, de acordo com o que se define por IMAGEM para efeitos de distribuição.

De facto, uma vez em operação, o radiómetro CZCS capta a radiação

electromagnética proveniente da superfície terrestre sobrevoada, "constituindo" uma sucessão de linhas contínuas até que o seu funcionamento seja interrompido por comando à distância, ou término do seu programa de aquisição de dados, em geral controlado por "tempo de operação".

Os dados assim obtidos por sucessão de linhas, uma vez recebidos em terra, são subdivididos em conjuntos correspondentes a 2 minutos de operação do radiómetro, a partir das 0 horas TMC do Nodo Descendente de cada órbita.

Uma imagem CZCS CRT é pois um daqueles conjuntos, a que correspondem cerca de 970 linhas observadas em cada um dos 6 canais do aparelho.

Paralelamente à aquisição dos dados radiométricos propriamente ditos, são também registados elementos referentes às posições ocupadas pelo satélite no decurso da sua órbita, bem como do Sol, constituindo, no seu conjunto, os 'Dados de Localização' (Image Location Data).

Este conjunto de dados, devidamente referenciado no tempo, é também associado ao conjunto de dados radiométricos obtidos simultaneamente.

Assim, a imagem de dados CRT adquirida é constituída pelos dados radiométricos CZCS, recolhidos durante 2 minutos, e por informações aproximadamente simultâneas sobre a geometria orbital e solar, entre outras.

E este conjunto de dados que é gravado segundo formatação que adiante se descreve, numa banda magnética em 9 pistas e a 1600 hpi de densidade.

As bandas magnéticas utilizadas para esta finalidade têm, em geral, 2400 pés de comprimento(*), pelo que, àquela densidade, podem ser gravadas até 3 imagens tal como definidas anteriormente.

Deste modo, contrariamente ao que se passa com as imagens LANDSAT e as bandas magnéticas onde são registadas, não é possível estabelecer a correspondência "UMA banda magnética-UMA imagem (no sentido "extensão geográfica")" com os dados CZCS CRT, porquanto as 3 imagens de uma banda podem ser da mesma zona geográfica mas adquiridas em datas diferentes, ou três zonas geográficas distintas, nem sequer contínuas, adquiridas também em datas diferentes.

Mais ainda, o seu registo na banda magnética nem sequer tem de ser

(*) - 731,52m, mas são geralmente referenciadas em medidas inglesas.

cronologicamente sequencial. É apenas resultado de uma 'qualquer' ordem de gravação da estação emissora da banda, a partir do pedido efectuado pelo utilizador.

Por uma questão de economia, é pois conveniente fazer um pedido de pelo menos 3 imagens ou seus múltiplos (quando possível), ao solicitar-se a aquisição de dados CZCS CRT das zonas geográficas e nas datas de interesse.

D.3.2.2 Esquema da Organização de Dados numa Banda Magnética

Cada imagem CZCS CRT é gravada em 2 ficheiros:

- 1- Ficheiro Identificador (Header File);
- 2- Ficheiro de Dados (Data File).

Cada um daqueles ficheiros é formado por um certo número de registos (records), separados entre si por códigos de separação de registos (Inter Record Gaps, IRG). Os registos são, por sua vez, constituídos por um certo número de caracteres (bytes) organizados formando "campos de informação".

No Ficheiro Identificador são registadas informações relativas à identificação do conjunto de dados que integram o Ficheiro de Dados que se lhe segue, ou seja, a imagem.

Este, além dos dados radiométricos (e que são o objecto fundamental do seu conteúdo), contém informação adicional associada àqueles mesmos dados, nomeadamente, as referentes à calibração radiométrica e à geometria orbital, do Sol e da zona geográfica sobrevoada.

A Figura D.4 ilustra de modo esquemático a organização dos ficheiros de uma imagem CZCS CRT. Nos parágrafos seguintes descrevem-se pormenorizadamente cada um dos ficheiros e registos constituintes.

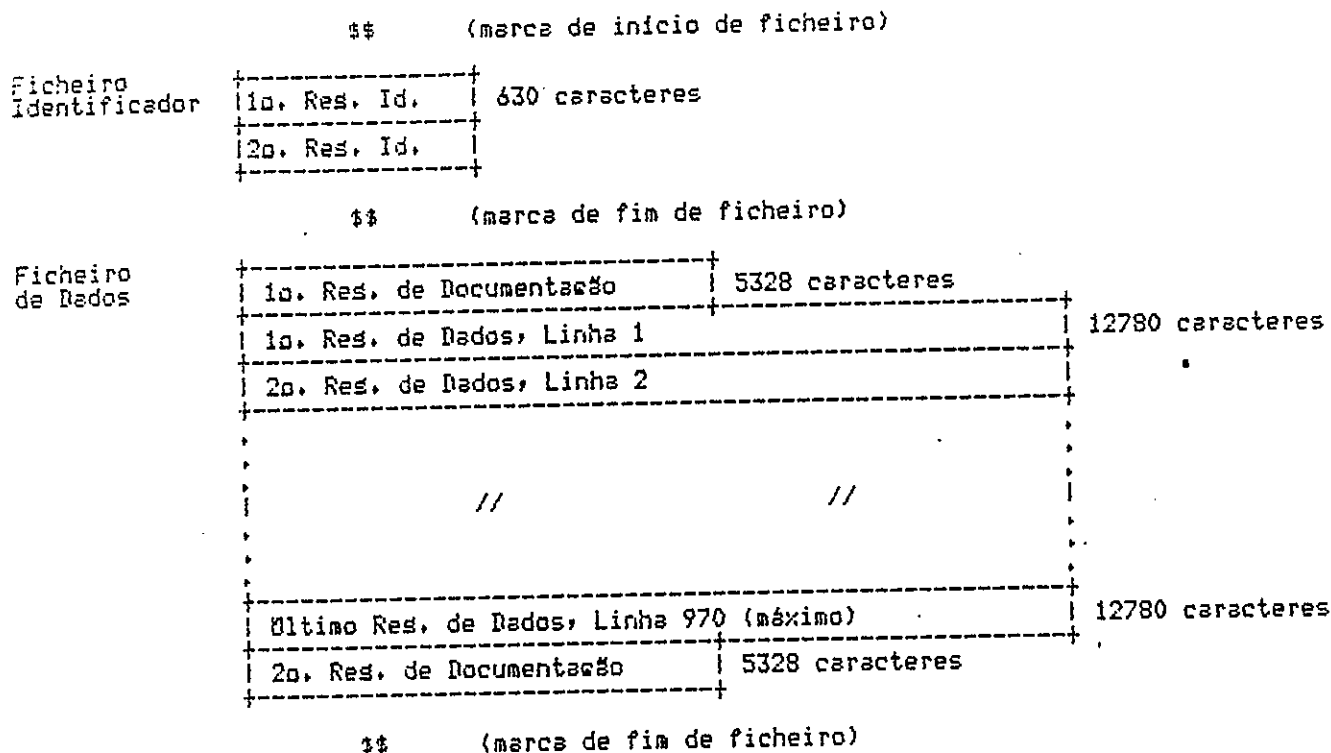


Figura D.4

Esquema de Organização dos Ficheiros numa Banda CZCS CRT

D.3.2.3 O Ficheiro Identificador

Este ficheiro é constituído por 2 registos de 630 caracteres cada. Estes identificam de modo apropriado a imagem reproduzida no Ficheiro de Dados, por data e instante de aquisição, data e instante de gravação da banda magnética, e ainda as entidades que a geraram e a quem se destina.

Os dois registos são inteiramente idênticos, ambos gravados em código EBCDIC, mas somente os primeiros 126 caracteres de cada um contêm informação, estando os restantes 504 em "branco".

De acordo com o manual das bandas magnéticas CRT, destina-se este espaço a ser preenchido com informação que as entidades receptoras (o utilizador e requisitante dos dados, p.ex.) entenderem dever juntar.

O conteúdo dos 126 caracteres é descrito no Quadro D-IV(*).

(*) - Dada a extensão do Quadro, bem como de outros semelhantes que a seguir se citam, estes são reproduzidos no fim deste Apêndice, depois da Bibliografia.

- 2- Segundo conjunto de dados sobre a Atitude do satélite, e da posição do Sol relativamente àquele, em 128 instantes (de segundo a segundo, num total de 2 minutos e 8 segundos), nenhum dos quais necessariamente coincidente com os 2 ou 3 instantes anteriores.

Este 'segundo conjunto de dados' da geometria de posição é obtido a partir de outros aparelhos e servem, simultaneamente, para confirmar os anteriormente registados e para apoio a cálculos interpolativos de posições intermédias ocupadas pelo satélite, p.ex.

- 3- Dados genéricos de referenciação dos elementos deste Registo de Localização com os elementos do Registo de Documentação, no qual se insere (identificação do número de órbita, número de ordem do ficheiro de Arquivos, etc.).

A propósito do controle da trajectória e da Atitude do satélite, o que é feito por outro equipamento de bordo, a informação respectiva é também integrada no conjunto de dados radiométricos, como se disse, referindo-se aquela a um período de 2 minutos e 8 segundos, o qual inclui o período de 2 minutos dos dados do CZCS.

Naquele período de 2 minutos e 8 segundos distinguem-se 8 intervalos de 16 segundos cada (8x16 segundos), designados por VIP MAJOR-FRAMES, VIP-MF, durante os quais é obtida informação referente às posições ocupadas pelo satélite e pelo Sol. Cada um dos VIP-MF é, por sua vez, constituído por 80 VIP MINOR-FRAMES, VIP-mf, de 200 milissegundos de intervalo de tempo cada, os quais se consideram agrupados de 5 em 5 VIP-mf, ou seja, em intervalos de 1 segundo.

Deste modo, no Registo de Localização, dispõe-se de informação sobre a Atitude do satélite, e da posição do Sol relativamente a este, de segundo a segundo (5 VIP-mf), em grupos de 16 (1 VIP-MF), a que se associa (registra) previamente o instante (dia, hora e segundo), num total de 8 conjuntos (8 VIP-MF), perfazendo os 2 minutos e 8 segundos.

No Quadro II-VI reproduz-se a descrição dos campos do Registo de Localização.

D.3.2.4.3 Os Registos de Dados

Em número máximo de 970 registos, correspondendo a 970 linhas observadas pelo radiómetro, os Registos de Dados são constituídos por 12780 caracteres cada.

De entre estes, destacam-se, naturalmente, os caracteres correspondentes às radiancias dos 1968 pixels de cada linha observada, em número de 11808 (6 canaisx1968 caracteres/canal).

Nos Registos de Dados distinguem-se os seguintes conjuntos:

1- Radiancias dos 1968 pixels de cada um dos 6 canais, codificadas em números inteiros de valor compreendido entre 0 e 255 (8 bits).

2- Conjunto de 77 pixels coordenados em Longitude e Latitude, em cada linha.

O número de ordem dos pixels coordenados (anchor points), bem como a sua posição relativa ao ângulo de observação é descrito no Quadro D-VII.

3- Conjunto de valores de conversão em Volts das radiancias codificadas, para cada um dos 6 canais do radiómetro.

4- Outros elementos relativos à qualidade dos dados registados, ao estado do radiómetro, à referência dos dados no Arquivo de onde provêm, etc.

A semelhança dos registos anteriormente descritos, reproduz-se no Quadro D-VIII a constituição dos campos dos Registos de Dados.

BIBLIOGRAFIA

ALLISON, Lewis J.; SCHNAPF, Abraham

'Meteorological Satellites'

in Man. of Rem. Sensing, Vol. I, Cap. 14, ASP, 1983.

CRACKNELL, A.P.; SINGH, S.M.

'Coastal Zone Research Work at Dundee University Using Remote Sensing Techniques'

in Proc. of EARSeL-ESA Symp. on 'Appl. of Rem. Sens. on the Continental Shelf', VOSS, 19-20 Maio 1981, ESA SP-167, 1981.

ESA EARTHNET

'Nimbus-7 Coastal Zone Colour Scanner Data. Acquisition and Processing for EARTHNET'

in 'EARTHNET, The Story of Images', ESA BR-18, 1984.

JOLY, Gérard

'Les Données Images'

Col. Télédétection Satellitaire, Paradigme, CAEN, 1984.

SHERMAN, John W.

'SEASAT and Nimbus-G: Applications to Marine Weather'

Mariners Weather Log, (ed. desconhecido), 1977.

QUADRO D-IV

Descrição do Formato das Bandas CZCS CRT

Ficheiro de Identificação

NIMBUS-7 CZCS

Especificação das Bandas Magnéticas

Ficheiro 'IDENTIFICACAO' / 'STANDARD HEADER' (código EBCDIC, 630 caracteres)

(2 registos)

Ref.	Núm. de Ordem do Carácter	Número de Caracteres	Descrição
A1	1-24	24	Texto: +-----+ NIMBUS-7 NOFS SPEC NO T +-----+
B1	25-30	6	Identificação codificada da Banda Magnética (RM): +-----+ uvxyz com: u - sensor (inteiro 1 a 9); +-----+ v - estação editora (idem); x - " distribuidora (idem); yy- número da RM; z - densidade de gravação.
C1	31-37	7	Texto: +-----+ SQ NO +-----+
D1	38, 39	2	Código PDFC (Project Data Format Code) (?)
E1	40-44	5	Número sequencial da RM +-----+ ttttt NOTA: se este valor for 0, os dados estão +-----+ incompletos;
F1	45, 46	2	Texto e Número de Ordem da Cópia: +--+ -a a = número de ordens; +--+
G1	47-52	6	Texto c/ Identificação Explícita do Sensor: +-----+ bbbb bbbb = nome do sensor; +-----+
H1	53-56	4	Texto c/ Identificação Explícita da Estação Editora da RM: +-----+ cccc cccc = nome da estação; +-----+
I1	57-60	4	Texto: +-----+ TO +-----+

Quadro B-IV (cont.)

Ref.	Núm. de Ordem	Número de Carácter	Descrição de Caracteres
J1	61-64	4	Texto c/ Identificação Explícita da Estação Distribuidora da BM: +----+ dddd dddd = nome da estação; +----+
K1	65-106	42	Texto c/ Datas a que se Referem os Dados da BM: +-----+ START 19ee fff sshii TO 19JJ kkk llmnn +-----+ com: ee - ano (2 dígitos); fff - dia (Juliano) sshii- hora, minuto e segundo do dia; do INICIO da observação; JJ, kkk, llmnn - idem; do FIM da observação;
L1	107-126	20	Texto c/ Data de Criação da BM: +-----+ GEN 19oo PPP GRRRS +-----+ com: oo, PPP, GRRRS - significado idêntico, referente à data de criação da BM;
M1	127-252	126	126 caracteres c/ a mesma informação dos 126 acabados de enumerar;
N1	253-730	478	3 conjuntos de 126 caracteres VAZIOS.

QUADRO D-V

Descrição do Formato das Bandas CZCS CRT

Registo de Documentação

NIMBUS-7 CZCS

Especificação das Bandas Magnéticas

Registo 'DOCUMENTAÇÃO' / 'DOCUMENTATION RECORD' (BINÁRIO, 5328 caracteres)

(2 registos, no início e no fim dos registos de dados)

Ref.	Núm. de	Número	Descrição
Ordem do	de	de	
Carácter	Caracteres		
A1	1-2	2	Número de ordem do registo no ficheiro (inteiro);
B1	3	1	Identificador dos registos do ficheiro e Documentação +-----+ bc0000dd com: b = 0, id.registo, =1, último; +-----+ c = 0, id.ficheiro, =1, " dd = 1, id.res.Doc, =2, 2o.res.Doc;
C1	4	1	Identificador da qualidade dos dados da BM: +-----+ e=0, dados de má qualidade; eeeeeeee e=1, dados fidedignos; +-----+
D1	5-7	3	Código da área geográfica (não definido);
E1	8	1	Número de ordem do ficheiro na banda (2,4,6);
F1	9-12	4	Número de sequência da BM: equivalente às posições 40-44/E1 do Fic. Identificação;
G1	13-16	4	Número de ordem da imagem da BM no Arquivo Geral;
H1	17-28	12	Data e Tempo de observação: posição 17-18: ano; posição 19-20: dia (Juliano); posição 21-24: milissegundos da data de início; posição 25-28: milissegundos da duração;
I1	29-30	2	Número de órbitas;
J1	31-32	2	Número de linhas da imagem (máximo 970);
K1	33-36	4	Coordenadas do centro da imagem: posição 33-34: Latitude; (0-Polo Sul, 18000-Polo Norte); posição 35-36: Longitude; (0-Greenwich, positiva para Este); valores em centésimos de grau.

Ref.	Núm. de Ordem do Carácter	Número de Caracteres	Descrição
L1	37-52	16	Coordenadas dos cantos da imagem; posição 37-40: Latitude(37-38)/Longitude(39-40) canto inferior esquerdo (cie); posição 41-44: idem para o cid; posição 45-48: idem para o cse; posição 49-52: idem para o csd; idênticos às coordenadas do centro.
M1	53	1	Resumo codificado da informação desta BM: +-----+ f =estado da BM(1-ok!,0-não); fshijkl g =corr,tempo(1-incl.,0-não); +-----+ h =efemérides solares(1-incl.); i =dados perdidos(1-incl.); j =?; kk=efemérides satélite (11-inc,01-prev,00-in); l =?;
N1	54	1	Código de presença de dados dos 6 canais do CZCS: +-----+ m,n,o,p,q,r;ref. aos canais 1,2,...,6 mnopar00 (1=presentes,0-não); +-----+
O1	55-56	2	Número de linhas perdidas da imagem;
P1	57-68	12	Número de linhas perdidas por canal; posição 57-58: referente ao canal 1; ... posição 67-68: idem para o canal 6;
Q1	69-76	8	Identificadores dos algoritmos (?);
R1	77-84	8	Identificador do utilizador (?);
S1	85-92	8	Número de perdas de sincronismo, erros de paridade, outros erros da BM;
T1	93-156	64	Dados de estado e de manutenção do Arquivo;
U1	157-160	4	Fonte de calibração do canal 6 (temperatura) e temperatura da base; posição 157: vazia; posição 158: 0=prefixado,255=resistado no ILT (255=todos os bits a 1); posição 159-160: Temperatura da base (a 0);
V1	161-696	536	Posições não utilizadas (vazias);
W1	697	1	Ganho do radiómetro (valor 1,2,3,ou 4);
X1	698	1	Indicador da função THRESHOLD do radiómetro: 1-não ligado; 2-ligado;
Y1	699-700	2	Valor da inclinação angular do espelho; de -20 a +20 graus, em milésimos de grau e em complemento de 2;
Z1	701-708	8	Data do centro da imagem: posição 701-702: ano (4 dígitos); posição 703-704: dia (Juliano); posição 705-708: milissegundos do dia;

Ref.	Núm. de Ordem do	Número de	Descrição
	Carácter	Caracteres	
A2	709-712	4	Coordenadas solares no centro da imagem; posição 709-710: Elevação do Sol; de -90 a +90 graus, em centésimos de grau e complemento de 2; posição 711-712: Azimute do Sol; de 0 a 360 graus, em centésimos de grau;
B2	713-718	6	Parâmetros de Atitude do Satélite; posição 713-714: Balanço (Roll); posição 715-716: Gálgar (Pitch); posição 717-718: Guinada (Yaw); de -32 a +32 graus, em milésimos de grau e complemento de 2;
C2	719-956	238	Coordenadas de pontos das margens da imagem;
D2	957-1004	48	Parâmetros de calibração dos canais 1 a 6; posição 957 -960 :coeficiente angular do canal 1; posição 961 -964 :ordenada na origem do canal 1; *** posição 997 -1000:coeficiente angular do canal 6; posição 1001-1004:ordenada na origem do canal 6; c/sinal, 7bits parte inteira, 24bits parte fraccionária;
E2	1005-1516	512	Tabela de conversão de temperaturas do canal 6; 256 valores (0-255), 8bits parte inteira, 8bits parte fraccionária;
F2	1517-1548	32	vazios;
G2	1549-5328	3780	registo ILT (Image Location Tape) ver Quadro D-VI sobre este registo.

Quadro D-VI (cont.)

Ref.	Núm. de Ordem do Carácter	Número de Caracteres	Descrição
I1	40-51	12	Coordenadas Equatoriais do Sol: a)-Ascensão Recta no instante, em radianos: posição 40-42: X1,1a. parte, escalado a 2E21; posição 43-45: X2,2a. parte, escalado a 2E29; Valor da Ascensão Recta: ALFA=X1+X2, se X1>0; =X1-X2, se X1<0; b)-Declinação no instante, em radianos; arranjo e escala de valores semelhante a ALFA;
NOTA:			Os valores da referência I1 só existirão na BM se houver efemérides solares. Se não houver, os 96 bits estarão a iii...iiis.
J1	52-57	6	Coordenadas Terrestres do Nadir: posição 52-54: Longitude no instante; posição 55-57: Latitude Geocêntrica; (em milionésimos de radianos(1E6))
K1	58-60	3	Altitude do satélite no instante (em metros);
NOTA:			Os valores das referências J1 e K1 só existirão se houver efemérides do satélite. Se não houver, os 72 bits estarão a iii...iiis.
L1	61-63	3	Identificador da posição relativa Terra-satélite-Sol: 0=satélite e Nadir iluminados; 1=satélite iluminado, Nadir não (crepúsculo); 2=satélite e Nadir não iluminados (noite);
NOTA:			O valor da referência L1 só existirá se houver efemérides solares e do satélite. Se não houver, os 24 bits estarão a iii...iiis.
M1	64-108	45	Repetição das referências F1 a L1 para o instante 1 MINUTO depois do instante da referência M1;
N1	109-153	45	Repetição das referências F1 a L1 para o instante 1 MINUTO depois do instante da referência M1, se houver dados na BM além de 2min, 8ses; Se não houver, os 360 bits estarão a iii...iiis.
O1	154-156	3	Diferença em milissegundos (tempo TMO) relativo ao instante da referência M1, do início do 1o.VIP MAJOR FRAME, (sempre negativo, excepto se coincidirem (0)) Há 8 MAJOR FRAMES em cada 2min,8s, 16 segundos cada.
P1	157-162	6	Instante (tempo de satélite) do início do 1o.VIP MAJOR FRAME, em milissegundos;
Q1	163-183	21	Indicadores de qualidade e de perda de sincronismo de 80 VIP Minor FRAMES. Há 80 Minor FRAMES em cada MAJOR FRAMES, de 200ms cada. posição 183: vazia;
R1	184-207	24	Indicadores de estado dos sensores do satélite e dos diversos equipamentos de bordo.
S1	208-225	18	Indicadores de estado dos sensores THIR, LIMS e CZCS.

Ref.	Núm. de Ordem do Carácter	Número de Caracteres	Descrição
T1	226-240	15	Parâmetros de Atitude do satélite no instante do VIP MAJOR FRAME (ref.P1): posição 226-228: Galear (Pitch); posição 229-231: Guinada (Yaw); posição 232-234: Balanço (Roll); posição 235-237: Taxa de Galear (Pitch rate); posição 238-240: Taxa de Balanço (Roll rate); (em milionésimos de radiano(1E6), 22bits c/ sinal);
U1	241-246	6	Coordenadas do Sol relativamente ao satélite: posição 241-243: Azimute relativo ao ϕ_1, X_s, Z_s ; (-1800;+1800 positivo com Y_s); posição 244-246: Elevação relativa ao ϕ_1, X_s, Y_s ; (-1800;+1800 positivo com Z_s); em dezenas de graus, 1E1;
V1	247-561	315	15 repetições das referências T1 a U1, diferenciadas de um segundo entre si; (para perfazerem 1 MAJOR FRAME, 16ses);
W1	562-3396	2835	7 repetições das referências P1 a V1, para perfazerem 8 MAJOR FRAMES, 2min.8ses;
X1	3397-3780	384	Registos vários sobre qualidade dos dados do Arquivo.

QUADRO D-VII

Identificação dos Pixeis Coordenados

NIMBUS-7 CZCS

Especificação das Bandas Magnéticas

Identificação dos Pixeis Coordenados (Anchor Points)

Pixel Número	Intervalo	Angulo de Observação	Pixel Número	Intervalo	Angulo de Observação	Pixel Número	Intervalo	Angulo de Observação
1	15	-39.36	496	30		1528	25	
16	15		526	30		1553	25	20.72
31	15		556	35	-17.16	1578	25	
46	15		591	35		1603	25	
61	15		626	40	-14.36	1628	20	
76	15		666	40		1653	20	27.12
91	15		706	45	-11.16	1673	20	
106	15		751	45		1693	20	
121	15		796	45		1713	20	
136	15		841	45		1733	20	
151	15		886	45		1753	20	
166	15		931	45	-2.16	1773	20	31.52
181	15		984	53	+0.04	1788	15	
196	15		984	54	2.12	1788	15	
196	20	-31.56	1038	45		1803	15	
216	20		1083	45		1818	15	
236	20		1128	45		1833	15	
256	20		1173	45		1848	15	
276	20		1218	45		1863	15	
296	20		1263	45	11.12	1878	15	
316	20		1303	40		1893	15	
316	25	-26.76	1303	40		1893	15	
341	25		1343	35	14.32	1908	15	
366	25		1378	35		1923	15	
391	25		1413	35	17.12	1938	15	
416	25		1443	30		1953	15	
441	25		1473	30		1968	15	39.32
466	25		1503	30	20.72	xxxx		
	30	-20.76		25			xx	

Quadro D-VIII (cont.)

Ref.	Núm. de Ordem do Carácter	Número de Caracteres	Descrição
J1	213-222	10	Leituras da radiação da lâmpada de calibração (canais 1 a 5; Reais (8+8));
K1	223-224	2	Valor da leitura de um corpo negro pelo canal 6 (8+8);
L1	225-226	2	Valor da temperatura do corpo negro (8+8);
M1	227-236	10	Resisto das perdas de sincronismo, paridades e outros erros na constituição da banda;
N1	237-544	308	Valores da LATITUDE de 77 pixels de referência na linha; (ver Quadro D-VII, s/ a identificação destes pixels) / posição 237-240: pixel '1'; 77 < *** \ posição 541-544: pixel '77'; (Reais de 9+22bits, c/ sinal);
O1	545-852	308	Valores da LONGITUDE dos mesmos 77 pixels de referência; (ver Quadro D-VII, s/ a identificação destes pixels) / posição 545-548: pixel '1'; 77 < *** \ posição 849-852: pixel '77'; (Reais de 9+22bits, c/ sinal);
P1	853-854	2	Posição do pixel do Nadir; Valor real de 11+5bits, preciso a $1.25E-3$ graus, a contar do início da linha;
Q1	855-860	6	Identificadores de qualidade da calibração dos canais; posição 855: canal 1; *** posição 860: canal 6; +-----+ 000jk000 j,k=1, calibração imprópria; +-----+
R1	861-12668	11808	6x1968 valores das radiancias dos pixels da linha; posição 861- 2828: canal 1; posição 2829- 4796: canal 2; posição 4797- 6764: canal 3; posição 6765- 8732: canal 4; posição 8733-10700: canal 5; posição 10701-12668: canal 6; (inteiros 0-255)
S1	12669-12780	112	Não utilizados.

APENDICE E

GLOSSARIO

E.1 SIGLAS DE INSTITUICOES

CCE	Comissão das Comunidades Europeias.
CCRS	Canadian Center for Remote Sensing (Canadá).
CE	Conselho da Europa.
CIE	Commission Internationale d'Eclairage.
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales (França).
COI	Commission Océanographique Intergouvernementale.
COPUOS	Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (ONU).
COSPAR	Committee on Space Research.
EARSEL	European Association of Remote Sensing Laboratories.
EMFA	Estado Maior da Força Aérea.
EMGFA	Estado Maior General das Forças Armadas.
ERIM	Environmental Research Institute of Michigan (EUA).
EROS DC	Earth Resources Observation Satellite Data Centre (EUA).

ESA European Space Agency (CEE).

EUMETSAT European Meteorological Satellite Organization.

EUTELSAT European Telecommunication Satellite Organization.

FAO Food and Agriculture Organization (ONU).

FAP Força Aérea Portuguesa.

GDTA Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (France).

GSFC Goddard Space Flight Center (EUA).

INMARSAT International Maritime Satellite Organization.

INTELSAT International Telecommunication Satellite Organization.

ITC International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences (Holands).

IUGG International Union of Geodesy and Geophysics.

JPL Jet Propulsion Laboratory (EUA).

NASA National Aeronautical and Space Administration (EUA).

NASDA National Space Development Agency (Japão).

NESS National Environmental Satellite Service (NOAA, EUA).

NOAA National Oceanographic and Atmospheric Administration (EUA).

OHM Organização Meteorológica Mundial (o mesmo que WMO).

RAE Royal Aircraft Establishment (Reino Unido).

UAI União Astronômica Internacional.

USGS United States Geological Survey (EUA).

WHO World Meteorological Organization.

E.2 SIGLAS DE PROGRAMAS INTERNACIONAIS

EREP Earth Resources Experiment Package.

GARP Global Atmospheric Research Programme.

JASIN Joint Air-Sea Interaction Experiment.

LACIE Large Area Crop Inventory Experiment.

MAB Man and Biosphere.

OCE Ocean Color Experiment.

SURGE SEASAT Users Group of Europe.

UNDP United Nations Development Programme (ONU).

UNEP United Nations Environment Programme (ONU).

WWW World Weather Watch.

E.3 SIGLAS DE EQUIPAMENTOS, SATELITES E OUTROS

AVHRR Advanced Very High Resolution Radiometer (a bordo do satélite TIROS-N).

CCT Computer Compatible Tape.

CZCS Coastal Zone Color Scanner (a bordo do satélite NIKBUS-7).

DCP Data Collection Platform.

ERS ESA Resources Satellite (ESA).

FOC Faint Object Camera.

GOES Geostationary Operational Environmental Satellite (EUA).

HCMH Heat Capacity Mapping Mission.

HDDT High Density Digital Tape.

HOT Hotine Oblique Mercator Projection.

HRV Haute Résolution Visible (a bordo do satélite SPOT).

IFOV Instantaneous Field of View.

IRS Indian Remote Sensing Satellite.

JERS Japan Earth Resources Satellite.

LASER Light Amplification by the Stimulation of Emitted Radiation.

LFC Large Format Camera (a bordo de algumas missões do Space Shuttle).

LIDAR Laser Imaging Radar.

LISS Linear Imaging Self-Scanning Sensor.

MOMS Modular Optico-electronic Multispectral Scanner.

MOS Marine Observation Satellite.

MSS Multispectral Scanner System (a bordo dos satélites LANDSAT).

RA Radar Altimeter (a bordo do satélite ERS e outros).

RADAR Radio Detection and Range.

RAR Real Aperture Radar.

RBV Return Beam Vidicon (a bordo dos satélites LANDSAT).

SAR Synthetic Aperture Radar (a bordo dos satélites ERS, SEASAT, ...).

SAMS Stratospheric and Mesospheric Sounder (a bordo do satélite Nimbus-7).

SIR Shuttle Imaging Radar (a bordo do Space Shuttle, em algumas missões).

SLAR Side Looking Airborne Radar.

SMIRR Shuttle Multispectral Infrared Radiometer (a bordo do Space Shuttle, ...).

SMR Scanning Multichannel Microwave Radiometer (a bordo dos satélites SEASAT, NIMBUS-7, outros).

SOM Space Oblique Mercator Projection.

SpaceLab Laboratório Espacial (embarcado numa das missões do Space Shuttle).

SPOT Satellite Probatoire d'Observation de la Terre.

SSTS Space Shuttle Transportation System (ou somente Space Shuttle, EUA).

TDRS Tracking and Data Relay Satellite.

THIR Temperature Humidity Infrared Radiometer (a bordo do satélite Nimbus-7).

TIROS-N Thermal Infra-Red Observation Satellite (série N).

TM Thematic Mapper (a bordo dos satélites LANDSAT 4 e 5).

TOMS Total Ozone Mapping System (a bordo do satélite Nimbus-7).

UTM Universal Transverse Mercator Projection.

VHRR Very High Resolution Radiometer (a bordo dos satélites NOAA e outros).

VIRR Visual and Infra-Red Radiometer (a bordo do satélite SEASAT).

VTIRR Visible and Thermal Infra-Red Radiometer.

WGS World Geodetic System.

E.4 TERMOS, DEFINIÇÕES E CONCEITOS

- Absorção:** Conversão de energia incidente num corpo em outras formas de energia, em geral, calorífica (aumento de temperatura do corpo absorvente).
- Absorvidade (α):** Relação entre a energia absorvida por unidade de superfície de um corpo e a energia incidente por unidade de superfície no mesmo corpo.
- Albedo (A):** Valor da Reflectância total de um objecto, em geral, considerada apenas na gama de comprimentos de onda visível.
- Almucantars:** 1)-Plano paralelo ao Horizonte do lugar, Paralelo de Altura;
2)-Círculo de Altura constante.
- Altura (de um corpo celeste) (h):** 1)-Coordenada do Sistema Horizontal;
2)-Ângulo no plano Vertical, desde o Horizonte até ao corpo celeste.
- Ângulo Horário (t):** 1)-Coordenada do Sistema Equatorial Horário;
2)-Ângulo no plano do Equador, desde o Meridiano de referência até ao Meridiano do corpo celeste, medido no sentido retrógrado.
- Ângulo Sólido:** 1)-Medida da abertura de um cone, em steradianos (sr);
2)-Área de uma superfície esférica abrangida por um cone cujo vértice se encontra no centro da superfície esférica.
- Ano:** Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens consecutivas da Terra por um ponto fixo do espaço, no seu movimento de translação.
- Ano Anomalístico:** Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens consecutivas da Terra pelo Perihélio. Tem 365,259641204 Dias Solares Médios (365 dias, 6 horas 13 minutos e 53 segundos). É mais longo que o Ano Sideral e que o Ano Solar Médio devido à Precessão dos Equinócios.

- Ano Civil: Período de tempo convencional composto por um número inteiro de dias, 365.
- Ano Luz: Unidade de medida de distâncias usada em Astronomia, e igual à distância percorrida pela luz durante um ano:
 $300000\text{km/s} \times 24\text{H} \times 60\text{M} \times 60\text{S} = 9,461\text{E}12\text{km}$.
- Ano Sideral: Intervalo de tempo que decorre numa translação completa da Terra em torno do Sol, mas referida ao Ponto Vernal. Tem 366,2564 Dias Solares Médios (365 dias, 6 horas, 9 minutos e 10 segundos), aproximadamente.
- Ano Solar Médio: Intervalo de tempo que decorre numa translação completa da Terra em torno do Sol Médio. Tem 365,2422 Dias Solares Médios, aproximadamente.
- Ano Trópico: Intervalo de tempo que decorre numa translação completa da Terra em torno do Sol, mas referida ao Ponto Vernal Médio, definido pela União Astronómica Internacional em 1958 como sendo o que começa em 0 de Janeiro de 1900, às 12 horas (31 de Dezembro de 1899, 12 Horas TMC). Tem a duração de 365,2422 Dias Solares Médios (365D 5H 48M 46S).
- Anomalia: Ângulo definidor da posição de um astro ou de um satélite em movimento orbital, contado no plano da órbita a partir do Periéu. Em Mecânica Orbital, definem-se 3 Anomalias: Excêntrica, Média e Verdadeira.
- Anomalia Excêntrica (E): Ângulo no plano orbital, de vértice no centro de uma circunferência circunscrita à órbita elíptica, medido no sentido directo entre as direcções do Periéu e a da projecção da posição do satélite ou corpo celeste na referida circunferência segundo o eixo menor da elipse orbital.
- Anomalia Média (M): Ângulo no plano orbital, de vértice no centro de uma órbita circular média que o satélite ou corpo celeste descreveria a velocidade constante e de período igual ao Período Anomalístico, medido no sentido directo entre as direcções do Periéu e do satélite ou corpo celeste.

Anomalia Verdadeira (θ): Ângulo no plano orbital, de vértice no foco da órbita elíptica, medido no sentido directo entre as direcções do Periéu e do satélite ou corpo celeste.

Apoéu: Ponto da órbita (elíptica ou parabólica) de um satélite mais afastado do astro que o atrai ou em torno do qual roda. O Apoéu da Eclíptica também se designa por Afélio.

Argumento do Periéu (ω): 1)-Ângulo no plano orbital de um satélite, de vértice no foco de uma órbita elíptica, no qual se encontra o astro que o atrai ou em torno do qual roda, medido desde o Nodo Ascendente até ao Periéu;
2)-Um dos Elementos Orbitais definidores da órbita de um satélite.

Ascensão Recta (α): 1)-Coordenada do Sistema Equatorial Uranosráfico;
2)-Ângulo no plano do Equador, desde o Ponto Vernal até ao Meridiano do corpo celeste, medido no sentido directo. O valor da Ascensão Recta também pode ser expresso em Horas (360 graus=24 Horas).

Assinatura Espectral: Conjunto de valores radiométricos em vários comprimentos de onda e que caracterizam um objecto.

Atitude (de um satélite): Estado de orientação dos eixos principais de um satélite, relativamente ao eixo de rotação da Terra ou a um referencial definido.

Azimuth (Az): 1)-Coordenada do Sistema Horizontal;
2)-Ângulo no plano do Horizonte entre o Meridiano do lugar e o plano Vertical do corpo celeste, medido no sentido retrógrado desde o ponto cardinal Sul do lugar.

Bit: 1)-Binary Digit, Unidade Binária;
2)-Unidade de informação de um sistema binário, correntemente utilizado em computação e computadores. Pode tomar os valores 0 ou 1;
3)-Número de ordem de posição que ocupa uma Unidade Binária numa Unidade de Informação Digital interna de um computador ou componente informática (Word (Palavra) ou Byte (Carácter)); p.ex.,

MSB, Most Significant Bit, é a posição de ordem mais elevada do conjunto de Unidades Binárias (Bits) que formam uma Palavra (Word) ou um Carácter (Byte), utilizados na representação interna de símbolos alfanuméricos por um computador ou uma componente informática.

bpi: 1)-Unidade de densidade de gravação em bandas magnéticas para computador. Os valores usuais são 800, 1600 e 6250.
2)- $1\text{bpi} = 1 \text{ bit (ou byte) per inch.}$

Byte: 1)-Carácter, símbolo, em geral alfanumérico, mas de algum modo interpretável por um computador;
2)-Unidade de Informação Digital interna de um computador, em geral constituída por 8 Bits. Um certo número de Bytes (2, 4 ou 5, consoante o tipo de computador) forma uma Palavra (Word).

Classificação: 1)-Atribuição da propriedade de pertença a uma classe;
2)-Operação do Processamento Digital de Imagens.

Classificação Não Supervisada: Operação de Classificação em que as condições impostas pelo operador não são intrínsecas aos elementos de imagem a classificar.

Classificação Supervisada: Operação de Classificação efectuada por definição de condições intrínsecas aos elementos de imagem a classificar.

Componente Espacial (Space Segment): Conjunto de satélites e respectivos equipamentos de controlo em terra, operados por uma Estação terrestre. P.ex., os satélites Meteosat operados pela ESOC/ESA, em Darmstadt, RFAlema.

Componente Terrestre (Ground Segment): Estrutura organizada de uma Estação terrestre operadora de satélites, capaz de os controlar em órbita, e de receber, arquivar, formatar e distribuir a informação adquirida por saueses.

Constante Solar (E_0): Valor médio da radiação solar incidente na unidade de área no topo da atmosfera. Módulo do Vector de Poynting do Campo Electromagnético Solar.

Coordenadas Eclíticas (Sistema de): Referenciação da posição dos corpos celestes com base na Eclítica e nos planos e/ou círculos que contêm o eixo Polo Boreal-Polo Austral. As coordenadas deste sistema são a Longitude e a Latitude Celestes.

Coordenadas Equatoriais (Sistema de): Referenciação da posição dos corpos celestes com base no Equador e nos planos e/ou círculos que contêm o eixo de rotação da Terra. Este sistema ainda se subdivide no Horário e no Uranográfico. As coordenadas do Sistema Horário são o Ângulo Horário e a Declinação. As coordenadas do Sistema Uranográfico são a Ascensão Recta e a Declinação.

Coordenadas Horizontais (Sistema de): Referenciação da posição dos corpos celestes com base no plano do Horizonte e nos planos e/ou círculos que contêm a Vertical do lugar. As coordenadas deste sistema são o Azimute e a Altura.

Coordenadas Terrestres (Sistema de): Referenciação da posição dos lugares da superfície terrestre com base no Equador e nos Meridianos terrestres. As coordenadas deste sistema são a Longitude e a Latitude terrestres.

Corpo Negro: Corpo ideal capaz de absorver toda a energia nele incidente.

Declinação (δ): 1)-Coordenada dos Sistemas Equatorial Horário e Uranográfico;
2)-Ângulo no plano do Meridiano, desde o Equador ao corpo celeste.

Deteção Remota: 1)-Técnica ou conjunto de técnicas que permitem a caracterização de alguns parâmetros físicos dos ^{e/ou fenómenos} objectos da superfície da Terra, sem que haja um contacto físico directo entre estes e os sensores, e recorrendo à radiação electromagnética.
2)-Processo de aquisição e de processamento de dados e de imagens da superfície da Terra.

Dia: Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens consecutivas de um astro pelo Meridiano do lugar. Subdivide-se em Horas, Minutos e Segundos.

Dia Sideral: Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens consecutivas do Ponto Vernal pelo Meridiano do lugar. O Dia Sideral é mais curto 3 minutos e 56 segundos, aproximadamente, que o Dia Solar Médio.

Dia Solar Médio: Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens superiores consecutivas do Sol Médio pelo Meridiano do lugar.

Dia Solar Verdadeiro ou Aparente: Intervalo de tempo que decorre entre duas passagens superiores consecutivas do Sol Verdadeiro pelo Meridiano do lugar.

Difusão: processo de desvio da direcção inicial de propagação da luz, devido à presença de partículas no meio.

Distância Polar: 1)-Coordenada complementar da Declinação, dos Sistemas Equatoriais;
2)-Ângulo no plano do Meridiano do corpo celeste, desde o Polo Norte até ao corpo celeste.

Distância Zenital (z ou θ): 1)-Coordenada complementar da Altura, do Sistema Horizontal;
2)-Ângulo no plano Vertical do corpo celeste, desde o Zénite até ao corpo celeste.

Eclítica: 1)-Plano imaginário no qual o Sol descreve o seu movimento aparente em torno da Terra;
2)-Plano orbital da Terra no qual esta descreve o seu movimento de translação em torno do Sol;
3)-Trajectória descrita pela Terra no seu movimento de translação.

Efeito de Doppler: Alteração da frequência de emissão de um feixe de energia devido ao movimento relativo das posições de emissão e de recepção.

Elementos Orbitais: Conjunto de 6 parâmetros definidores da órbita de um satélite. Os Elementos Orbitais são:

- 1- Ascensão Recta do Nodo Ascendente (Ω);
- 2- Argumento do Perigeu (ω);
- 3- Inclinação da Órbita (i);
- 4- Semi-eixo Maior da órbita (a);
- 5- Excentricidade da órbita (e);
- 6- Tempo de passagem no Perigeu (T_P).

Elevação (de um corpo celeste) (h): O mesmo que Altura.

Emissividade (ϵ): Relação entre a energia emitida por um corpo real (ou cinzen-
to) a uma determinada temperatura e por unidade de superfície e
a energia que um Corpo Negro emitiria à mesma temperatura e por
unidade de superfície.

Equação do Tempo: Diferença em tempo entre o Tempo Solar Verdadeiro e o Tempo
Solar Médio.

Equador: 1)-Plano imaginário normal ao eixo de rotação da Terra, dividin-
do a esfera celeste nos Hemisfério Norte e Sul;
2)-Círculo máximo, normal ao eixo de rotação da Terra,
dividindo-a nos Hemisférios Norte e Sul.

Equinócios: Pontos e instantes de passagem do Sol pelo Equador, no seu movi-
mento aparente em torno da Terra (em 21 de Março e em 22 de Se-
tembro).

Esfera Celeste: Superfície esférica imaginária, animada de movimento de rotação
aparente e no qual participam todos os corpos celestes por
projectão radial.

Estratosfera: Zona da atmosfera compreendida entre 10 e 50km de altitude, na
qual ainda se resistem gradientes positivos de temperatura.

Geodesia: Ciência que estuda as formas e dimensões da Terra.

Geografia: Ciência que estuda a superfície da Terra.

Geóide: Superfície equipotencial gravítica da Terra.

Geologia: Ciência que estuda a estrutura, a composição, a forma, a origem e a evolução da Terra.

Ground Segment: O mesmo que Componente Terrestre.

Ground Track: O mesmo que Traço do satélite.

Horizonte: Plano normal à Vertical do lugar.

Inclinação Orbital (i): 1)-Um dos Elementos Orbitais definidores da órbita de um satélite;
2)-Ângulo que a normal ao plano orbital de um satélite faz com o Eixo de Rotação da Terra.

Inércia Térmica: Propriedade de uma substância que traduz a sua capacidade de resistência a variações de temperatura, motivadas por variações de energia electromagnética incidente.

Informação: O algo que nos liberta da angústia do desconhecimento.

Latitude (θ): 1)-Coordenada dos Sistemas Eclítico e Geográfico Terrestre;
2)-L. Celeste: Ângulo no plano do Meridiano Eclítico desde a Eclítica até ao corpo celeste;
3)-L. Geocêntrica: Ângulo no plano do Meridiano Terrestre do lugar, entre o raio Terrestre do lugar e o Equador;
4)-L. Geográfica: Ângulo no plano do Meridiano Terrestre do lugar, entre a Vertical do lugar e o Equador Terrestre ou valor da Altura do eixo de rotação da Terra, no lugar.

Longitude (λ): 1)-Coordenada dos Sistemas Eclítico e Geográfico Terrestre;
2)-L. Celeste: Ângulo no plano da Eclítica, desde o Ponto Vernal até ao Meridiano Eclítico do corpo celeste;
3)-L. Geográfica: Ângulo no plano do Equador Terrestre, desde um Meridiano de referência (Greenwich, p.ex.), até ao Meridiano do lugar.

Meridians: Linha Norte-Sul no Horizonte do lugar.

Meridiano: 1)-Eclítico: Plano ou círculo normal à Eclítica, contendo o eixo Polo Boreal-Polo Austral;

2)-do luar: Plano ou círculo normal ao Equador, contendo o eixo de rotação da Terra e a Vertical do luar.

Micro-onda(s): Energia electromagnética na gama de comprimentos de onda de 0.01 a 0.3 metros.

Nadir: Ponto de intersecção da Vertical do luar com a Esfera Celeste, abaixo do plano do Horizonte;

Nodo Ascendente: 1)-Um dos Elementos Orbitais definidores da órbita de um satélite;

2)-Ponto de intersecção da trajectória de um corpo celeste no seu plano orbital com um plano de referência, ao passar do Hemisfério Sul para o Norte;

3)-Coordenada (Ascensão Recta) no Equador que assinala a passagem de um satélite artificial do Hemisfério Sul para o Norte, na sua órbita em torno da Terra;

Nutação: Oscilação do eixo da Terra em torno de uma posição média, de período aproximadamente igual a 18.6 anos. Este fenómeno é devido a acções de atracção da Lua sobre o movimento da Terra, provocando uma oscilação do eixo de rotação da Terra em torno da posição média deste, no seu movimento de rotação em torno do Polo Boreal (ver Precessão dos Equinócios).

Obliquidade da Eclítica: Ângulo de inclinação da Eclítica com o Equador (23 graus e 27 minutos).

Órbita Polar: Órbita de um satélite cujo plano contenha o eixo de rotação da Terra. Também se dá este nome às órbitas cuja Inclinação relativamente ao Equador seja elevada (superior a 80 graus, aproximadamente); evitando-se a designação, neste caso, de Órbita Quase Polar.

Órbita Hélio-Síncrona (Síncrona com o Sol): Órbita cujo plano mantém um ângulo constante com a linha Terra-Sol. Estas órbitas caracterizam-se por cruzarem o Equador sempre à mesma Hora Solar Local (p.ex., as órbitas dos satélites LANDSAT).

Órbita Síncrona: Órbita cujo período em torno da Terra é de 24 horas.

- Paralaxe (de um astro): Ângulo centrado no astro, entre as direcções deste com o centro da Terra e com o lugar de observação. A paralaxe é mínima (nula) quando o astro se encontra no Zénite do lugar, máxima quando se encontra no Horizonte do lugar. Conceito direcionalmente oposto ao de Semi-diâmetro Aparente.
- Paralelo: Plano ou círculo paralelo ao Equador, no qual a Latitude é constante.
- Perigeu: Ponto da órbita (elíptica ou parabólica) de um satélite mais próximo do astro que o atrai ou em torno do qual roda. O Perigeu da Eclíptica tem o nome de Perihélio.
- Pixel: 1)-Picture Element, Elemento de Imagem;
2)-Unidade elementar de um domínio geométrico (imagem, ponto luminoso de um écran, etc.) capaz de receber ou fornecer informação.
- Polo Austral: Ponto de intersecção do eixo normal à Eclíptica com a Esfera Celeste, do lado da constelação do Cruzeiro do Sul.
- Polo Boreal: Ponto de intersecção do eixo normal à Eclíptica com a Esfera Celeste, do lado da Estrela Polar.
- Ponto Vernal (♈): Ponto e instante de passagem do Sol do Hemisfério Sul para o Norte, no seu movimento aparente em torno da Terra, em 21 de Março.
- Precessão dos Equinócios: Movimento do Ponto Vernal em sentido retrógrado, cerca de 50.27 segundos de arco por ano, com um período aproximado de 25781 anos. Este fenómeno é devido à protuberância equatorial da Terra, que introduz irregularidades na acção atractiva do Sol, da Lua e de outros Planetas sobre a Terra, provocando um movimento oscilatório do eixo de rotação desta em torno do Polo Boreal, com aquele período.
- Radiância (I): Energia ^{ou recebida} emitida por um corpo numa dada direcção por unidade de superfície e por unidade de ângulo sólido.

Radiometria: Técnica de medição da radiação electromagnética, pelo uso de radiómetros.

Radiómetro: Instrumento que detecta e mede radiação electromagnética.

Record: 1)-Registro, conjunto de caracteres (Bytes) ou Palavras (Words) alfanuméricos introduzidos ou manipulados por um computador;
2)-Unidade de Informação Digital.

Reflectância (ρ): Quociente entre a energia reflectida e a energia incidente.

Reflectância Solar Total: Reflectância devida à radiação solar (directa e difusa). O mesmo que Albedo.

Resolução Espectral: Valor da diferença entre 2 comprimentos de onda limites de uma banda espectral em que um radiómetro pode operar.

Resolução Geométrica (ou espacial): Dimensão mínima no terreno capaz de ser distinguida por um sensor de detecção remota, a qual é capaz de fornecer uma informação. O mesmo que Pixel.

Resolução Radiométrica: Valor da diferença entre 2 níveis radiométricos que um radiométrico consegue distinguir.

Satélite Geostacionário: Satélite cuja órbita se encontra no plano do Equador, e é descrita com um Período de rotação igual ao de rotação da Terra. Mantem-se "estacionário" acima de um ponto da Terra.

Satélite Polar: Satélite cujo plano de órbita contém o Eixo de rotação da Terra ou difere deste de um ângulo pequeno.

Segundo: 1)-Unidade de medida de tempo;
2)-Fracção $1/31556925.975$ do Ano Trópico. Também designado Segundo de Efeméride.

Semi-diâmetro (de um astro): 1)-Aparente: Ângulo centrado no lugar de observação, formado pelas direcções deste com o bordo do astro e com o centro deste. Conceito direccionalmente oposto ao de Paralaxe;
2)-Geocêntrico: o mesmo que o Semi-diâmetro Aparente, mas referido ao centro da Terra.

Sol Médio: Sol imaginário também designado por 2^o. Sol Fictício, com movimento aparente uniforme em torno da Terra sobre o Equador e coincidente com o Sol verdadeiro no Equinócio Vernal. Sol "padrão" para a definição do Tempo Solar Médio.

Solstícios: Pontos e instantes de Declinação máxima e mínima do Sol, no seu movimento aparente em torno da Terra, ao longo do ano (em 21 de Junho e em 21 de Dezembro).

Space Segment: O mesmo que Componente Espacial.

Swath Width: Largura de uma faixa da superfície terrestre observada por um radiómetro instalado a bordo de um satélite de revolução.

Tempo:

- 1)-Medida da duração das coisas;
- 2)-Medida do movimento de rotação da Terra;
- 3)-Ângulo Horário de um astro ou ponto do espaço que serve de referência a um sistema de medida do tempo;
- 4)-Instante.

Tempo Atómico: Sistema de unidades de medida de tempo baseado nas frequências de vibração de determinados átomos e moléculas quando excitados, como o Césio, a Amónia e o Rubídio.

Tempo de Efeméride: Sistema de unidades de tempo baseado no Ano Trópico. As unidades do Tempo de Efeméride são o Segundo, o Dia e o Ano (Trópico). A variável Tempo que se utiliza nas Ciências e na Dinâmica é identificada com esta definição, sendo o Segundo a fracção $1/31556925.9747$ do Ano Trópico.

Tempo Local: Ângulo Horário do Sol Médio no lugar, acrescido de 12 horas.

Tempo Médio: Sistema de unidades de tempo baseado no Sol Médio. Ver Tempo Solar Médio.

Tempo Médio de Greenwich (TMG): Ângulo Horário do Sol Médio no Meridiano de Greenwich.

Tempo Sidereal: Ângulo Horário do Ponto Vernal, por observação de estrelas fundamentais. Designa-se por T.S.Médio se na sua determinação se

consideram os efeitos da Nutação, T.S. Verdadeiro, se não se consideram.

Tempo Solar Médio: Ângulo Horário do Sol Médio.

Tempo Solar Verdadeiro: Ângulo Horário do Sol Verdadeiro.

Tempo Universal (TU): O mesmo que TMG.

Traco do Satélite: Projecção vertical na superfície terrestre da trajectória de um satélite em órbita. O mesmo que Ground Track.

Transmitância (τ): Quociente entre a energia transmitida por um corpo e a energia nele incidente, por unidade de área.

Transmissividade (T): Quantidade de energia transmitida por unidade de percurso, por unidade de área.

Unidade Astronómica (UA): Unidade de medida de distâncias usada em Astronomia e igual à distância média da Terra ao Sol, 149.6E6km.

Unidade de Informação Digital: Entidade de representação interna em computadores de símbolos alfanuméricos. As Unidades de Informação Digital, mais correntes na terminologia anglo-saxónica, são:

- 1- Byte;
- 2- Word;
- 3- Record.

Word: 1)-Palavra, conjunto de caracteres (Bytes) alfanuméricos manipulados por um computador;
2)-Unidade de Informação Digital.

Zénite: Ponto de intersecção da vertical de um lugar com a Esfera Celeste, acima do plano do Horizonte.

Zero Absoluto: 1)-Temperatura à qual o volume de uma gás perfeito seria nulo;
2)-273 graus centígrados negativos.

E.5 CONSTANTES

Aceleração da Gravidade (g), em Lisboa:	9.80054m/s ² .
Constante de Boltzman (K):	1.38E-23J/°K.
Constante Gravitacional Universal (G):	6.373E-8dine.cm ² /s ² .
Constante de Planck (h):	6.625E-34Js.
Constante Solar:	135.3mW/cm ² (NASA); 135mW/cm ² (CIE); 136.8mW/cm ² .
Coordenadas de Lisboa (Observ. Astronómico):	
Longitude:	9 11' 10''W;
Latitude Geográfica:	38 42' 30''N;
Latitude Geocêntrica:	38 31' 15''N.
Distância Média Terra-Sol (UA):	149.6Mkm.
Excentricidade da Órbita Terrestre:	0.01672.
Excentricidade da Terra:	0.0818193.
Índice de refração da água do mar:	~1.341.
Massa da Lua:	7.3473218E25g.
Massa do Sol:	1.9888822E33g.
Massa da Terra:	5.9733726E27g.
Obliquidade da Eclíptica (1981):	23 26' 30''.
Raio Equatorial Terrestre (a):	6378.214km.
Raio Médio Terrestre (c):	6371.086km.
Raio Polar Terrestre (b):	6356.829km.

Vel. Libertação da Atração Terrestre: $\sim 11\text{km/s}$.

Vel. Libertação da Atração Lunar: $\sim 2.5\text{km/s}$.

Velocidade da luz (c): $\sim 3\text{E}10\text{cm/s}$.
 $2.99792458\text{E}10\text{cm/s}$.

Velocidade da luz na água do mar: $\sim 2.25\text{E}10\text{cm/s}$.

Velocidade do som: 340m/s .

Vel. média de translação da Terra: $\sim 29.8\text{km/s}$.

Nota: xEy significa "valor x que multiplica 10 elevado a y".