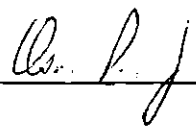




AUTORES AUTHORS	VLF IONOSFERA REGIÃO D	PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS		AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY <i>Rafael Gielow</i> Rafael Gielow Pres. Cons. Pós-Graduação	
	AUTOR RESPONSÁVEL RESPONSIBLE AUTHOR <i>Plínio Carlos Alvalã</i>	DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION ☐ INTERNA / INTERNAL ☒ EXTERNA / EXTERNAL ☐ RESTRITA / RESTRICTED		REVISADA POR / REVISED BY <i>Liliana Rizzo Piazza</i> Liliana Rizzo Piazza	
CDU/UDC 523.4-8				DATA / DATE Julho 1990	
TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-5165-TDL/426		ORIGEM ORIGIN PG/CEA		
	ESTUDO COMPARATIVO DE SINAIS DE VLF NA REGIÃO SUB-ANTÁRTICA E NA SAGA		PROJETO PROJECT CEA		
AUTORES/AUTHORSHIP	Plínio Carlos Alvalã		Nº DE PAG. NO OF PAGES 105		ULTIMA PAG. LAST PAGE 89
			VERSÃO VERSION		Nº DE MAPAS NO OF MAPS
RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES São analisados dados de fase de sinais de VLF do transmissor Omega Argentina (43°S; 65°O) nas frequências 10,2 kHz e 13,6 kHz obtidos simultaneamente na Estação Antártica (23°S; 58°O) e no Rádio Observatório do Itapetinga, Atibaia (23°S; 43°O), SP., no período de fevereiro de 1986 a março de 1987. Na análise foram considerados somente dias com baixa atividade magnética ($\Sigma K_p < 14$) e sem ocorrência de explosões solares. Um estudo detalhado comparando o comportamento de fase no inverno e verão é realizado para os dois trajetos. Faz-se uma avaliação da variação de fase relativa ao máximo de iluminação solar do trajeto em função da distância solar no decorrer do ano para as duas trajetórias. Através da variação diurna de fase compara-se o comportamento das duas trajetórias, evidenciando suas principais características. São calculadas as variações das alturas de reflexão diurna e noturna, utilizando-se um modelo teórico de propagação e um semi-empírico nos dois trajetos. Faz-se ainda uma comparação entre os eventos SPAs ("Sudden Phase Anomalies") observados simultaneamente nas duas frequências. Os resultados mostram boa concordância com os modelos utilizados, com exceção das variações diurnas de fase normalizadas pelas distâncias de propagação dos sinais, mas que estão de acordo com outros resultados obtidos para a região sub-Antártica.					
OBSERVAÇÕES / REMARKS Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial aprovada em 28 de Maio de 1990.					

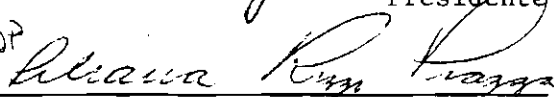
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Ciência Espacial

Dr. Osmar Pinto Júnior - DGE



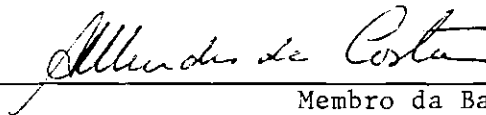
Presidente

Drª Liliana Rizzo Piazza - POLI - PTR - USP



Orientadora

Drª Aracy Mendes da Costa - SP



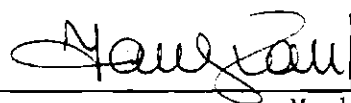
Membro da Banca
-convidada-

Dr. Luiz Muniz Barreto - RJ



Membro da Banca
-convidado-

Dr. Ivan Jelinek Kantor DGE



Membro da Banca

Candidato: Plínio Carlos Alvalá

São José dos Campos, 28 de maio de 1990

A meu pai, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Liliana Rizzo Piazza, orientadora desta dissertação, por sua inestimável participação, através de críticas, discussões e sugestões feitas durante o desenvolver deste trabalho.

Ao Prof. Pierre Kaufmann e ao Eng. Ricardo E. Schall pelo apoio e contribuição no desenvolvimento experimental.

À Dra. Aracy Mendes da Costa, às mestras Neusa Maria Paes Leme e Vera Lucia R. Kuntz e ao Técnico Armando Tatume Hadano pelo seu apoio na parte experimental e nas discussões no decorrer deste trabalho.

À Regina Célia dos Santos, Marcelo Carlos Alvalá, Luis Carlos Alvalá, e Helen R. Passos pelo apoio recebido durante a Primeira Expedição de Inverno na Estação Antártica Comandante Ferraz e pelo auxílio na parte datilográfica.

Ao INPE e ao CRAAE, através dos seus pesquisadores, técnicos e recursos experimentais, que possibilitaram a realização deste.

Ao CTA/IAE, pelo empréstimo de equipamentos.

Ao CNPq e CAPES, pelo auxílio financeiro prestado durante este período.

Ao PROANTAR, por ter propiciado a participação na Primeira Expedição de Inverno realizada na Estação Antártica Comandante Ferraz.

ABSTRACT

This work analyses VLF phase signals of Omega Argentina (43°S; 65°O) at frequencies of 10.2 kHz and 13.6 kHz received simultaneously at Antarctic Station Comandante Ferraz located at the Antarctic Peninsula (62°S; 58°O) and at the Radio Observatory of Itapetinga, Atibaia (23°S; 43°O) from February 1986 to March 1987. In this analyses were taken into account only days with low magnetic activity ($\Sigma K_p < 14$) and without solar flares occurrence. For the two propagation paths a detailed study comparing the behaviour of phase in winter and summer is done. An evaluation is made for the relative phase variation to maximum solar illumination as a function of the solar zenithal distance through all the year for the two trajectories. The behaviours of the two trajectories is obtained by comparison of diurnal phase variation showing the main characteristics of each propagation path. The monthly variation of both reflection height and night time reflection height is calculated using a theoretical and semi-empirical models for the two propagation paths. A comparison is also made between SPAs ("Sudden Phase Anomalies") events observed simultaneously at the two frequencies. In general the results shows good agreement with the models applied, except for the diurnal phase variations normalized to distances of the propagation paths, but they are consistent with results previously obtained for the sub-Antarctic region.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	01
<u>CAPÍTULO 2 - A IONOSFERA</u>	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - Atmosfera neutra	05
2.3 - Atmosfera ionizada	07
2.4 - Equilíbrio de ionização	09
2.5 - Região D	11
2.5.1 - Ionização	13
2.5.2 - Química da região D	17
2.5.3 - Íons positivos	17
2.5.4 - Íons negativos	20
2.6 - Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA) .	24
2.7 - Região da Península Antártica	26
<u>CAPÍTULO 3 - PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE VLF NA BAIXA IONOSFERA</u>	29
3.1 - Modelo ionosférico	29
3.2 - Propagação no guia de onda Terra-Ionosfera.....	31
<u>CAPÍTULO 4 - INSTRUMENTAÇÃO E DADOS DE PROPAGAÇÃO DE VLF</u>	35
4.1 - Instrumentação	35
4.1.1 - Receptores	36
4.1.2 - Padrões de frequência	37
4.1.3 - Antenas	37
4.1.4 - Registrador	37

4.1.5 - Estações transmissoras	39
4.2 - Dados de fase de sinais de VLF	40
4.2.1 - Cálculo da iluminação do trajeto	42
4.2.2 - Cálculo do horário do amanhecer e do anoitecer	42
<u>CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</u>	45
5.1 - Introdução	45
5.2 - Resultados decorrentes da variação de fase com a iluminação do trajeto	50
5.2.1 - Variação sazonal do coeficiente angular F da Equação 5.2 para o período de pós-iluminação máxima (F_{pm})	55
5.2.2 - Variação sazonal do coeficiente angular F da Equação 5.2 para o período de pré-iluminação máxima (F_{am})	58
5.3 - Estudo da variação da altura de reflexão dos sinais de VLF através da variação diurna de fase	62
5.3.1 - Comportamento anual da variação diurna de fase	62
5.3.2 - Seleção da altura de referência (h_o)	64
5.3.3 - Cálculo da variação de altura de reflexão ...	68
5.3.4 - Variação da altura de reflexão calculada através do modelo semi-empírico IRI-86	71
5.3.5 - Comparação das alturas de reflexão noturna ..	74
5.4 - Resposta da baixa ionosfera à explosões solares	76
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	79
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	83

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Regiões da atmosfera, mostrando os nomes convencionais que descrevem os vários níveis e regimes físicos	07
2.2 - Perfil teórico da razão entre íons negativos e elétrons para os períodos diurno e noturno	11
2.3 - Distribuição com a altitude dos principais constituintes minoritários na atmosfera média .	13
2.4 - Densidade diurna e noturna para os elétrons e densidade diurna para os íons positivos	14
2.5 - Taxa de produção de pares de íons resultante do ajuste exponencial e da lei de potência dos fluxos de elétrons	16
2.6 - Esquema de reações utilizado na modelagem da química dos íons negativos para a região D	22
2.7 - Distribuição com a altura da concentração dos principais íons negativos, da concentração total dos íons positivos e concentração eletrônica para os períodos: (a) noturno e (b) diurno	23
2.8 - Iso-contornos da intensidade do campo magnético total calculado à superfície da Terra em nT ...	24
2.9 - Distribuição da precipitação de elétrons com energias em torno de 100 KeV	27
3.1 - Elementos do guia de onda Terra-Ionosfera	32
4.1 - Esquema do sistema de rastreio montado na Estação Antártica Comandante Ferraz	35
4.2 - Diagrama simplificado do funcionamento de receptor de VLF	36
4.3 - Trecho de registro efetuado no dia 18/06/86 das 10:15 às 12:50 TU	38
4.4 - Distribuição dos segmentos e frequências do sistema Omega	40
4.5 - Mapa identificando a estação transmissora Omega Argentina, a Estação Antártica Comandante Ferraz e o Rádio Observatório do Itapetinga-Atibaia/SP	41

5.1 - Comportamento diurno de fase obtido em 15/06/86 para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia	47
5.2 - Comportamento diurno de fase obtido em 30/01/87 para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia	49
5.3 - Desvios de fase pós-iluminação máxima em função de $\ln(\sec \bar{X} / \sec \bar{X}_m)$ obtidos para o trajeto Argentina-Ferraz	52
5.4 - Desvios de fase pós-iluminação máxima em função de $\ln(\sec \bar{X} / \sec \bar{X}_m)$ obtidos para o trajeto Argentina-Atibaia	54
5.5 - Médias mensais do coeficiente angular da reta (F_{pm}) para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia	56
5.6 - Variação anual das médias mensais do coeficiente angular das retas de regressão linear (F_{pm}) para o trajeto GBR.-Tananarive ...	57
5.7 - Desvio de fase pré-iluminação máxima em função de $\ln(\sec / \sec)$, obtidos para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia ..	59
5.8 - Médias mensais do coeficiente angular da reta (F_{am}) para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia	61
5.9 - Médias mensais da variação diurna de fase normalizada pela distância e a variação do $\cos(\bar{X})$ (- - -), para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia	63
5.10 - Variação sazonal da variação de fase diurna normalizada pela distância em função da frequência para a estação Omega Argentina recebida na Estação Antartica Comandante Ferraz e em Atibaia	66
5.11 - Curvas de atenuação com a distância para o primeiro (1) e segundo (2) modos de propagação, obtidos para a frequência de 13,6 kHz nos períodos noturno, com $h_o = 90$ km (a) e diurno, com $h_o = 70$ km (b)	68
5.12 - Variação da altura de reflexão de março/86 a fevereiro/87 obtidas para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz com $h_o = 65$ km no inverno e $h_o = 67$ km no verão e (b) Argentina-Atibaia com $h_o = 65$ km durante todo o período	70

5.13 - Variação da altura de reflexão, de março/86 a fevereiro/87 utilizando a altura de referência calculada através do IRI-86 para: (a) trajeto Argentina-Ferraz e (b) trajeto Argentina-Atibaia	73
5.14 - Variação da altura de reflexão noturna, de março/86 a fevereiro/87, utilizando-se os modelos (1) Wait e Spies (1964) e (2) IRI-86 para: (a) trajeto Argentina-Ferraz e (b) trajeto Argentina-Atibaia	75
5.15 - Variação relativa de fase em 03/03/86 para anomalia súbita de fase - SPA ("Sudden Phase Anomaly") registrada na Estação Antártica Comandante Ferraz pelo transmissor Omega Argentina	78

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- Altura da ionosfera com relação ao centro da Terra
a	- Parâmetro físico relacionado com densidade eletrônica
b	- Parâmetro físico relacionado com a frequência de colisão
B	- Intensidade do campo magnético terrestre
c	- Velocidade da luz
d	- Distância entre transmissor e receptor
E	- Energia
e	- Carga do elétron
F	- Coeficiente angular da regressão linear
g	- Aceleração da gravidade
H	- Escala de altura
h	- Altura
h_0	- Altura de referência
$h(x)$	- Altura do máximo de ionização
k	- Constante de Boltzmann
L	- Taxa de perdas
m	- Massa da partícula
m_e	- Massa do elétron
N^-	- Densidade dos íons negativos
N^+	- Densidade dos íons positivos
N_e	- Densidade de elétrons
$N_e(h)$	- Densidade de elétrons em uma altura h
$N_e(h_0)$	- Densidade de elétrons em uma altura h_0
N_i	- Densidade de íons
q	- Taxa de produção de elétrons

R	- Índice de Zurich
R_T	- Raio da Terra
T	- Temperatura
$\bar{V}$	- Velocidade total resultante dos processos de transporte
V	- Velocidade de fase
β	- Gradiente de condutividade
$\delta\phi$	- Desvios de fase em relação ao máximo de iluminação
$\delta\phi_0$	- Constante do ajuste linear
ϵ_0	- Permissividade
σ_S	- Condutividade do solo
λ	- Comprimento de onda
λ_i	- Razão entre as densidades dos íons negativos e dos elétrons
$\nu(h)$	- Frequência de colisões em uma altura h
$\nu(h_0)$	- Frequência de colisões em uma altura h_0
ω_0	- Frequência angular de plasma
$\omega_0(h_0)$	- Frequência angular de plasma em uma altura h_0
ω_r	- Condutividade
$\omega_r(h)$	- Condutividade em uma altura h
$\omega_r(h_0)$	- Condutividade em uma altura h_0
ω_T	- Girofrequência angular dos elétrons
Δh	- Variação de altura
$\Delta\phi$	- Variação relativa de fase
Ω	- Parâmetro de campo magnético
χ	- Distância zenital solar

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A formação da baixa ionosfera terrestre está diretamente relacionada com a radiação solar. No entanto, processos físicos, químicos e dinâmicos que ocorrem na média atmosfera influenciam aquela região provocando grande variabilidade diária, diferentes respostas à perturbações externas como as que ocorrem entre inverno e verão, e outros fenômenos ainda não totalmente esclarecidos.

A região D é a parte mais baixa da ionosfera. Constituída de um plasma fracamente ionizado, com a frequência de colisões maior que a girofrequência dos elétrons e grande concentração de espécies neutras, é a região mais complexa da ionosfera.

A geometria do campo magnético terrestre na região polar e a existência da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul tornam as regiões Antártica e a do Atlântico Sul de grande interesse na pesquisa dos processos que ocorrem na ionosfera e magnetosfera em altas e médias latitudes.

A propagação de ondas de muito baixa frequência - VLF ("Very Low Frequency") constitui um dos melhores métodos de investigação da baixa ionosfera. A fase de suas transmissões são altamente estáveis, com aplicação em sistemas de sincronismo temporal, sistemas de comunicações, navegação aérea e marítima (em particular a rede Omega de navegação).

Apesar de sofrerem baixa atenuação ao se propagarem a longas distâncias, as ondas de VLF têm seu comportamento condicionado às condições físicas da baixa ionosfera. A precisão do sistema de navegação é então tanto

maior quanto mais bem definidos forem os parâmetros de propagação para as várias regiões do globo.

Em vários trabalhos têm-se pesquisado os diversos processos físicos e químicos que ocorrem na baixa ionosfera. As regiões do Atlântico Sul e Antártica estão entre as menos conhecidas e só recentemente vêm recebendo maior atenção. A propagação de ondas de VLF através destas regiões apresentam várias características singulares, principalmente devido à presença da Anomalia, a qual tem seu centro na região sudeste do Brasil e estende-se aproximadamente até a região Antártica. A propagação através de camadas de gelo e os efeitos da atividade solar e magnética em regiões austrais, são alguns dos pontos a serem pesquisados.

A instalação da primeira estação brasileira na Antártica - Estação Antártica Comandante Ferraz (Ferraz) - trouxe a oportunidade de se pesquisar a baixa ionosfera (região D) em altas e médias latitudes através de ondas de VLF.

Durante a operação Antártica II em fevereiro de 1984 foi instalada e teve início a operação do projeto FIX-VLF que consistiu na recepção de sinais de VLF controlados por padrão atômico. Pode-se levantar várias características de propagação para todas as estações transmissoras da rede Omega. Os dados obtidos foram então comparados com aqueles obtidos simultaneamente no Rádio Observatório do Itapetinga, Atibaia, São Paulo, Brasil (Kaufmann et al., 1985).

De fevereiro de 1986 à março de 1987 ocorreu novamente a instalação daquele sistema de rastreamento na Estação Antártica Comandante Ferraz, estendendo-se as pesquisas para o estudo dos efeitos sazonais e dos efeitos solares-terrestres nas latitudes sub-Antárticas. Durante

este período os sinais da estação Omega Argentina (Argentina) na frequência de 13,6 kHz foram recebidas continuamente tanto na Estação Antártica como em Atibaia, com o objetivo de se comparar o comportamento de uma trajetória de propagação em média latitude, trajetória esta praticamente toda dentro da Anomalia (Argentina-Atibaia), com uma trajetória sub-Antártica (Argentina-Ferraz).

Deve-se ressaltar que no período de março a dezembro de 1986 ocorreu a Primeira Expedição de Inverno na Estação Antártica Comandante Ferraz, da qual o autor deste trabalho participou monitorando o equipamento de rastreamento de VLF com o objetivo de acompanhar a coleta de dados, reduzi-los e garantir a sua boa qualidade técnica.

Os objetivos deste trabalho são: - analisar e comparar o comportamento dos sinais obtidos no verão e no inverno (de março de 1986 à fevereiro de 1987) nos trajetos Argentina-Atibaia e Argentina-Ferraz a partir dos registros efetuados simultaneamente na Estação Antártica Comandante Ferraz e no Rádio Observatório do Itapetinga, Atibaia; - avaliar a resposta da ionosfera em função da distância zenital; - determinar a variação sazonal da fase relativa e, através desta, obter as variações dia/noite da altura de reflexão e a altura de reflexão noturna, em ambos os trajetos. - Comparar estas alturas com o resultado obtido a partir da aplicação do modelo semi-empírico IRI-86; - realizar um breve estudo da detecção de anomalias rápidas de fase (SPA - "sudden phase anomaly") em diferentes frequências (10,2 kHz e 13,6 kHz) na Estação Antártica Comandante Ferraz.

No Capítulo 2 apresenta-se uma descrição da ionosfera terrestre, com ênfase para a região D, incluindo os principais processos físicos e químicos que nela ocorrem.

Apresenta-se um resumo sobre a propagação de ondas de VLF no guia de onda Terra-Ionosfera no Capítulo 3.

Uma descrição do equipamento utilizado, localização dos trajetos em estudo e a obtenção de dados encontra-se no Capítulo 4.

No Capítulo 5 faz-se uma análise da variação sazonal do comportamento de fase para ambos os trajetos e a análise dos dados com relação a distância zenital. Efetua-se o cálculo das variações de altura e posterior comparações entre os dois trajetos estudados.

Finalmente apresenta-se uma análise geral dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

A IONOSFERA

2.1 - INTRODUÇÃO

Acima de aproximadamente 60 quilômetros a atmosfera terrestre é fracamente ionizada devido a interação entre as radiações eletromagnética e corpuscular e os constituintes neutros formando pares elétron-íon, que posteriormente se recombina. A ionosfera é definida como a região da atmosfera superior onde os elétrons existem em quantidades suficientes para influenciar a propagação de ondas de rádio. Ela é mantida por um processo de equilíbrio entre a produção dos pares elétron-íon e os mecanismos de perdas físicas, químicas e processos de transporte.

2.2 - ATMOSFERA NEUTRA

No estudo da atmosfera é usual dividi-la em várias regiões de acordo com as propriedades e parâmetros que se investiga.

A classificação que utiliza a temperatura como parâmetro inicia-se pela troposfera, a camada mais baixa, estendendo-se do solo até cerca de 13 km, com a temperatura decrescente na razão de 10 K/km e atingindo um mínimo de 210 K na tropopausa. Acima desta região está a estratosfera onde a temperatura aumenta até atingir um máximo de 270 K na estratopausa a 50 km. O aquecimento da estratosfera deve-se a absorção da radiação ultravioleta pela camada de ozônio, que tem seu máximo de concentração em torno de 25 km. A esta região segue-se a mesosfera (ou atmosfera média) onde a temperatura volta a decrescer com a altitude atingindo um valor mínimo de cerca de 180 K na mesopausa, situada em torno de 85 km. Acima da mesosfera

o gradiente de temperatura (dT/dh , variação da temperatura com a altura) torna-se positivo, região esta denominada termosfera. A temperatura atinge seu maior valor entre 700 a 1500 K na termopausa a cerca de 400 km de altitude. Esta é a região mais quente da atmosfera, acima da qual a alta condutividade térmica mantém a temperatura praticamente constante (Rishbeth e Garriott, 1969).

Com relação à composição química, a atmosfera divide-se em homosfera, onde os constituintes estão completamente misturados por turbulência e a distribuição com a altitude é feita de acordo com o peso molecular médio. Esta região estende-se do solo até a turbopausa e seu limite superior localiza-se a 100 km. Acima da turbopausa, devido a ausência de turbulência e à difusão molecular, tem-se a heterosfera onde a composição química varia com a altura e cada constituinte está distribuído conforme seu peso molecular. A partir de 600 km o constituinte predominante é o oxigênio atômico e entre 1.000 e 2.000 km o hélio torna-se o principal constituinte formando a heliosfera, seguido pelo hidrogênio atômico ionizado formando a protonosfera a partir de 3.000 km.

Acima de 600 km os constituintes atmosféricos, principalmente o H e He, podem adquirir energia cinética suficiente para vencer o potencial gravitacional e abandonar a atmosfera terrestre. Essa região é denominada de exosfera e seu limite inferior exobase ou baropausa. Abaixo da baropausa encontra-se a região denominada barosfera, onde os gases estão presos à atmosfera pela força da gravidade.

A Figura 2.1 mostra a nomenclatura mais utilizada nas diversas regiões da atmosfera, relativa aos diversos parâmetros estudados com seus respectivos intervalos aproximados de altitude. Os perfis médios de

temperatura e densidade eletrônica mostrados são típicos de condições de alta atividade solar e latitudes médias.

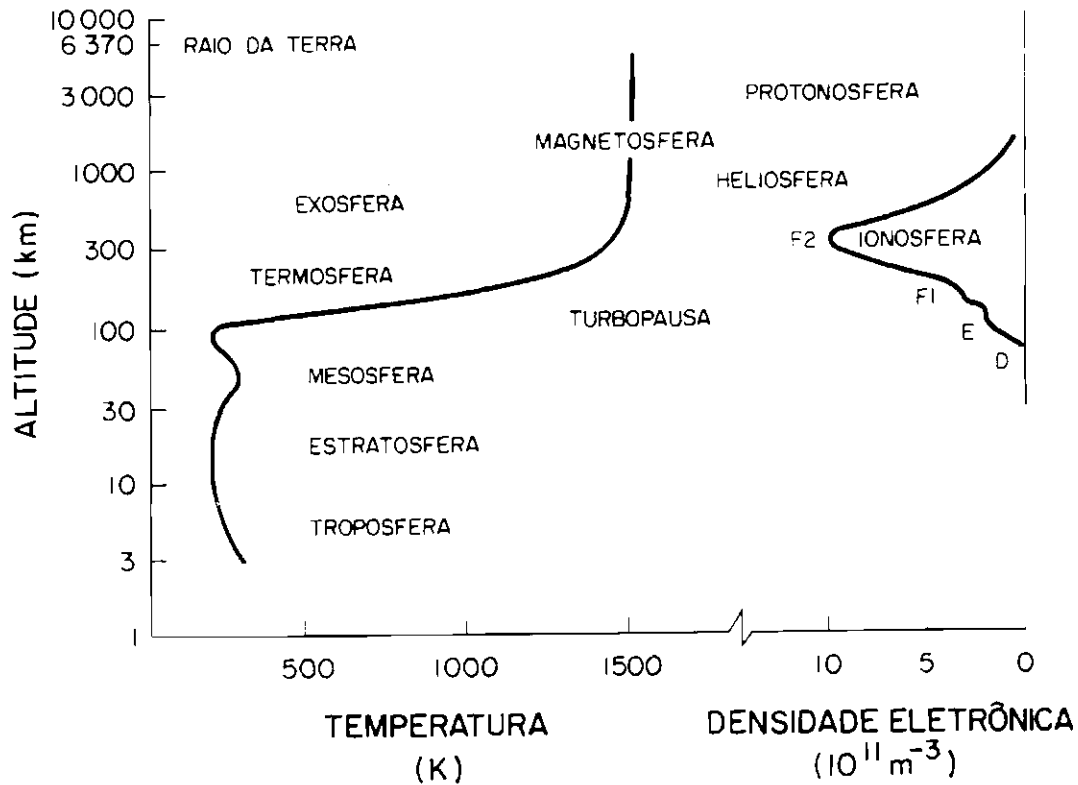


Fig. 2.1 - Regiões da atmosfera, mostrando os nomes convencionais que descrevem os vários níveis e regimes físicos.

FONTE: Rishbeth e Garriot (1969), p. 112.

2.3 - ATMOSFERA IONIZADA

A ionização da atmosfera surge basicamente devido à radiação ultravioleta e raios-X solares. Esta região ionizada, denominada ionosfera, apresenta variações ou inflexões na densidade eletrônica, responsáveis pelas chamadas regiões D, E, F1 e F2.

Este perfil resulta da interação entre a radiação solar e os diferentes constituintes atmosféricos, que são ionizados em diferentes comprimentos de onda, da distribuição dos constituintes com a altura e dos vários processos de perdas envolvidos.

As principais características das regiões são (Papagiannis, 1972; Ratcliffe, 1972; Mitra, 1981):

Região D: inicia-se por volta de 60 km e estende-se até cerca de 90 km. É uma região fracamente ionizada, com grande densidade de espécies neutras. A máxima densidade eletrônica ($\sim 3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$) ocorre próximo de 85 km, devido principalmente ao óxido nítrico (NO), um constituinte minoritário, ionizado pela radiação Lyman alfa solar ($1.216 \text{ \AA}$).

Região E: estende-se desde 90 km até aproximadamente 150 km, com seu pico de densidade eletrônica (10^5 cm^{-3}) em torno de 115 km. Suas principais fontes de ionização são a radiação Lyman beta, raios X moles e ultravioleta solares, formando NO^+ , O_2^+ e O^+ como principais íons. As regiões, D e E são controladas primariamente por processos fotoquímicos de produção e perdas de ionização, sendo os processos de transporte de plasma desprezíveis.

Região F: durante o dia esta região subdivide-se em duas regiões F1 e F2. A região F1 situa-se entre 150 e 200 km, com um máximo de densidade eletrônica ($2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) em torno de 180 km. A radiação ultravioleta (200 a $900 \text{ \AA}$) é a principal responsável pela ionização do oxigênio atômico. Na região F1 ocorre o máximo de produção de íons por fotoionização, e esta é controlada por processos fotoquímicos, sendo a taxa de perdas proporcional à densidade eletrônica, como ocorre também nas regiões D e E. Em altitudes

maiores o transporte de plasma torna-se cada vez mais importante, de modo que, acima de 250 km o transporte é muito eficiente, com o campo magnético terrestre exercendo importante influência na distribuição das partículas carregadas. A região F2 estende-se acima da F1 até cerca de 1.000 km, com seu pico ($5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$) ocorrendo em 250 km. Os efeitos combinados da difusão de plasma e processos fotoquímicos e iônicos fazem com que neste pico ocorra a máxima densidade eletrônica no perfil vertical da ionosfera. Para esta região a taxa de recombinação é linear (proporcional à densidade eletrônica), pois os processos de perdas são limitados por reações de transferência de carga. Durante a noite, as regiões F1 e F2 coalescem formando uma única região denominada F.

Acima de aproximadamente 1.000 km, o movimento das partículas ionizadas é governado pelo campo geomagnético. Esta região é denominada magnetosfera cujo limite superior, a magnetopausa, define o contorno que separa a região interna, onde as linhas do campo magnético terrestre estão confinadas pela pressão do vento solar, da região externa onde flui o vento solar. Na direção do Sol ela tem contorno aproximadamente esférico até uma distância de 10 raios terrestres, enquanto que na direção anti-solar torna-se cilíndrica, formando uma longa cauda, resultante da deformação que as linhas do campo geomagnético sofrem sob a ação da pressão exercida pelo vento solar.

2.4 - EQUILÍBRIO DE IONIZAÇÃO

Os processos físicos e químicos que governam o comportamento do plasma ionosférico estão relacionados através de uma equação de equilíbrio ou de continuidade. Esta equação inclui os processos de produção e destruição de íons e os processos que resultam em movimento ou transporte de ionização. Denotando por $\bar{V}$ a velocidade

macroscópica total resultante dos processos de transporte, a equação de continuidade para os elétrons é dada por:

$$\frac{dN_e}{dt} = q - L - \text{div}(n\bar{V}) \quad (2.1)$$

onde N_e é a densidade eletrônica, q é a taxa de produção de elétrons, L é a taxa de perdas, $\text{div}(n\bar{V})$ são as perdas por movimentos dos elétrons e para cada espécie iônica, tem-se:

$$\frac{dN_i}{dt} = q - L - \text{div}(n\bar{V}) \quad (2.2)$$

sendo N_i a densidade do i -ésimo íon.

Um parâmetro importante no estudo das partículas carregadas é a razão entre a densidade dos íons negativos e a densidade eletrônica definida por $\lambda_i = N^-/N_e$. Sendo N^- e N^+ as densidades dos íons negativos e positivos, respectivamente, a neutralidade do plasma ionosférico requer então que:

$$N^+ = N^- + N_e = (\lambda_i + 1)N_e \quad (2.3)$$

Para a baixa ionosfera podem-se considerar desprezíveis as perdas por movimentos, logo no equilíbrio fotoquímico as taxas de produção e de perdas igualam-se, resultando em:

$$q = L \quad \text{e} \quad \frac{dN_e}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

Na Figura 2.2 apresenta-se o perfil teórico de para os períodos diurno e noturno (Turco e Sechrist, 1972). Acima da altitude onde $\lambda_i = 1$, a densidade eletrônica supera a dos íons negativos. Este é um parâmetro importante na química da região, sofrendo considerável variação com a altura e com o tipo de ionização presente (Arnold e Krankowsky, 1977; Arnold et al., 1980).

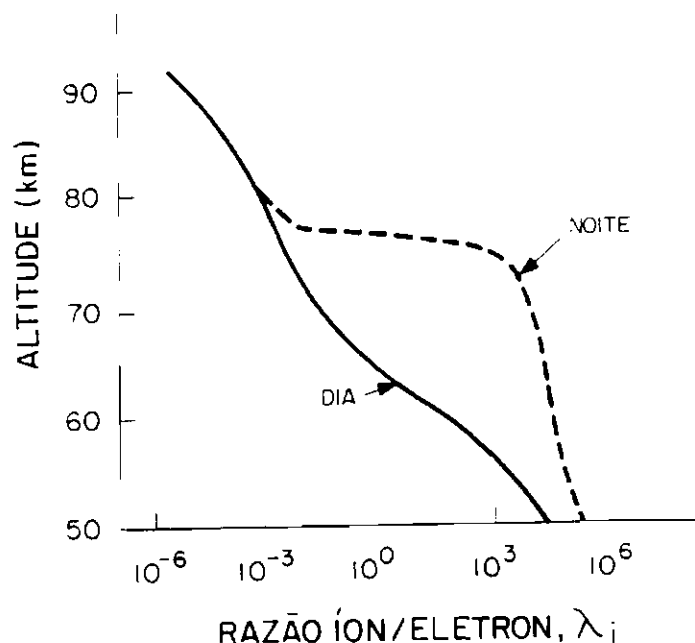


Fig. 2.2 - Perfil teórico da razão entre os íons negativos e elétrons para os períodos diurno e noturno.

FONTE: Turco e Sechrist (1972), p. 728.

2.5 - REGIÃO D

A região D situa-se na parte mais baixa da ionosfera, sendo resultante dos efeitos das radiações mais penetrantes. Seu limite superior ocorre por volta de 90 km (Ratcliffe, 1972; Mitra, 1981), enquanto que para o limite inferior a altitude mais aceita é de 60 km (Mitra, 1981). Como mencionado anteriormente, esta é uma região de plasma fracamente ionizada, existindo também uma grande densidade de espécies neutras, o que propicia o desenvolvimento de um grande número de reações complexas do tipo troca iônica, junção e separação eletrônica. A frequência de colisões é várias ordens de grandeza maior do que a girofrequência, tanto para os elétrons como para os íons, de modo que a influência do campo geomagnético pode ser desprezada. Abaixo de 60 km os íons negativos tornam-se importantes e,

eventualmente, dominantes seguidos pelos íons hidratados e em pequena concentração pelos aerossóis.

Com relação à atmosfera neutra, a região D tem seu início dentro da mesosfera e estende-se até a termosfera. Nesta região, as propriedades físicas tais como temperatura, pressão e densidade variam diretamente com a latitude e estação do ano, havendo pouca influência da atividade solar. Nesta região observam-se ainda variações diárias decorrentes de vários mecanismos, ainda não totalmente compreendidos, como a dissipação de ondas gravitacionais e processos de origem meteorológica (Danilov e Simonov, 1982).

A mesopausa, situada em torno de 85 km, apresenta a menor temperatura atmosférica controlando várias reações químicas importantes na região D.

A atmosfera abaixo dos 100 km de altitude apresenta uma mistura homogênea de gases constituída de 78% de nitrogênio molecular (N_2), 21% de oxigênio molecular (O_2) e de constituintes denominados minoritários, mas de grande importância para a existência da região D. A Figura 2.3, Mitra (1981), apresenta a concentração dos principais gases minoritários presentes na atmosfera incluindo alguns aerossóis. Dos constituintes minoritários o óxido nítrico (NO) é o mais importante apresentando um perfil praticamente idêntico em baixas e médias latitudes, mas bastante variável nas regiões polares.

Outro constituinte minoritário importante é o oxigênio atômico (O), cuja concentração está associada à molécula de ozônio (O_3) através de reações de dissociação do ozônio e da recombinação do oxigênio, tendo estes grande participação na química dos íons negativos. Trabalhos recentes têm mostrado a importância da concentração de O na

altitudes penetra até a baixa ionosfera provocando a dissociação do oxigênio molecular e a ionização do NO, tornando este o principal íon da região, atingindo concentrações em torno de 10^3 cm^{-3} em 70 km.

A radiação X entre 1 e $8 \text{ \AA}$ ioniza todos os constituintes da região, principalmente o N_2 e o O_2 .

A radiação ultravioleta com comprimentos de onda entre $1.027 \text{ \AA}$ e $1.118 \text{ \AA}$ ioniza as moléculas do oxigênio metaestável $\text{O}_2(^1\Delta_g)$.

A Figura 2.4 ilustra os perfís de densidade eletrônica nos períodos diurno e noturno e o perfil dos íons positivos durante o dia para a região D em condições de ionosfera calma (Arnold e Krankowsky, 1977).

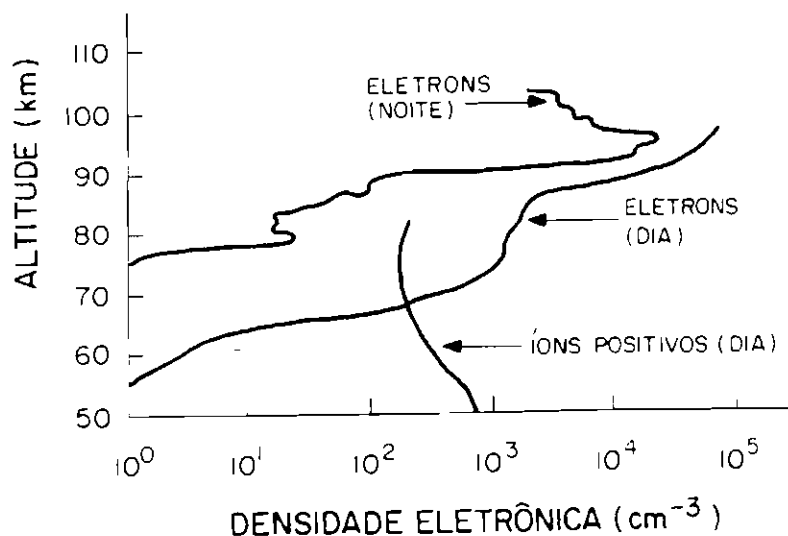


Fig. 2.4 - Densidade diurna e noturna para os elétrons e densidade diurna para os íons positivos.

FONTE: Arnold e Krankowsky (1977), p. 105.

Não somente a radiação solar pode produzir ionização, mas também partículas energéticas ($E > 1 \text{ GeV}$), denominados raios cósmicos galáticos, que ao penetrarem na atmosfera mais facilmente em altas latitudes geomagnéticas ionizam todos os constituintes da região. Embora esta ionização seja normalmente menor que aquela produzida pelos fótons solares durante o dia, pode tornar-se importante em períodos perturbados e durante a noite, quando a radiação solar está ausente. A intensidade do fluxo de raios cósmicos varia com a latitude geomagnética (Moler, 1960; Chilton et al., 1964a; Kuntz, 1987). Esta variação deve-se à interação entre a radiação e o campo geomagnético de modo que somente partículas acima de determinada energia podem penetrar na atmosfera em uma certa latitude, chamada latitude de corte.

Os raios cósmicos sofrem uma modulação pelo vento solar (Brandt, 1970; Velinov, 1968; Kuntz, 1987). Em períodos de sol ativo há uma aumento no fluxo de partículas ionizadas no vento solar formando uma blindagem, diminuindo a intensidade da radiação cósmica que chega à Terra (Brandt, 1970).

A precipitação de elétrons forma uma importante fonte de ionização na parte mais baixa da região D, principalmente em altas latitudes. Benbrook et al., (1983) estimaram o fluxo de elétrons com energia superior a 180 keV através de medidas feitas com detetores de cintilação, no período noturno, na Estação Antártica Siple (76°S , 84°O). Na Figura 2.5 mostram-se os ajustes exponencial e através da lei da potência das taxas de ionização produzidas pela precipitação de elétrons. Ainda nesta figura estão ilustradas as taxas de produção de ionização pela radiação Lyman alfa diurna e a espalhada pelo hidrogênio na geocorona a noite, aquela devida aos raios X (Piazza, 1975), a radiação UV a 70°N (Reagan e Watt, 1976) e aos raios cósmicos galáticos nos períodos de

máxima e mínima atividade solar. Observa-se que a precipitação de elétrons é a fonte dominante na produção de ionização entre 65 e 95 km a noite.

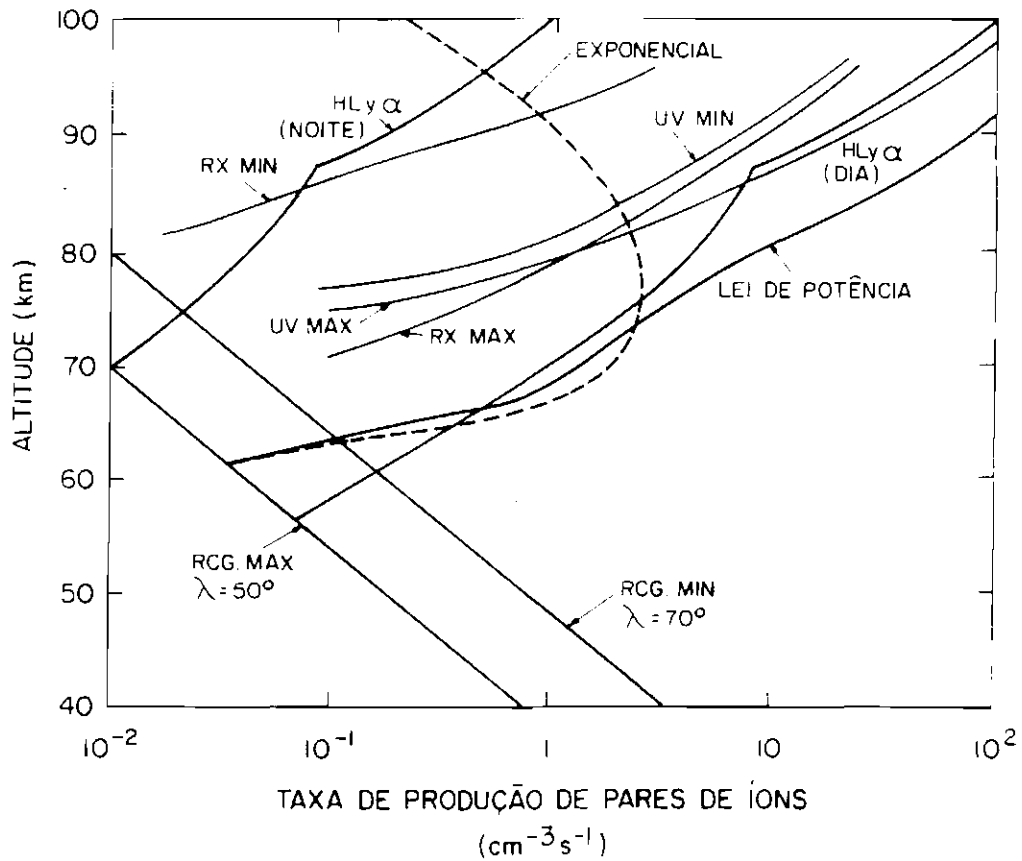


Fig. 2.5 - Taxa de produção de pares de íons resultante do ajuste exponencial e da lei de potência dos fluxos de elétrons.

FONTE: Benbrook et al., (1983), p. 197; Piazza (1975), p. 33; Reagan e Watt (1976), p. 4584.

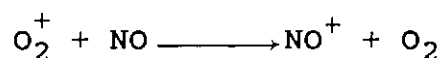
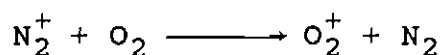
2.5.2 - QUÍMICA DA REGIÃO D

Abaixo de 90 km de altitude encontra-se ainda grande concentração de constituintes neutros, o que torna a frequência de colisões mais importante que a girofrequência para os íons. Nesta região todos os constituintes estão em equilíbrio térmico. A temperatura é um parâmetro que controla vários processos químicos na região D.

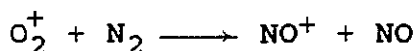
Os principais constituintes que participam da química da região são: NO, O, O₂, NO₂, CO₂, H₂O e metais alcalinos que aparecem em pequenas proporções. Pelo fato de alguns destes constituintes permanecerem um período relativamente longo antes de serem destruídos e suas distribuições estarem associadas à movimentos em níveis inferiores na mesosfera, o comportamento da região é, em grande parte, controlado pela atmosfera não ionizada. Face ao grande número de parâmetros que caracterizam a região D, o seu comportamento é mais irregular do que aquele das regiões da ionosfera superior e portanto a sua química é mais complexa (Ratcliffe, 1972; Mitra, 1981; Torr, 1985).

2.5.3 - ÍONS POSITIVOS

Os principais constituintes precursores dos íons positivos são: abaixo de 65 km o N₂ e O₂ ionizados pelos raios-X e raios cósmicos, entre aproximadamente 70 e 90 km o NO ionizado pela radiação Lyman alfa solar e em menor grau o O₂(¹Δg) pela radiação ultravioleta. No entanto estes íons não permanecem nesta forma, pois sofrem reações de transferência de carga dadas por:



sendo estas reações muito rápidas, e, devido à grande concentração de O_2 , ocorre a perda dos íons N_2^+ e O_2^+ rapidamente, o que, em conjunto com a reação:



leva a uma maior concentração do íon NO^+ , tornando-se majoritário em aproximadamente 80 km juntamente com o íon O^+ (Narcisi et al., 1972).

Com relação à composição iônica, a baixa ionosfera é caracterizada por dois regimes em altitudes diferentes: os que são dominados por íons moleculares (regime superior) e por aglomerados iônicos (regime inferior). Medidas de composições iônicas evidenciam que a região de separação entre os dois regimes é variável em altura, estando normalmente entre 70 e 90 km. Relacionados a estes regimes, existem diferentes coeficientes de recombinação elétron-íon positivo, pois a recombinação com aglomerados iônicos é cerca de 10 a 20 vezes mais rápida do que a com íons moleculares. A formação dos aglomerados iônicos e sua subsequente hidratação, particularmente aquelas relacionadas com o NO^+ , principal íon primário na região D, tem forte influência na densidade das partículas carregadas, uma vez que estas densidades estão relacionadas com o coeficiente de recombinação, que por sua vez é maior para os aglomerados que para os íons, como foi mencionado acima. A principal implicação aeronômica é a forma como o coeficiente de recombinação responde a uma alteração da temperatura mesosférica (Arnold et al., 1980; Forbes, 1982).

Iniciando com NO^+ como íon precursor a uma altitude de 80 km, tem-se a formação de aglomerados iônicos através de reações de associação com N_2 e O_2 , seguido por reações de troca com CO_2 e H_2O (Reid, 1977; Arnold et al., 1980).

Após a formação dos aglomerados iônicos a hidratação destes dependerá da constante de tempo das reações de hidratação, que está diretamente relacionada com a temperatura da mesosfera, de modo que para temperaturas abaixo de cerca de 160 K ocorre a hidratação, temperaturas que excedam 160 K levam a rápida dissociação térmica do NO^+CO_2 quebrando portanto o ramo das reações que formam os íons NO^+ hidratados (Mitra, 1981).

As reações de formação dos aglomerados iônicos de O_2^+ tem duas grandes diferenças com relação ao NO^+ : primeiro, a sua formação se processa através da associação com o O_2 e somente à temperaturas muito baixas esta ocorre com o N_2 ; segundo, o íon intermediário O_4^+ não reage com o CO_2 , mas somente com H_2O , sendo que este íon sofre dissociação térmica quando a temperatura é superior a 210 K o que evidencia uma forte dependência com a temperatura.

A formação dos aglomerados de O_2^+ tem particular interesse quando este torna-se dominante na região D. Isto ocorre quando a ionização é devida a partículas energéticas (condições perturbadas ou no período noturno em altas latitudes). Na parte superior da região D, onde a temperatura é normalmente inferior a 210 K, a formação dos aglomerados pode ocorrer via oxigênio atômico.

Na parte inferior da região D a temperatura torna-se suficientemente alta levando à dissociação do O_4^+ , de modo a tornar o íon O_2^+ dominante desde que a concentração de NO seja baixa (Arnold et al., 1980).

Forbes (1982) e Danilov e Simonov (1982) evidenciaram não só a importância da temperatura como de outros parâmetros geofísicos e meteorológicos no controle da química dos íons positivos e, portanto, na densidade das partículas carregadas.

2.5.4 - ÍONS NEGATIVOS

A formação de íons negativos primários na parte mais baixa da ionosfera se deve à reações de associação de elétrons livres com os gases neutros, principalmente com o oxigênio molecular através de uma reação de três corpos.

A formação de O^- através da reação do ozônio com elétron é um processo importante na parte mais inferior da região D.

Outra contribuição na formação dos íons negativos é dada pela dissociação radiativa do O_2 e O que formam O_2^- e O^- , sendo a formação de O^- através da associação radiativa, um processo dominante no limite superior da região D (90 km). No entanto, a reação de três corpos é o mecanismo dominante na formação do O^- abaixo de 85 km até aproximadamente o máximo de densidade de ozônio a noite, entre 70 e 75 km onde domina a ligação associativa. Este íon principal segue cadeias de reações até atingir íons moleculares finais, NO_3^- e HCO_3^- , a partir dos quais se inicia a formação de aglomerados iônicos.

Uma visão mais global da química dos íons negativos pode ser observada através da Figura 2.6, que ilustra o esquema das reações utilizado por Thomas e Bowman (1985). O modelo destes autores engloba os principais trabalhos desenvolvidos anteriormente por Turco e Sechrist (1972); Lelevier e Brascomb (1968); Bates e Baderson (1976); Wisenberg e Kocharts (1980). Seguindo este esquema obtiveram a distribuição com a altura da concentração dos principais íons negativos, a concentração total dos íons positivos e a concentração eletrônica para o período noturno e diurno, que são mostradas na Figura 2.7(a) e (b), respectivamente. Observando a Figura 2.7(a) nota-se que os principais íons durante a noite são o NO_3^- abaixo de 78 km,

o HCO_3^- e CO_3^- nas altitudes mais baixas, sendo que o HCO_3^- é dominante entre 78 e 83 km. Acima de 85 km o O_2^- torna-se o íon dominante. Os perfis de distribuição mostram uma queda acentuada na concentração total dos íons negativos acima de 77 km, enquanto para os íons positivos esta queda tem início em 79 km onde ocorre um aumento rápido na concentração eletrônica. Os íons negativos dominam a concentração total de cargas negativas até cerca de 80 km, onde esta iguala-se à concentração eletrônica ($\lambda_i = 1$).

No período diurno a presença da radiação solar atua na dissociação dos íons negativos, sendo a fotodissociação considerada a responsável pela maior variação dia/noite no equilíbrio entre as concentrações dos íons negativos e dos elétrons. Observa-se na Figura 2.7(b), que apresenta a distribuição com a altura da concentração dos principais íons negativos, elétrons e total dos íons positivos para o período diurno, um aumento da concentração eletrônica em todas as alturas. Aparecem ainda como dominantes os íons NO_3^- até cerca de 79 km, HCO_3^- entre 79 e 83 km e o íon O_2^- acima de 83 km; com as concentrações de íons negativos e eletrônica igualando-se em aproximadamente 71 km. Entre os íons as diferenças marcantes entre os períodos diurno e noturno referem-se às concentrações relativas de CO_3^- e CO_4^- , que estão relacionadas à reações com ozônio.

No esquema de Wisenberg e Kocharts (1980) não foram incluídas as reações de destruição química.

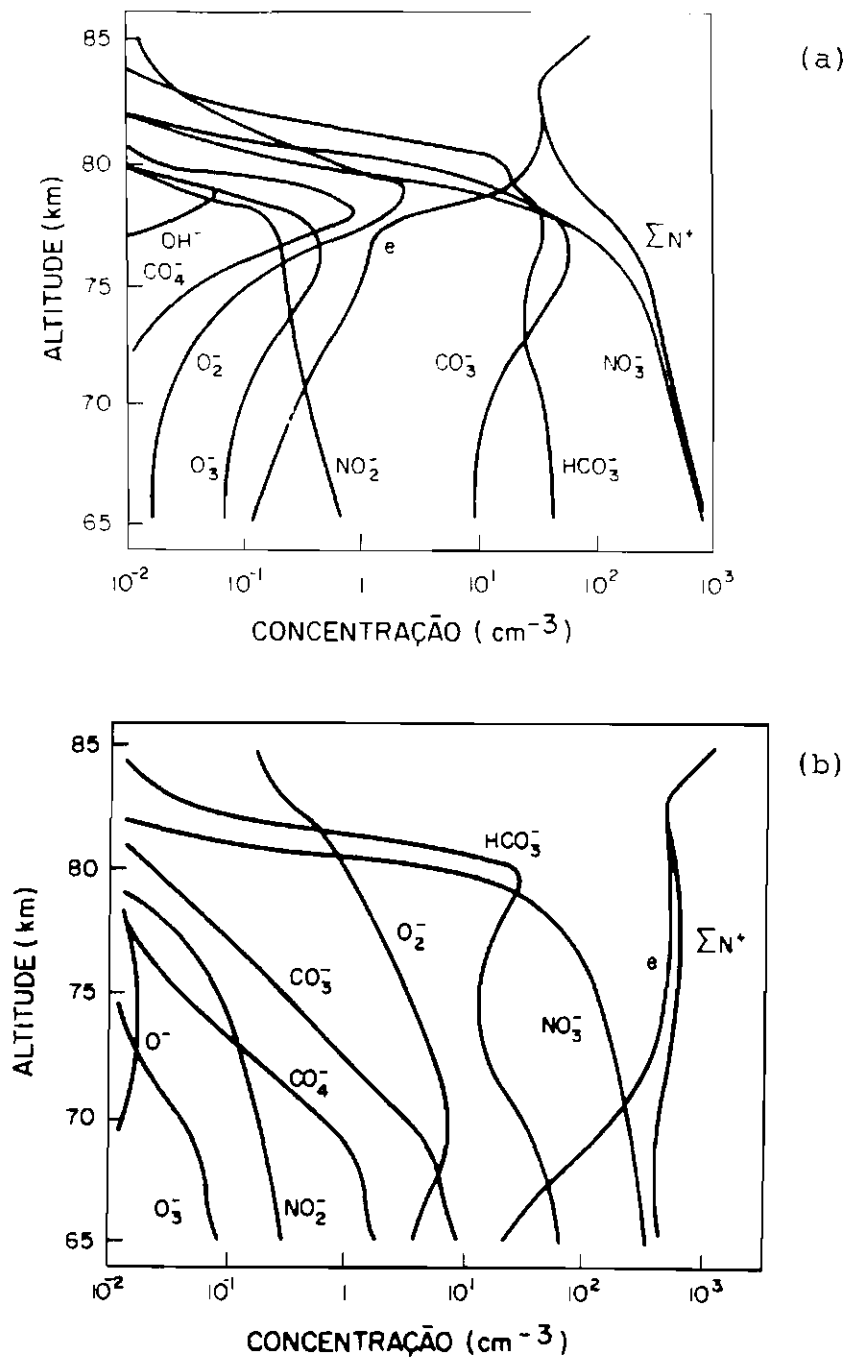


Fig. 2.7 - Distribuição com a altura da concentração dos principais íons negativos, da concentração total dos íons positivos e concentração eletrônica para os períodos: (a) noturno e (b) diurno.

FONTE: Thomas e Bowman (1985), p. 551.

2.6 - ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAGA)

A Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul conhecida por SAGA ("South Atlantic Geomagnetic Anomaly") está localizada na região sul do Oceano Atlântico e tem como principal característica o baixo valor da intensidade total do campo magnético terrestre, com o mínimo ocorrendo no sudeste do Brasil, como pode ser observado na Figura 2.8, que mostra os iso-contornos à superfície da Terra do campo magnético total para o ano de 1980 (Abdu et al., 1973; Gledhill, 1976; Pinto Jr. e Gonzalez, 1989).

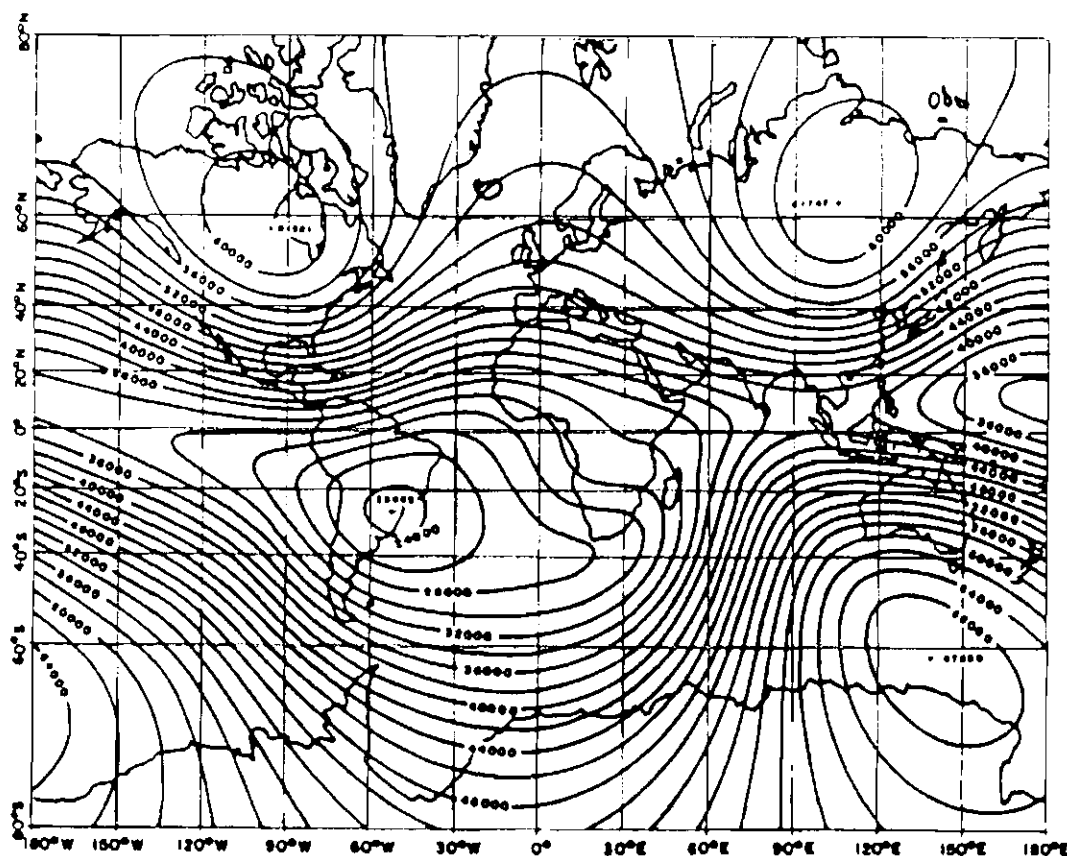


Fig. 2.8 - Iso-contornos da intensidade do campo magnético total calculado à superfície da Terra em nT.

Fonte: Pinto Jr. e Gonzalez (1989), p. 352.

Os baixos valores observados na região da SAGA têm sua origem na distribuição assimétrica das correntes elétricas no interior da Terra, o que pode ser representado por um dipolo magnético excêntrico (Roederer, 1965).

A assimetria das linhas do campo geomagnético resulta em um aumento da interação das partículas presas nos cinturões de radiação com a atmosfera terrestre nas regiões de mais baixa intensidade do campo. A região da SAGA foi reconhecida como um grande sorvedouro de elétrons aprisionados na magnetosfera (Pinto Jr. e Gonzalez, 1989).

Os baixos valores de intensidade do campo geomagnético na SAGA fazem com que as partículas carregadas tenham seus pontos de espelhamento em altitudes menores que em outras regiões aumentando a probabilidade destas interagirem com os constituintes atmosféricos por colisão.

Elétrons movendo-se na direção leste ao longo de contornos de campos espelho de igual intensidade têm um mínimo na Anomalia. Em longitudes fora da Anomalia existe um intervalo de valores de ângulo de passo das partículas denominado cone de perdas de deriva, de modo que elétrons com ângulo de passo dentro deste intervalo são perdidos ao atravessarem a Anomalia em movimento de deriva (Pinto e Gonzalez, 1989).

Elétrons com energias menores que 1 keV penetram até a região F (~ 300 km), para energias entre 1 e 30 keV a interação ocorre na região E (~ 100 km) e elétrons com energias superiores a 30 keV alcançam a região D (Paes Leme, 1986). Kikuchi e Evans (1982) afirmam que elétrons com energia de 300 keV são importantes fontes de ionização tanto diurna como noturna, estimando um fluxo mínimo de 40

elétrons/cm² s sr como necessário para produzir desvios diurnos de fase.

2.7 - REGIÃO DA PENÍNSULA ANTÁRTICA

A região D sub-Antártica não tem sido estudada tão intensivamente como as regiões de média e baixa latitudes. Uma das grandes causas deve-se às condições climáticas inóspitas, dificultando uma presença maior do homem nestas regiões.

Existe um crescente interesse no estudo dos problemas de propagação em altas latitudes devido a perturbações, fazendo desta região um objeto de pesquisas recentes.

Os primeiros estudos aeronômicos relativos a região D polar foram realizados por Bailey (1959). No entanto, a maioria dos dados disponíveis são relativos ao hemisfério norte obtidos do estudo de eventos próton-solares (SPE - "Solar Proton Event").

A distribuição da precipitação de elétrons com energias em torno de 100 keV observada por Seward et al. (1973) está ilustrada na Figura 2.9, esta mostra que a precipitação pode ocorrer até cerca de 70°S, o que inclui a região da Península Antártica (Gledhill, 1986).

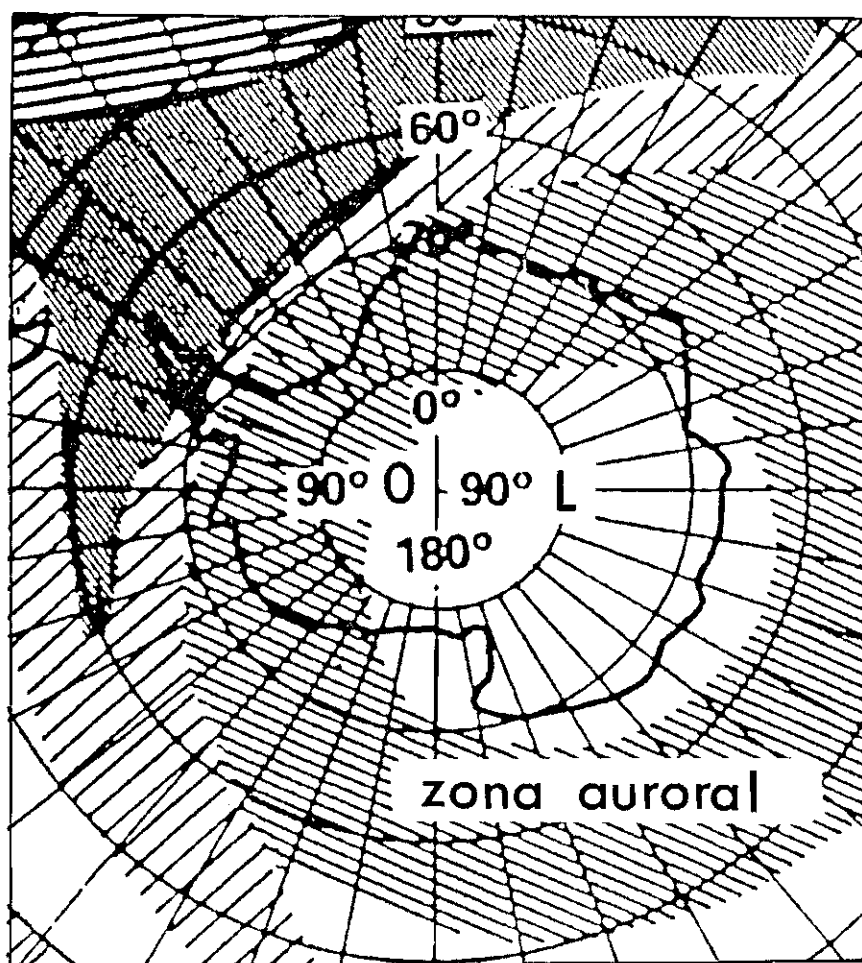


Fig. 2.9 - Distribuição da precipitação de elétrons com energias em torno de 100 KeV na região da Península Antártica.

FONTE: Seward et al., (1973).

Vale ressaltar que não existem trabalhos realizados utilizando a propagação de sinais de VLF com o intuito de se estudar a região D na Península Antártica; somente algumas medidas foram realizadas nas estações de Faraday (UK) e Palmer (USA) localizadas no Continente Antártico, mas não de maneira contínua como ocorreu neste trabalho.

É claro que a região Antártica é uma região única do ponto de vista de distribuição longitudinal da precipitação de partículas e portanto fazem-se necessários mais estudos para elucidar sua complexidade. Em particular medidas do espectro de partículas e especialmente a distribuição do ângulo de passo ajudaria a avaliar a energia depositada na alta atmosfera e os efeitos na transmissão de ondas de rádio devido aos fenômenos ionosféricos consequentes desta precipitação. Dados obtidos no solo, sondas, balões e satélites podem contribuir para o estudo destes efeitos (Gledhill, 1986).

CAPÍTULO 3

PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE VLF NA BAIXA IONOSFERA

3.1 - MODELO IONOSFÉRICO

Um dos métodos experimentais utilizados para se estudar a baixa ionosfera é através da propagação de ondas de rádio em frequências muito baixas (VLF: "Very Low Frequency", 3-30 kHz), que se propagam através do guia de onda Terra-Ionosfera. Um modelo descrevendo convenientemente a propagação neste guia de onda foi desenvolvido por Wait (1962) e Wait e Spies (1964). O modelo considera a superfície terrestre perfeitamente condutora e a ionosfera um meio homogêneo onde a frequência de colisões $\nu(h)$ e a densidade eletrônica $N_e(h)$ variam exponencialmente acima de uma altura de referência h_0 na forma:

$$N_e(h) = N_e(h_0) \exp [b(h-h_0)] \quad (3.1)$$

$$\nu(h) = \nu(h_0) \exp [-a(h-h_0)] \quad (3.2)$$

Para a baixa ionosfera, onde existe uma fraca ionização, pode-se considerar apenas a frequência de colisões entre elétrons e as partículas neutras. Westerlund e Reder (1973) deduziram a variação da frequência de colisões teórica para a baixa ionosfera (50-100 km), dada por:

$$\nu(h) = 1,816 \times 10^{11} \exp (-0,15h) \quad (3.3)$$

Para melhor descrever as características da condutividade da baixa ionosfera define-se o "parâmetro de condutividade" dado por (Wait e Spies, 1964) como sendo:

$$\omega_r = \frac{\omega_0^2}{\nu} \quad (3.4)$$

onde ω_0 é a frequência angular do plasma ionosférico ou seja, $\omega_0^2 = e^2 N_e / (\epsilon_0 m_e)$, e e m_e sendo a carga e massa do elétron, respectivamente e ϵ_0 a permissividade elétrica. Da variação exponencial da frequência de colisões e da densidade eletrônica obtém-se o parâmetro de condutividade em função da altura, que é dado por:

$$\omega_r(h) = \omega_r(h_0) \exp(\beta h) \quad (3.5)$$

onde $\omega_r(h_0) = \omega_0^2 / \nu(h_0)$ e $\beta = b+a$. O parâmetro β é denominado gradiente de condutividade com $[\beta] = \text{km}^{-1}$. De acordo com Wait e Spies (1964), a altura de referência é aquela onde ocorre a reflexão da maior parte da energia transportada pela onda. No estudo da reflexão de ondas em uma ionosfera isotrópica, com distribuição exponencial da concentração eletrônica com a altura, Wait e Walters (1963) obtiveram o parâmetro de condutividade para a altura de referência (h_0), que é igual a:

$$\omega_r(h_0) = 2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$$

A presença do campo magnético terrestre influi nas propriedades elétricas do meio. A atenuação é maior para propagação no sentido de leste para oeste do que para propagação de oeste para leste, (Reder, 1981; Kikuchi, 1983). Esta assimetria é explicada admitindo-se que os sinais de VLF propagam-se no modo transversal magnético (TM) no guia de onda Terra-Ionosfera. Pode-se mostrar então que, em geral, o campo elétrico terá polarização elíptica no plano vertical de propagação. Uma região contendo elétrons livres sujeitos a este campo elétrico e a um campo magnético horizontal transversal terá um índice de refração que depende da direção de propagação. Se ocorrer uma reversão na direção de propagação haverá uma inversão na direção de rotação do campo elétrico (Crombie, 1958). Esta assimetria é tanto maior quanto mais longo for o comprimento de onda utilizado (Reder, 1981).

Para descrever a importância relativa do campo geomagnético na propagação de ondas de VLF na ionosfera utiliza-se o "parâmetro de campo magnético", que é dado por:

$$\Omega = \frac{\omega_T}{\nu(h_0)} \quad (3.6)$$

onde ω_T é a girofrequência angular dos elétrons ($\omega_T = eB/m_e$, onde B é a intensidade do campo magnético, e e m_e a carga e a massa do elétron, respectivamente) supondo que o campo geomagnético seja transversal puro e perpendicular à direção de propagação da onda e a frequência de colisões calculada na altura de referência h_0 . O parâmetro Ω assume os valores positivos e negativos para ondas propagando-se para oeste e para leste respectivamente, e zero para propagação norte-sul.

3.2 - PROPAGAÇÃO NO GUIA DE ONDA TERRA-IONOSFERA

Considerando-se a fonte como uma antena tipo dipolo vertical, situada numa superfície esférica perfeitamente condutora, de raio a igual ao raio terrestre (R_T) e representando a ionosfera por uma camada refletora homogênea de raio $a = R_T + h_0$, como ilustra a Figura 3.1, onde a densidade eletrônica $N_e(h)$ e a frequência de colisões $\nu(h)$ variam exponencialmente com a altura, pode-se obter através da teoria dos modos de propagação o campo elétrico da onda a uma distância d (Wait, 1962).

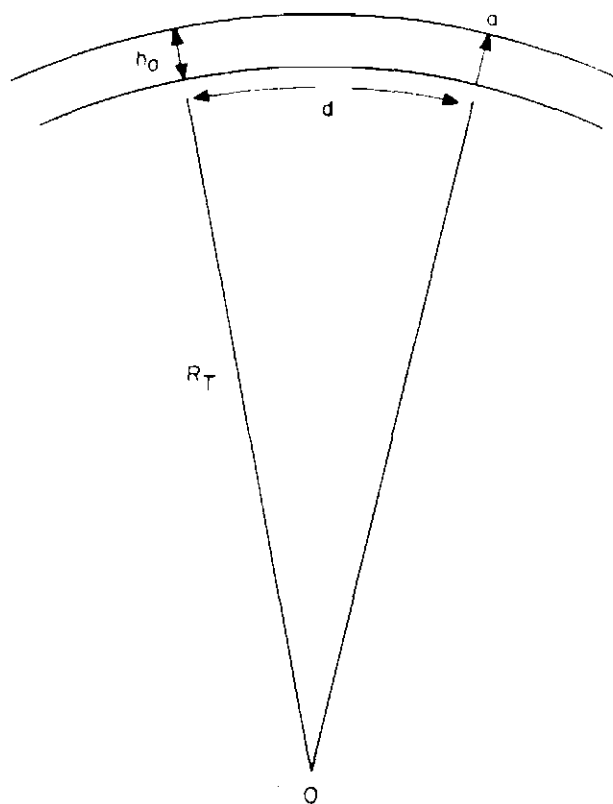


Fig. 3.1 - Elementos do guia de onda Terra-Ionosfera.

Wait e Spies (1964) obtiveram, para diferentes modelos exponenciais e diferentes valores de condutividade do solo, soluções para as equações dos modos de propagação e para os parâmetros de propagação. Wait e Spies (1965a) calcularam os parâmetros de propagação para frequências pares entre 8 e 30 kHz, considerando somente os três primeiros modos de propagação, adotando ainda um perfil ionosférico exponencial com gradientes de condutividade iguais a $0,3$ e $0,5 \text{ km}^{-1}$ nos casos isotrópico e anisotrópico, respectivamente, além de considerar a condutividade do solo $\sigma_S = \infty$ e alturas de referência h_0 de 60, 70, 80 e 90 km. Os mesmos autores obtiveram curvas representando os parâmetros de propagação em função das frequências de VLF para diferentes condutividades do solo e perfis exponenciais (Wait e Spies, 1965b).

Recentemente, Kikuchi (1983, 1986) aplicou a teoria de modos de propagação num guia de onda para explicar as variações diurnas da fase e amplitude de transmissões Omega sobre trajetórias transequatoriais de oeste para leste deduzindo os parâmetros que definem o guia de onda.

O primeiro a explicar a variação noite/dia nas fases dos sinais de VLF foi Wait (1959) com base na teoria dos modos de propagação considerando a reflexividade da ionosfera e a curvatura terrestre. Assim sendo, admitindo-se que a distância entre dois pontos da Terra, com relação à propagação de sinais de VLF, seja a média entre a distância medida na Terra e a distância medida na altura de reflexão, a velocidade de fase para o primeiro modo de propagação é dada por:

$$V_f = c \left[1 - \frac{\lambda^2}{16h^2} \right]^{1/2} \left[1 - \frac{h}{2R_T} \right] \quad (3.7)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, λ é o comprimento de onda do sinal emitido, R_T é o raio médio da Terra e h a altura de reflexão.

Assumindo que o segundo modo de propagação ($n=2$) é mais atenuado que o primeiro modo ($n=1$), durante o dia do que à noite, Kikuchi (1983) obteve a variação diurna de fase ($\Delta\phi$) normalizada sobre a distância, para o primeiro modo ($n=1$), sendo dada por:

$$\frac{\Delta\phi}{d} = \frac{10^4}{3} \left[\frac{c}{V_{n1}} - \frac{c}{V_{D1}} \right] \quad (\mu s/Mm) \quad (3.8)$$

onde $\Delta\phi$ é a variação de fase em μs , d a distância entre o transmissor e receptor em Mm ($1Mm = 1.000km$) e V_{n1} e V_{D1} são as velocidades de fase do primeiro modo durante a noite e durante o dia, respectivamente.

A variação da altura de reflexão (Δh), correspondente a uma variação de fase ($\Delta\phi$) é dada por Wait (1959) como:

$$\Delta\phi = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{1}{2R_T} + \frac{\lambda^2}{16h_0^3} \right] \Delta h \quad (3.9)$$

onde $\Delta\phi$ é a variação de fase em ciclos, h_0 é a altura de referência em km, d é a distância entre o transmissor e o receptor e λ o comprimento de onda, ambos em Mm.

É importante ressaltar que a teoria dos modos de propagação de Wait e Spies (1964) tem sido largamente utilizada para se estudar a propagação de ondas VLF no guia de onda Terra-Ionosfera.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO E DADOS DE PROPAGAÇÃO DE VLF

4.1 - INSTRUMENTAÇÃO

Para as medidas de fase e amplitude dos sinais transmitidos na faixa de VLF utilizou-se receptores TRACOR, modelos 599J e 599K, padrões de frequência e antenas verticais.

Na Estação Antártica Comandante Ferraz, o sistema de recepção era formado por quatro receptores, dois padrões atômicos, dois registradores e três antenas verticais montados como mostra o esquema da Figura 4.1. No Rádio Observatório do Itapetinga o sistema de recepção contava com dois receptores, um padrão atômico e uma antena vertical.

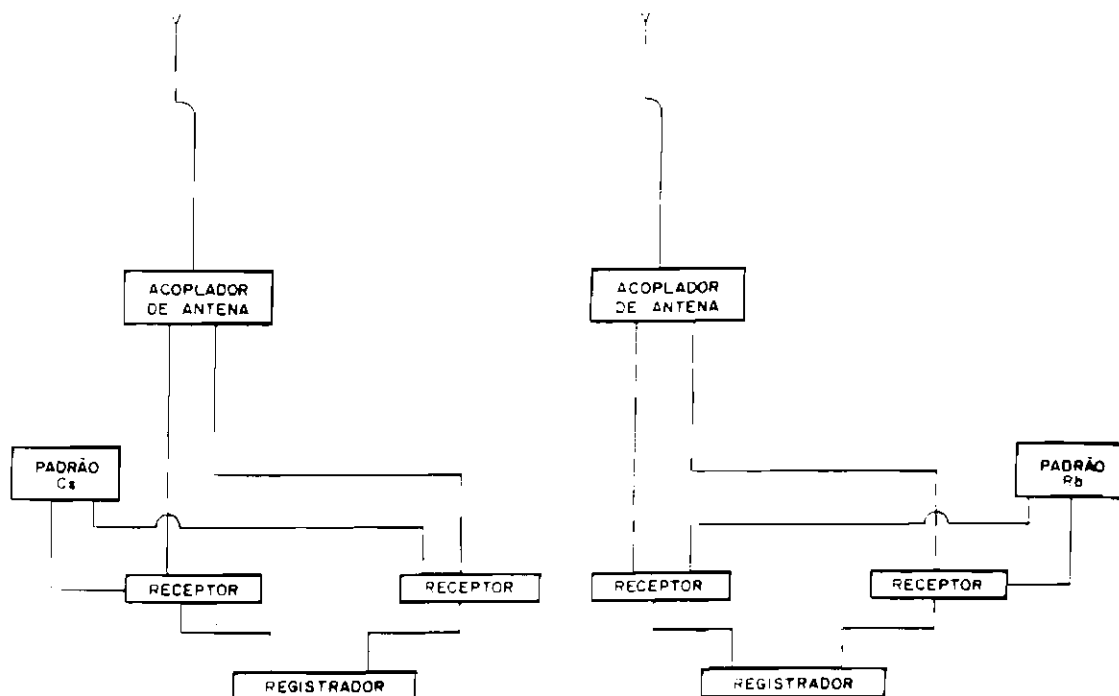


Fig. 4.1 - Esquema do sistema de rastreo montado na Estação Antártica Comandate Ferraz.

4.1.1 - RECEPTORES

Os receptores de VLF são equipamentos que trabalham em frequência na faixa de 3 a 50 kHz, permitindo a medida e registro das variações de fase relativas a um sinal de referência e da amplitude do sinal.

A Figura 4.2 mostra um diagrama simplificado do funcionamento de um receptor de VLF.

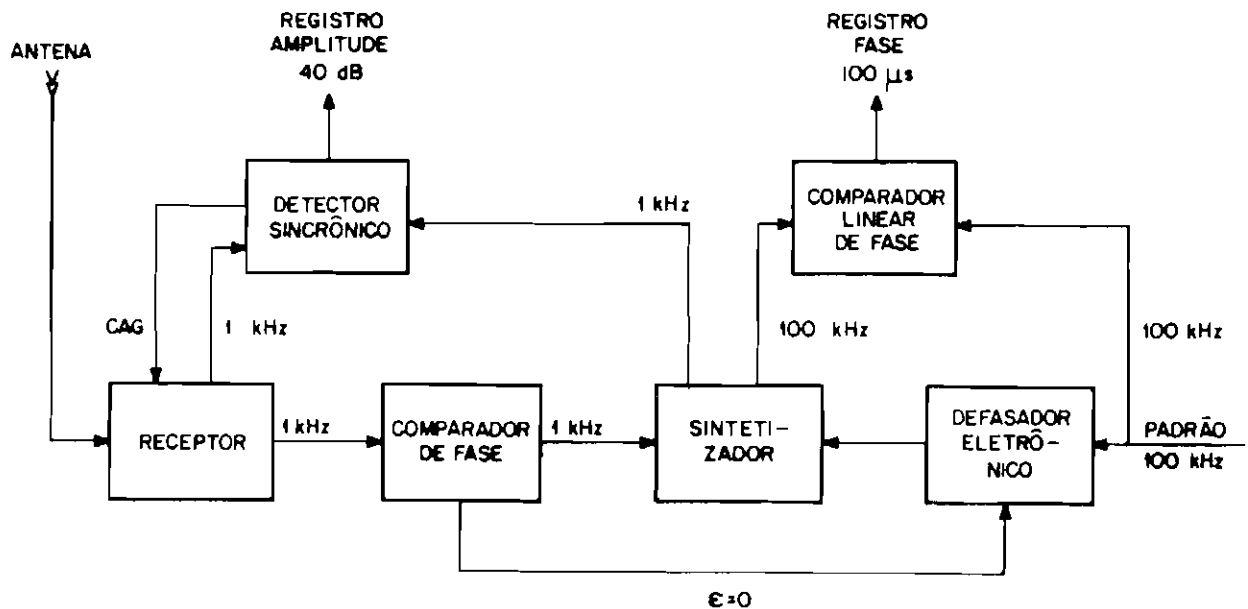


Fig. 4.2 - Diagrama simplificado do funcionamento de um receptor de VLF (ver texto).

O sinal proveniente da antena após sofrer amplificação e filtragem de rádio frequência (RF), é convertido para a frequência intermediária (FI) de 1 kHz (a fase e amplitude da onda original não é alterada nesta conversão). O sinal de FI é novamente amplificado e filtrado e então comparado com 1 kHz do sinal de referência defasado. O comparador de fase fornece um sinal ϵ , proporcional à diferença de fases, que é utilizado para controlar um defasador eletrônico de modo a manter esta diferença nula ($\epsilon = 0$), além de comandar um contador

eletrodinâmico que fixa a defasagem em passos de $0,1 \mu\text{s}$. O sinal após passar pelo defasador é convertido para 100 kHz e comparado com o sinal de referência através de um comparador linear de fase fornecendo a saída para registro na escala de 0 a $100 \mu\text{s}$. O sinal de FI passa também por um detetor síncrono cuja saída aciona o controle automático de ganho (CAG) e este sinal após amplificação, é introduzido em um registrador de amplitude numa escala logarítmica com faixa dinâmica de 40 dB. Um sistema de integração permite a escolha entre diferentes constantes de tempo do circuito controlador da taxa de variação de fase.

4.1.2 - PADRÕES DE FREQUÊNCIA

O sistema de recepção na Antártica contou com um padrão de Césio (padrão primário), com estabilidade de uma parte em $10^{13} \mu\text{s}$ ao dia e um padrão de Rubídio (padrão secundário) com estabilidade de uma parte em $10^{10} \mu\text{s}$ ao dia. No mesmo período o sistema instalado no Rádio observatório utilizou um padrão de Rubídio.

4.1.3 - ANTENAS

As antenas utilizadas nas expedições Antárticas são do tipo vertical, não necessitando de qualquer ajuste para a frequência das estações recebidas.

4.1.4 - REGISTRADOR

Os registradores utilizados possuem entrada para seis canais, quatro deles são utilizados para o registro de fase e amplitude de duas estações e os dois restantes na marcação do pulso de hora. A Figura 4.3 mostra um trecho de registro efetuado durante o período de invernção no dia 18 de junho de 1986.

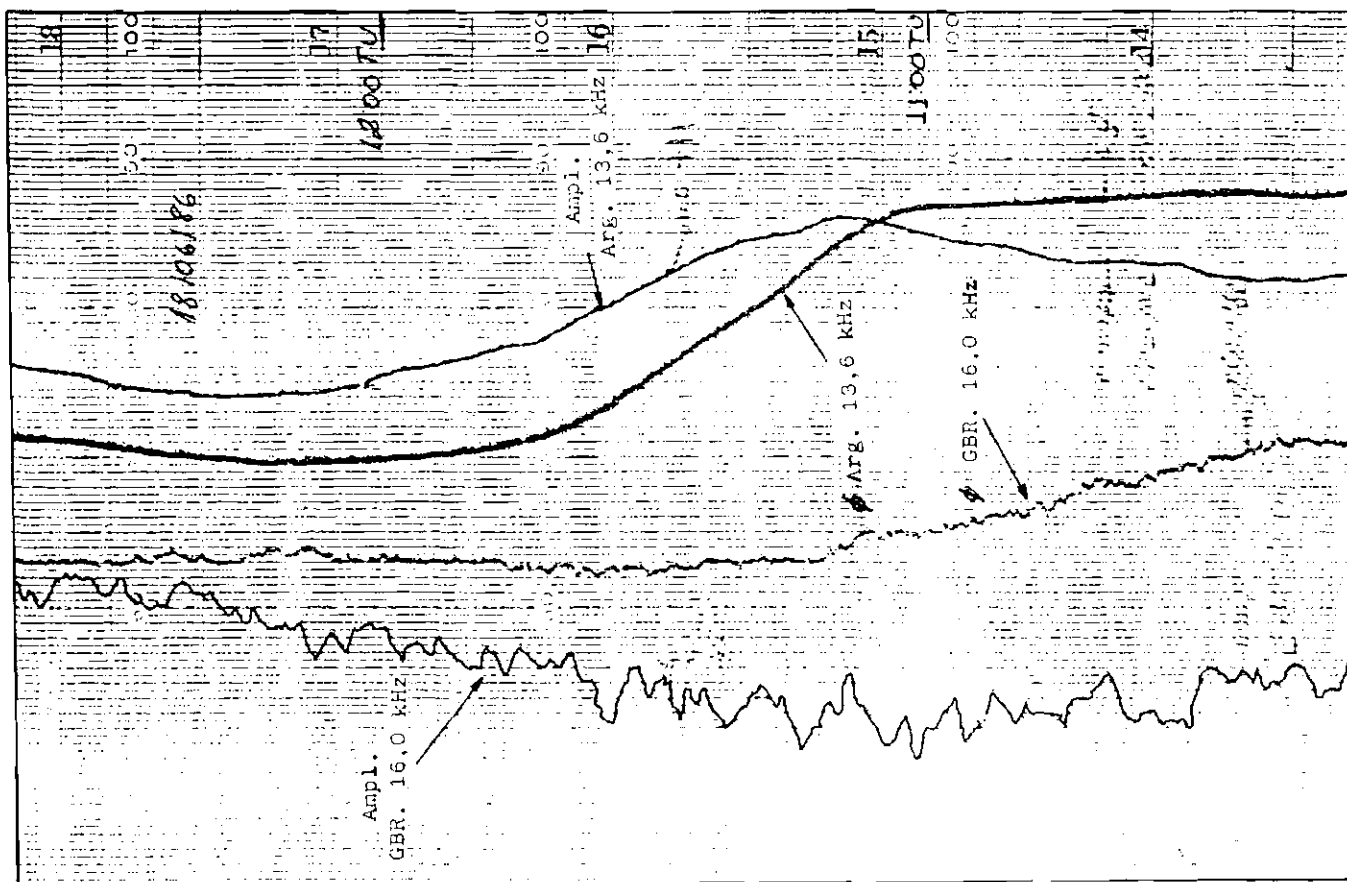


Fig. 4.3 - Trecho de registro efetuado no dia 18/06/86 das 10:15 às 12:30 TU.

As flutuações de fase devido ao ruído são em média da ordem de meia divisão, o que corresponde a $0,5 \mu s$; as flutuações para a amplitude são maiores, chegando a duas divisões, aproximadamente 1 dB.

Devido a não linearidade do amplificador da amplitude de saída, foram realizadas calibrações semanais, dentro do período de maior estabilidade da amplitude. Realizou-se também a verificação da linearidade na escala de fase a cada 15 dias.

4.1.5 - ESTAÇÕES TRANSMISSORAS

As estações rastreadas nas Expedições Antárticas pertencem a rede de rádio comunicação com sinais contínuos e a rede de rádio navegação Omega.

O sistema de navegação Omega compreende uma rede de estações transmissoras de pulsos nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz, em intervalos bem definidos e não coincidentes entre os transmissores.

O sistema divide 10 s em 8 segmentos que duram aproximadamente 0,9 s cada, identificados de A a H, como mostra a Figura 4.4. Cada estação transmite em dois segmentos sucessivos, repetindo-se a cada 10 s. Um mesmo segmento pode ser ocupado por várias estações, mas de frequências diferentes. Na utilização destas frequências para estudos de propagação utiliza-se um comutador Omega sincronizado com a sequência dos segmentos.

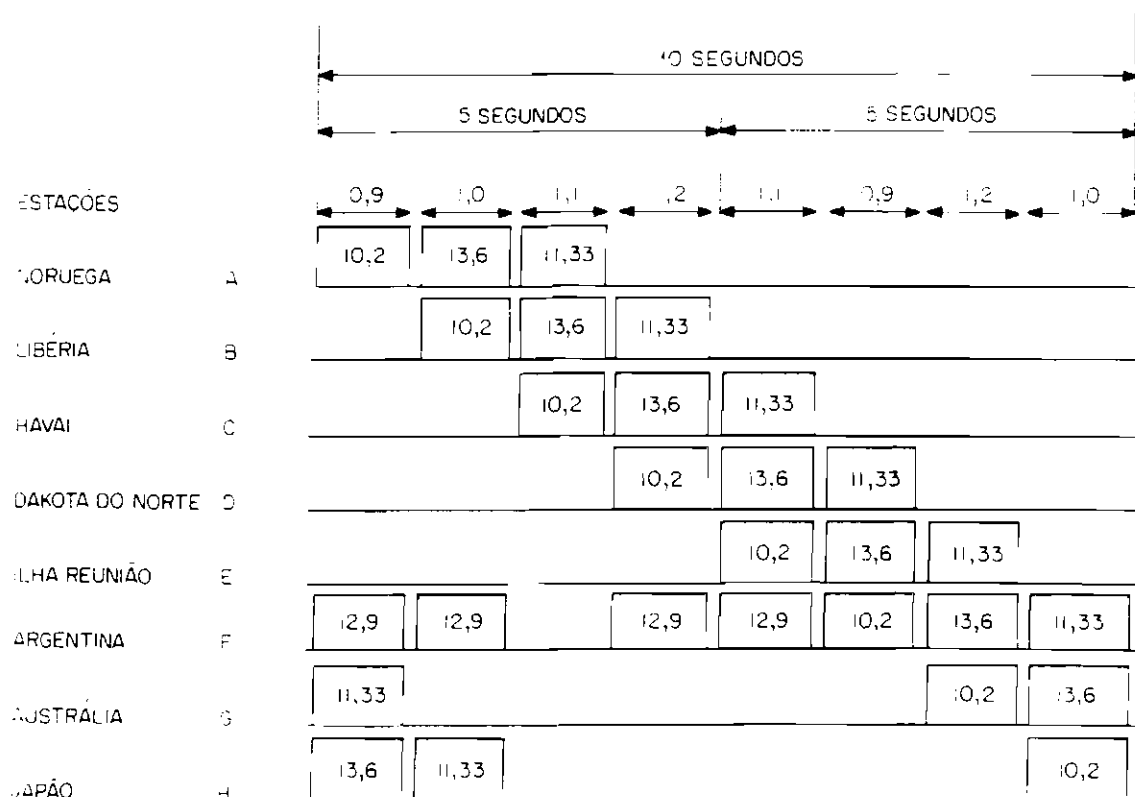


Fig. 4.4 - Distribuição dos segmentos e frequências do sistema Omega.

4.2 - DADOS DE FASE DE SINAIS DE VLF

No presente trabalho utilizaram-se dados de fase de sinais de frequência muito baixa denominados VLF emitidos pela estação Omega Argentina localizada em Golfo Nuevo ($43^{\circ}20'S$; $65^{\circ}30'O$) e recebida simultaneamente na Estação Antártica Comandante Ferraz, Ilha Rei George, Península Antártica ($62^{\circ}05'S$; $58^{\circ}24'O$) e no Rádio Observatório do Itapetinga (ROI), Atibaia, São Paulo, Brasil ($23^{\circ}11'S$; $43^{\circ}33'O$), distantes do transmissor 2,2 e 2,8 Mm, respectivamente. A Figura 4.5 mostra a localização da estação transmissora e os locais de recepção.

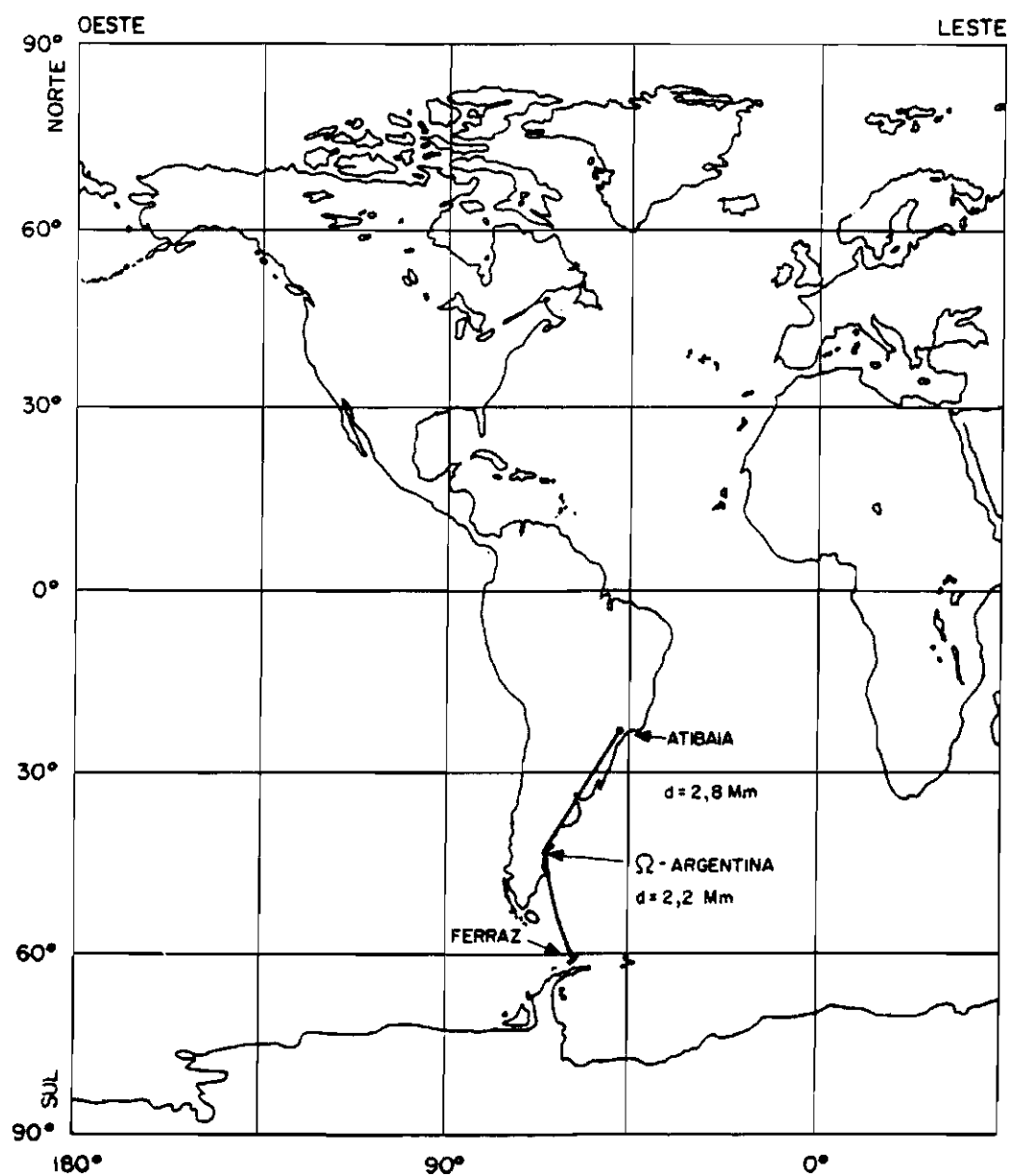


Fig. 4.5 - Mapa identificando a estação transmissora Omega Argentina, Estação Antártica Comandante Ferraz e o Rádio Observatório do Itapetinga - Atibaia/SP.

Na frequência de 13,6 kHz, os dados analisados referem-se aos registros obtidos nas expedições de verão de 1984, 1986 e 1987 e durante a primeira expedição de inverno em 1986 na Estação Antártica Comandante Ferraz e no Rádio Observatório do Itapetinga, com leituras efetuadas com 15 minutos de intervalo. No período de fevereiro de 1986 a março de 1987 concluiu-se um ano de registros contínuos do transmissor Omega Argentina na frequência de 13,6 kHz em ambos os locais de recepção. Na frequência de 10,2 kHz o mesmo sinal foi registrado nos seguintes períodos: 23/4 a 20/5, 10/08 a 25/08, 10/09 a 25/09 nos dois locais, e 19/02 a 4/3 e 9/12 a 22/12 somente na Estação Antártica Comandante Ferraz.

Deve-se salientar que durante o ano de 1986 o padrão de frequência do ROI apresentou variações chegando a afetar o registro da fase em vários períodos, necessitando de correções frequentes.

4.2.1 - CÁLCULO DA ILUMINAÇÃO DO TRAJETO

A partir de vários pontos selecionados de cada trajetória, da ascensão reta e declinação solar, um programa computacional calcula para uma certa data e hora a distância zenital solar média ($\bar{x}$), a $\overline{\sec x}$ e $\ln(\overline{\sec x})$ ao longo da trajetória.

4.2.2 - CÁLCULO DO HORÁRIO DO AMANHECER E DO ANOITECER

Através das coordenadas geográficas do transmissor e dos receptores e das coordenadas solares (declinação e ascensão reta) calcula-se a hora do amanhecer e do anoitecer nos locais de transmissão e de recepção.

O início do nascer do Sol é adotado quando a distância zenital está a 95° , o que ocorre quando os raios solares atingem a altitude de 90 km, tangenciando a camada

de ozônio a 30 km de altitude (Cardoso, 1979). Procedimento análogo é adotado para o ocaso.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Com o objetivo de evidenciar as diferenças observadas entre um trajeto de propagação localizado em latitudes médias (Argentina-Atibaia) praticamente todo dentro da SAGA e um trajeto sub-Antártico (Argentina-Ferraz) somente com uma parte de sua trajetória na região da Anomalia, faz-se uma descrição sucinta do comportamento de fase para os ambos, nos períodos de inverno e verão na frequência 13,6 kHz.

A média mensal da variação da fase foi calculada selecionando-se dias cuja $\Sigma K_p < 14$ para excluir os possíveis efeitos da atividade solar, bem como dias que apresentassem efeitos de explosões solares.

Como exemplos representativos do comportamento de fase obtidos no período de inverno, a Figura 5.1 apresenta a variação de fase relativa para o dia 15 de junho de 1986: (a) na trajetória Argentina-Ferraz e (b) na trajetória Argentina-Atibaia.

Para o trajeto de propagação Argentina-Ferraz a Figura 5.1(a) mostra um exemplo típico de condições quiescentes com uma variação noite-dia de 24,0 μ s, pouco acima da média mensal ($21,0 \pm 1,0 \mu$ s). O registro de fase durante o período diurno, em que o trajeto está totalmente iluminado mostra uma resposta bastante regular da ionosfera, característica que será analisada na sequência deste trabalho. O máximo de iluminação no trajeto ocorre por volta das 16:00 TU. Não se observa a existência de interferência modal (Lynn, 1977; Kikuchi, 1986), tanto no amanhecer como no anoitecer, bem como efeito de camada C

(Kuntz, 1987). Também são mostrados os horários do amanhecer, ocorrendo primeiro no transmissor (AT) e terminando no receptor (AR) e o pôr do Sol, iniciando no receptor (PR) e terminando no transmissor (PT).

No trajeto Argentina-Atibaia (Figura 5.1(b)) o período noturno mostra-se mais perturbado que o observado no trajeto anterior. Observa-se que durante o amanhecer a taxa de variação de fase é diferente nos dois casos, mostrando o efeito da posição geográfica do receptor com relação à linha do amanhecer. O trajeto apresenta efeito de camada C, caracterizado por um avanço de fase logo após o término do amanhecer, seguido por uma lenta recuperação. O nível diurno da fase apresenta uma variação relativa maior entre o término do amanhecer e o máximo de iluminação, que ocorre às 15:35 TU. O mesmo efeito ocorre no período após a iluminação máxima; a variação de fase diurna para este trajeto é de $21,0 \mu s$, dentro do erro da média mensal ($19,0 \pm 2,5 \mu s$). Nesta trajetória, o amanhecer se inicia primeiro no receptor (AR) e termina no transmissor (AT), o pôr do Sol tem início no transmissor e término no receptor (PT).

A comparação entre os dois trajetos de propagação mostra que a trajetória Argentina-Atibaia apresenta-se mais perturbada em relação à trajetória Argentina-Ferraz. Tal comportamento pode estar relacionado à existência da SAGA, uma vez que o trajeto Argentina-Atibaia se situa totalmente dentro dela, sofrendo os efeitos de precipitação de partículas que ocorre nesta região. A trajetória Argentina-Atibaia mostra também uma variação relativa maior entre o período de pós-amanhecer até o máximo de iluminação, bem como no período que se segue a este máximo. Este comportamento pode estar evidenciando uma sensibilidade maior da ionosfera relativamente a distância zenital solar para este trajeto do que para o trajeto Argentina-Ferraz.

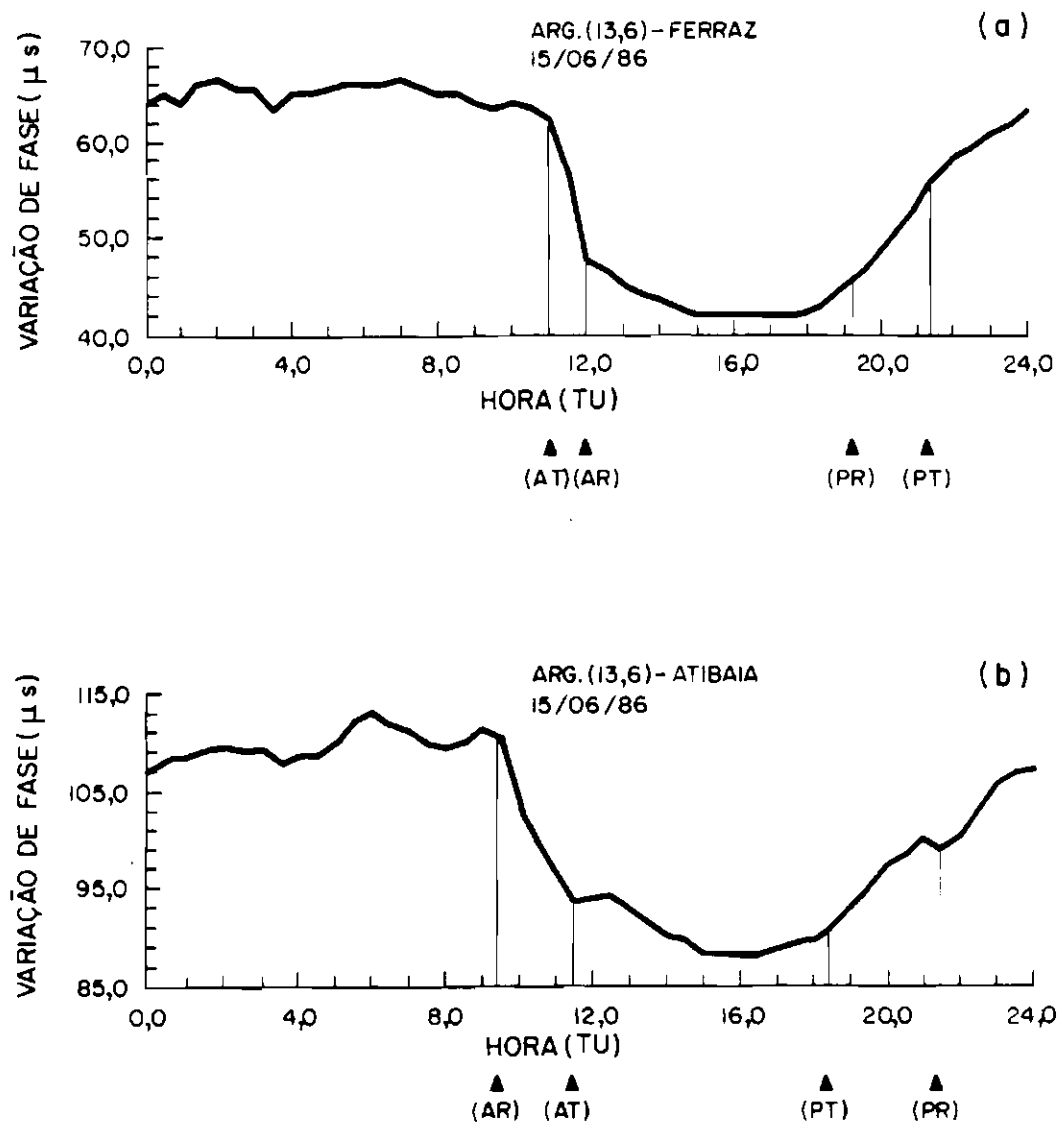


Fig. 5.1 - Comportamento diurno de fase obtido em 15/06/86, para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia. Os símbolos AR, AT, PR e PT representam os horários de início e fim do amanhecer, e início e fim do anoitecer, respectivamente.

Para avaliar as variações sazonais que os dois trajetos podem apresentar, a Figura 5.2 ilustra a variação diurna de fase para: a) o trajeto de propagação Argentina-Ferraz e b) Argentina-Atibaia no dia 30 de janeiro de 1987, um dia selecionado como exemplo do comportamento da variação de fase observada no período de verão, nesta também são mostrados os horários de amanhecer e anoitecer nos locais de transmissão e recepção.

O comportamento diurno da fase para o trajeto Argentina-Ferraz mostra a nítida influência da posição geográfica do receptor, com um longo período de iluminação do trajeto. O período noturno mostra-se bastante reduzido, ocorrendo entre 00:20 TU e 06:30 TU, praticamente não ocorrendo variação durante o dia. Observa-se a existência do efeito de camada C, que surge devido a posição da linha do amanhecer em relação ao trajeto de propagação (Abdu et al., 1973; Kuntz, 1987). A variação noite-dia é de $23,0 \mu s$, inferior à média mensal ($27,5 \pm 2,5 \mu s$). Este baixo valor pode ser explicado quando se observa o alto índice K_p apresentado pelos dias anteriores, indicando uma certa atividade magnética.

Para o trajeto de propagação Argentina-Atibaia observa-se um aumento do período iluminado, porém inferior ao apresentado pelo trajeto Argentina-Ferraz. A fase durante este período mostra-se mais irregular com a variação da distância zenital, com o ponto de máxima iluminação mais nítido que no trajeto Argentina-Ferraz. Neste caso também o trajeto apresenta um pronunciado efeito de camada C, o que é questionável em razão da proximidade de dias com alto índice magnético. A variação noite-dia é de $24,5 \mu s$, dentro do valor médio mensal ($23,5 \pm 2,5 \mu s$).

Concluindo estas observações sobre os dois trajetos estudados para os mesmos dias no inverno e no verão, nota-se que, em relação à iluminação solar, a

trajetória Argentina-Atibaia mostra-se mais sensível. A influência da posição geográfica é mais pronunciada no registro obtido em Ferraz. Durante o verão a ionosfera sobre o trajeto Argentina-Ferraz atinge o equilíbrio fotoquímico mais rapidamente que sobre o trajeto Argentina-Atibaia.

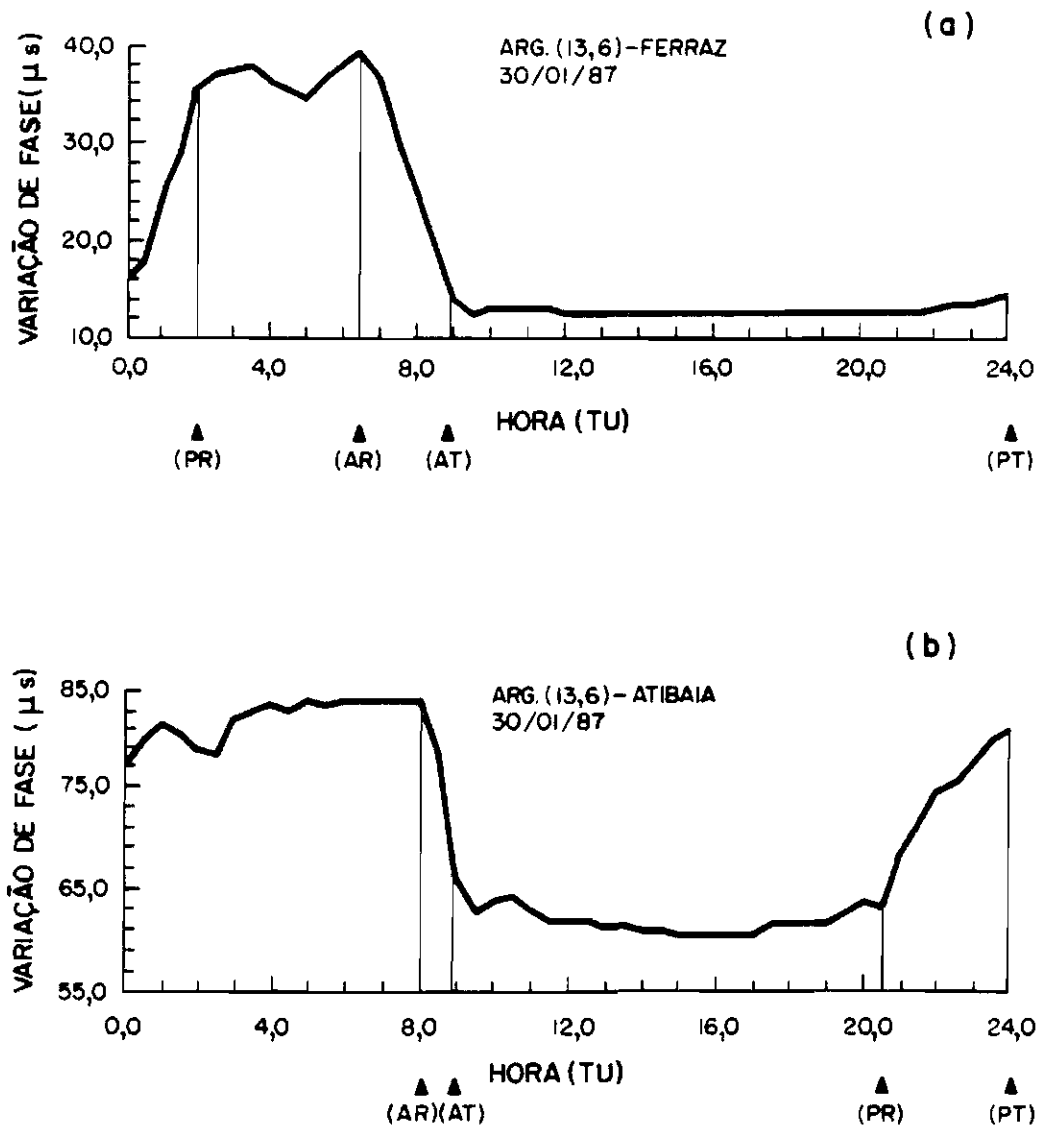


Fig. 5.2 - Comportamento diurno de fase obtido em 30/01/87, para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia. Os símbolos AR, AT, PR e PT representam os horários de início e fim do amanhecer, e início e fim do anoitecer, respectivamente.

5.2 - RESULTADOS DECORRENTES DA VARIAÇÃO DE FASE COM A ILUMINAÇÃO DO TRAJETO

A teoria que relaciona a interação da radiação solar com a atmosfera terrestre foi inicialmente desenvolvida por Chapman (1931). Esta teoria assume uma atmosfera estratificada horizontalmente, onde a escala de altura H ($H = kT/mg$, onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura, m a massa individual das moléculas do gás e g a aceleração da gravidade) não varia com a altitude e composição química e é ionizada por uma radiação monocromática de origem solar. A altura h do máximo de ionização em função do distância zenital solar é dada por (Chapman, 1931; Chilton et al., 1964b):

$$h(\chi) = h_0 + H \ln \sec \chi \quad (5.1)$$

Analisando registros de fase de sinais de VLF no trajeto GBR-Tananarive em 16,0 kHz para períodos calmos, Comarmond (1977), mostra que a fase varia linearmente em função do $\ln \sec \chi$ na forma:

$$\delta\phi = \delta\phi_0 + F \ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m}) \quad (5.2)$$

onde $\delta\phi = \phi - \phi_m$ é a diferença entre a fase no decorrer do dia (ϕ) e a fase no máximo de iluminação do trajeto (ϕ_m), $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ é a medida de iluminação média ao longo do trajeto, $\delta\phi_0$ é a constante do ajuste linear e F é o coeficiente angular da reta. Analisando os resultados obtidos por Comarmond (1977), observou-se que o coeficiente de regressão linear da variação de fase em função de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ é melhor para a parte pós-iluminação máxima do trajeto do que para antes do máximo de iluminação. Notou-se também que o coeficiente angular das retas de melhor ajuste dos desvios de fase em função de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ sofre variações durante o ano.

Neste trabalho faz-se o mesmo estudo de Comarmond para os registros de fase nos trajetos Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia na frequência de 13,6 kHz no período de março de 1986 a fevereiro de 1987.

Os desvios de fase são calculados a partir da leitura dos valores de fase a cada 15 minutos. Na seleção dos dias foram excluídos aqueles em que ocorreram explosões solares, tempestades magnéticas, ruído ou falha de equipamento. Os dados coletados permitiram, através da utilização de um programa computacional, calcular o valor de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ ao longo da trajetória.

Para o trajeto Argentina-Ferraz foram selecionados trinta e seis dias com fase estável, para os quais foram calculados o coeficiente de correlação da regressão linear da variação de fase em função de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$. Em todos os casos observou-se um coeficiente superior a 0,97. Trinta e um dias mostraram um coeficiente de correlação para o período pós-iluminação máxima superior ao de pré-iluminação máxima. Os meses de abril a setembro apresentam melhor coeficiente de correlação do que aqueles obtidos de outubro a fevereiro. Uma amostra das regressões obtidas dos valores de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ em função de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ e a curva que melhor se ajusta aos dados podem ser observadas através da Figura 5.3 que mostra as regressões para o período pós-iluminação máxima nos dias 21/4/86, 21/05/86, 08/06/86 e 14/07/86.

Para o trajeto Argentina-Atibaia foram selecionados trinta e dois dias no mesmo período, com estabilidade de fase. Destes, vinte e quatro dias apresentaram o coeficiente de correlação para o período pós-iluminação máxima superior ao de pré-iluminação máxima. O coeficiente de correlação para a maior parte dos dias foi superior a 0,98.

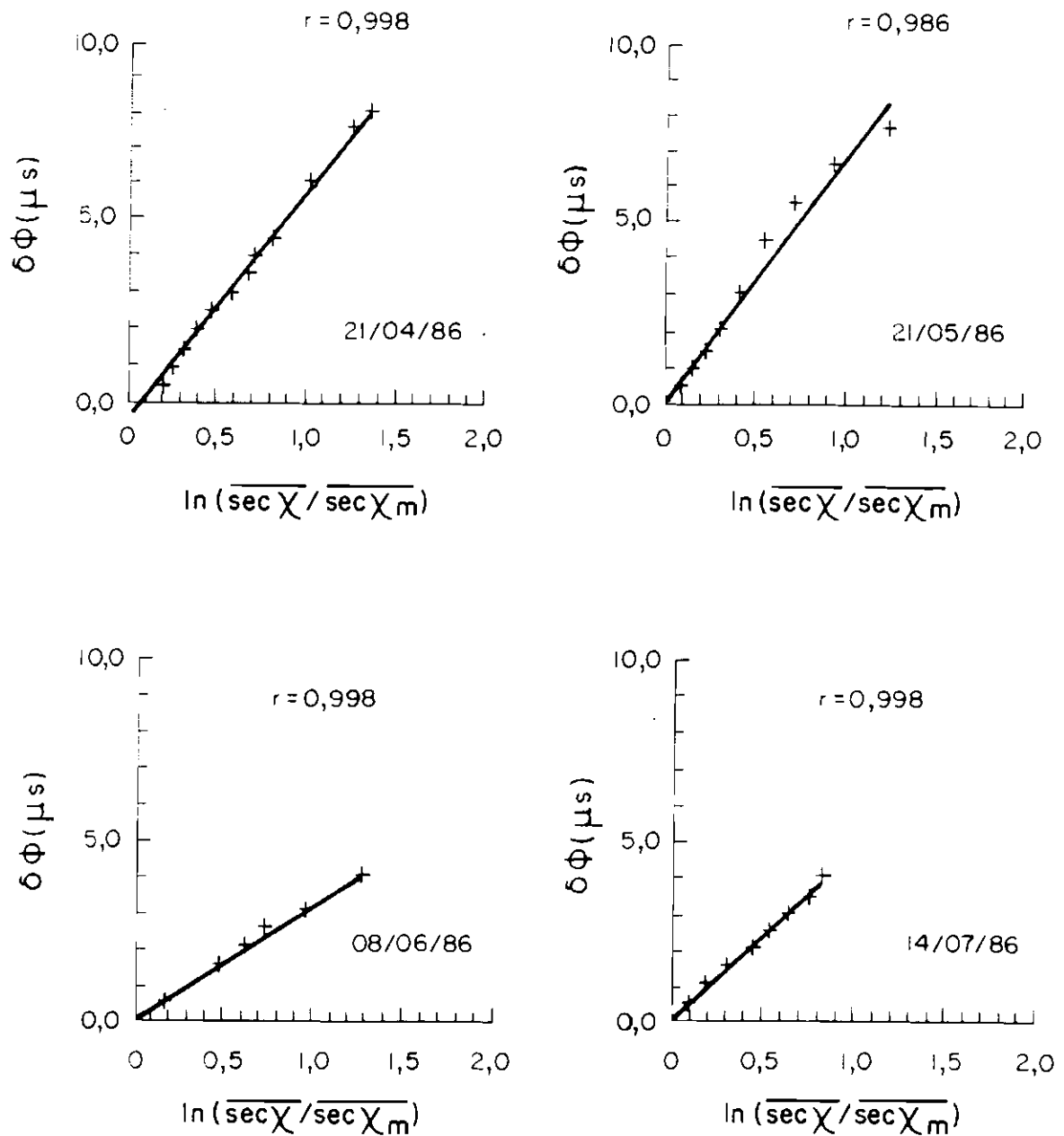


Fig. 5.3 - Desvios de fase pós-iluminação máxima em função de $\ln(\sec \chi / \sec \chi_m)$ obtidos para o trajeto Argentina-Ferraz. A reta representa o melhor ajuste dos dados.

A Figura 5.4 referente ao trajeto Argentina-Atibaia mostra as regressões lineares do desvio de fase ($\delta\phi$) em função de $\ln (\overline{\sec\chi}/\overline{\sec\chi_m})$ e a curva que melhor se ajusta aos dados para os dias 01/05/86, 14/06/86, 25/07/86 e 23/08/86.

Segundo Comarmond (1977) é necessário introduzir um tempo de relaxação ionosférico para um melhor ajuste da reta de regressão linear para o período de pré-iluminação máxima e para os maiores valores do período de pós-iluminação máxima.

Entretanto, neste trabalho, os altos valores encontrados para os coeficientes de correlação da regressão linear, seja para o trajeto de propagação sub-Antártico (Argentina-Ferraz) como para o trajeto em médias latitudes (Argentina-Atibaia) mostram que não se faz necessário a introdução desse parâmetro.

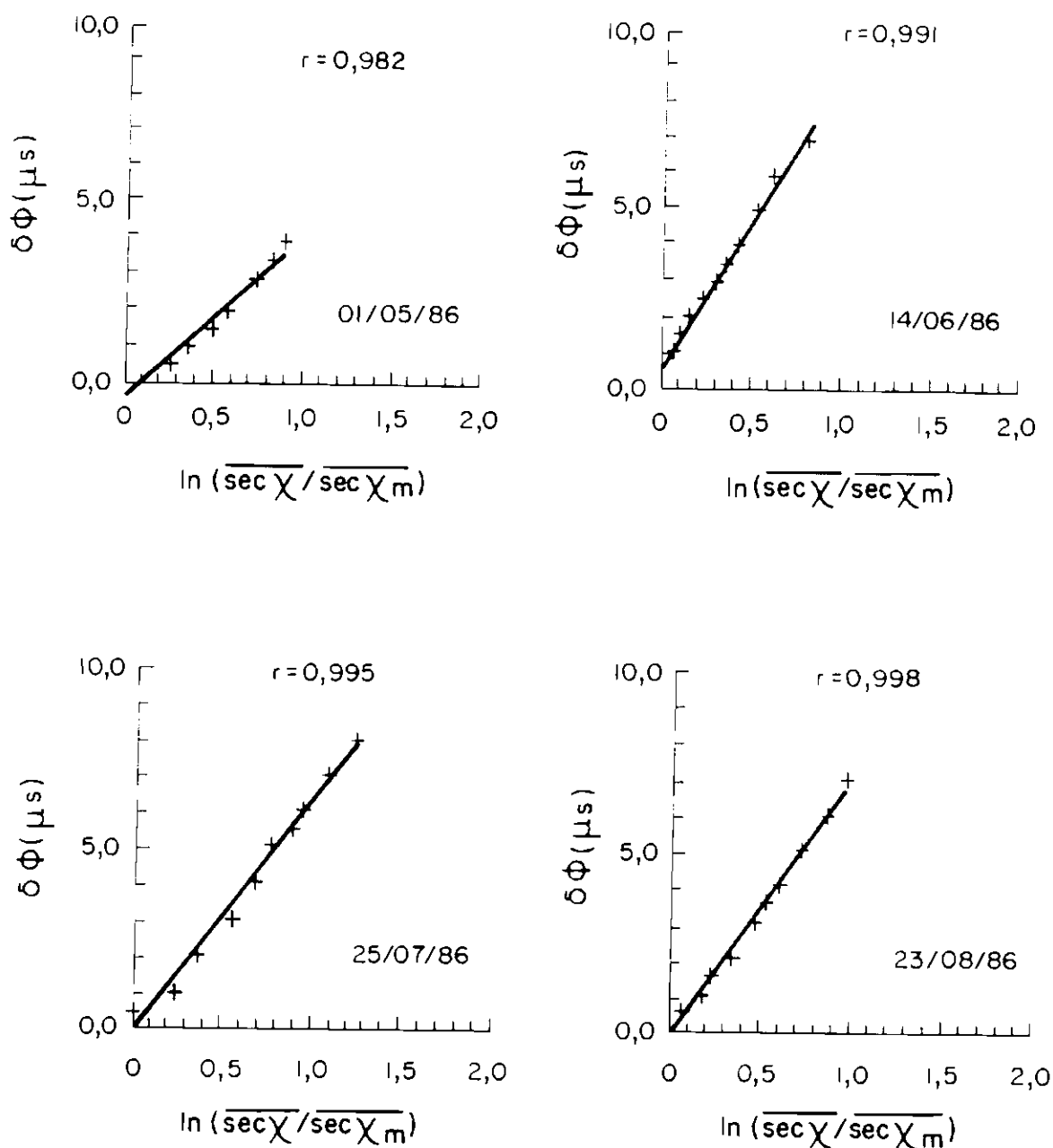


Fig. 5.4 - Desvios de fase pós-iluminação máxima em função de $\ln(\overline{\sec\chi}/\overline{\sec\chi_m})$ obtidos para o trajeto Argentina-Atibaia. A reta representa o melhor ajuste dos dados.

5.2.1 - VARIAÇÃO SAZONAL DO COEFICIENTE ANGULAR F DA
EQUAÇÃO 5.2 PARA O PERÍODO PÓS-ILUMINAÇÃO MÁXIMA
(F_{pm})

A partir dos trinta e um dias para trajeto Argentina Ferraz e vinte e quatro para o trajeto Argentina-Atibaia obtidos no item anterior, calculou-se as médias mensais dos coeficientes angulares das retas de melhor ajuste obtidas, que são mostradas na Figura 5.5(a) e (b), respectivamente.

Pode-se observar algumas características marcantes nas variações apresentadas pelos dois trajetos. O decréscimo gradual dos valores dos coeficientes F_{pm} dos meses de inverno para os meses de verão em ambos os trajetos, evidenciam uma relação com o tempo de duração do dia. Apesar da variação relativa desses coeficientes não diferir entre os dois trajetos, a trajetória Argentina-Atibaia apresenta valores na sua maioria superiores aos obtidos para a trajetória Argentina-Ferraz. Enquanto os valores para o trajeto Argentina-Ferraz mostram uma certa linearidade no seu decréscimo, a trajetória Argentina-Atibaia é bastante irregular ao longo do ano.

Na Figura 5.6 está ilustrada a variação anual do coeficiente angular da retas regressão linear encontrado por Comarmond (1977) para o trajeto GBR-Tananarive. Observam-se nítidas variações semi-anuais, com mínimos em abril e outubro, o que não é observado nos dados aqui apresentados. Deve-se salientar que aquele é um trajeto transequatorial, e portanto sofre efeitos da sazonalidade dos dois hemisférios, enquanto que os trajetos aqui analisados estão todos localizados no hemisfério sul.

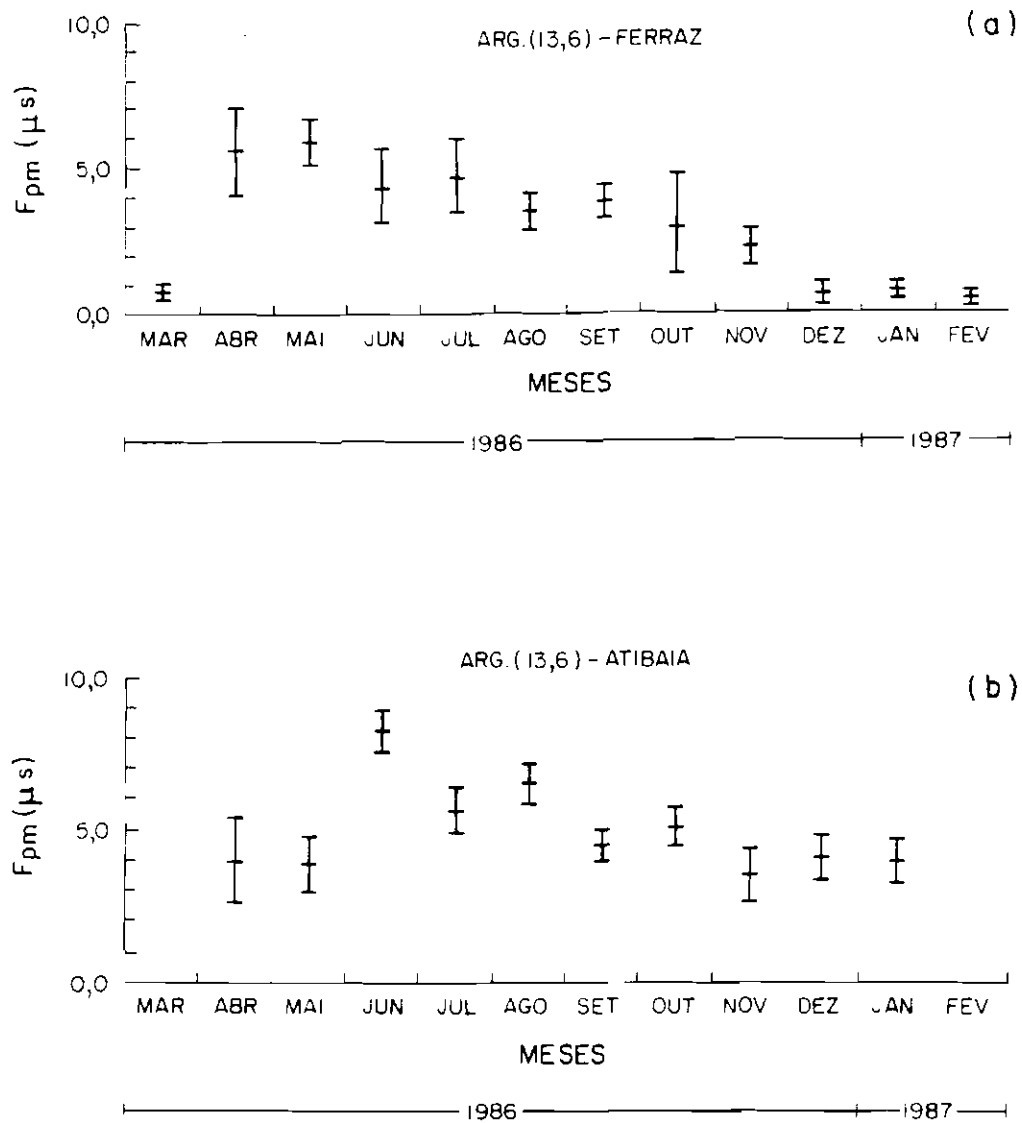


Fig. 5.5 - Médias mensais do coeficiente angular da reta (F_{pm}) para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia. As médias referem-se ao período de março de 86 à fevereiro de 87.

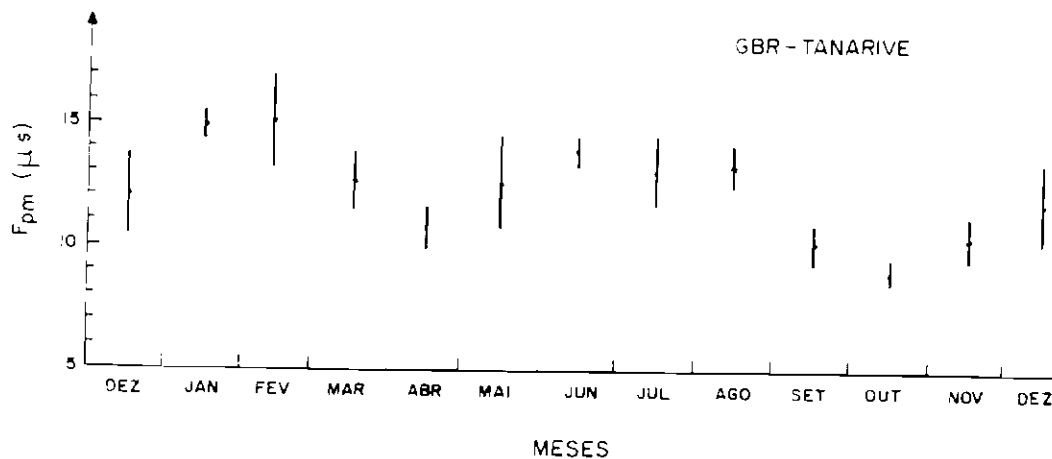


Fig. 5.6 - Variação anual das médias mensais do coeficiente angular das retas de regressão linear para o trajeto GBR.-Tananarive.

FONTE: Commarmond (1977), p. 77.

Uma avaliação dos possíveis mecanismos que atuam na variação anual do coeficiente angular da reta de regressão pode ser obtida a partir da equação de balanço de ionização (Comarmond, 1977). No equilíbrio fotoquímico, com a taxa de produção de íons igual à taxa de perdas, a equação do balanço de ionização fica:

$$q = L$$

Nas altitudes da região D a taxa de produção de elétrons $q(h,t)$ deve-se à radiação solar $q_s[h, \chi(t)]$ e a radiação cósmica galáctica $q_c(h)$, o que resulta:

$$q(h,t) = q_s[h, \chi(t)] + q_c(h) \quad (5.3)$$

A radiação cósmica pode ser considerada como constante durante o dia. Assim as variações observadas estariam relacionadas à taxa de produção de íons pela radiação solar, que depende da densidade dos constituintes minoritários, principalmente NO e O, principais responsáveis pela produção de elétrons na região D. No entanto, não há dados disponíveis da concentração destes gases minoritários para a região dos trajetos de propagação estudados. Deve-se também considerar a influência da atmosfera neutra, uma vez que o coeficiente de recombinação efetivo está relacionado com a química dos íons positivos, que por sua vez depende de parâmetros meteorológicos (Danilov e Simonov, 1982).

5.2.2 - VARIAÇÃO SAZONAL DO COEFICIENTE ANGULAR F DA EQUAÇÃO 5.2 PARA O PERÍODO DE PRÉ-ILUMINAÇÃO MÁXIMA (F_{am})

Para o período de pré-iluminação máxima é calculado o coeficiente de correlação e coeficiente angular da reta de melhor ajuste dos desvios de fase em relação ao máximo de iluminação em função de $\ln (\overline{\sec X} / \overline{\sec X_m})$, para os mesmos dias considerados no estudo do período pós-iluminação máxima nas duas trajetórias.

Na Figura 5.7 apresenta-se os desvios de fase em função do $\ln (\overline{\sec X} / \overline{\sec X_m})$ para o período de pré-iluminação máxima, para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia, respectivamente. A reta é a que melhor ajusta os dados. Os coeficientes de correlação linear apresentam grandes variações (entre $r=0,77$ a $r=0,99$).

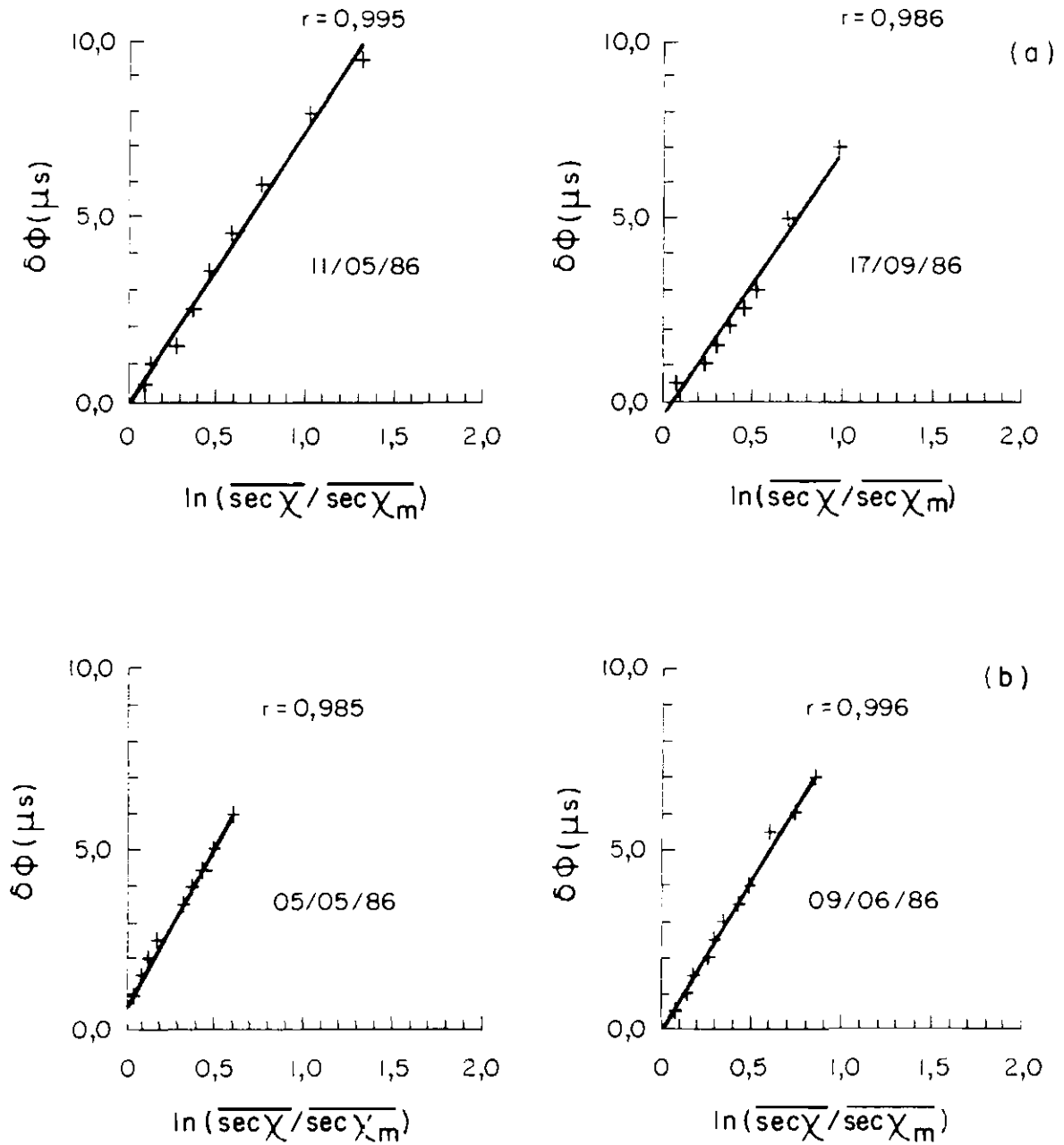


Fig. 5.7 - Desvio de fase pré-iluminação máxima em função de $\ln(\sec\chi/\sec\chi_m)$, obtidos para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia. A reta representa o melhor ajuste dos dados.

A Figura 5.8(a) e (b) ilustra as médias mensais dos coeficientes angulares das retas de melhor ajuste para o período de pré-iluminação máxima obtidas para os trajetos Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia, respectivamente. considerou-se apenas dias com coeficientes de correlação superior a 0,90.

Apesar de mostrarem erro padrão maior nas médias mensais no período de inverno, estas seguem a tendência observada nos valores para pós-iluminação máxima. Nota-se ainda que as médias têm desvios menores no verão e seguem o mesmo comportamento observado no período de pós-iluminação máxima. Os baixos valores de coeficientes obtidos principalmente para os meses de inverno, evidenciam que outros parâmetros podem estar agindo na ionosfera tais como: efeito de camada C, precipitação de partículas, influência da atmosfera neutra.

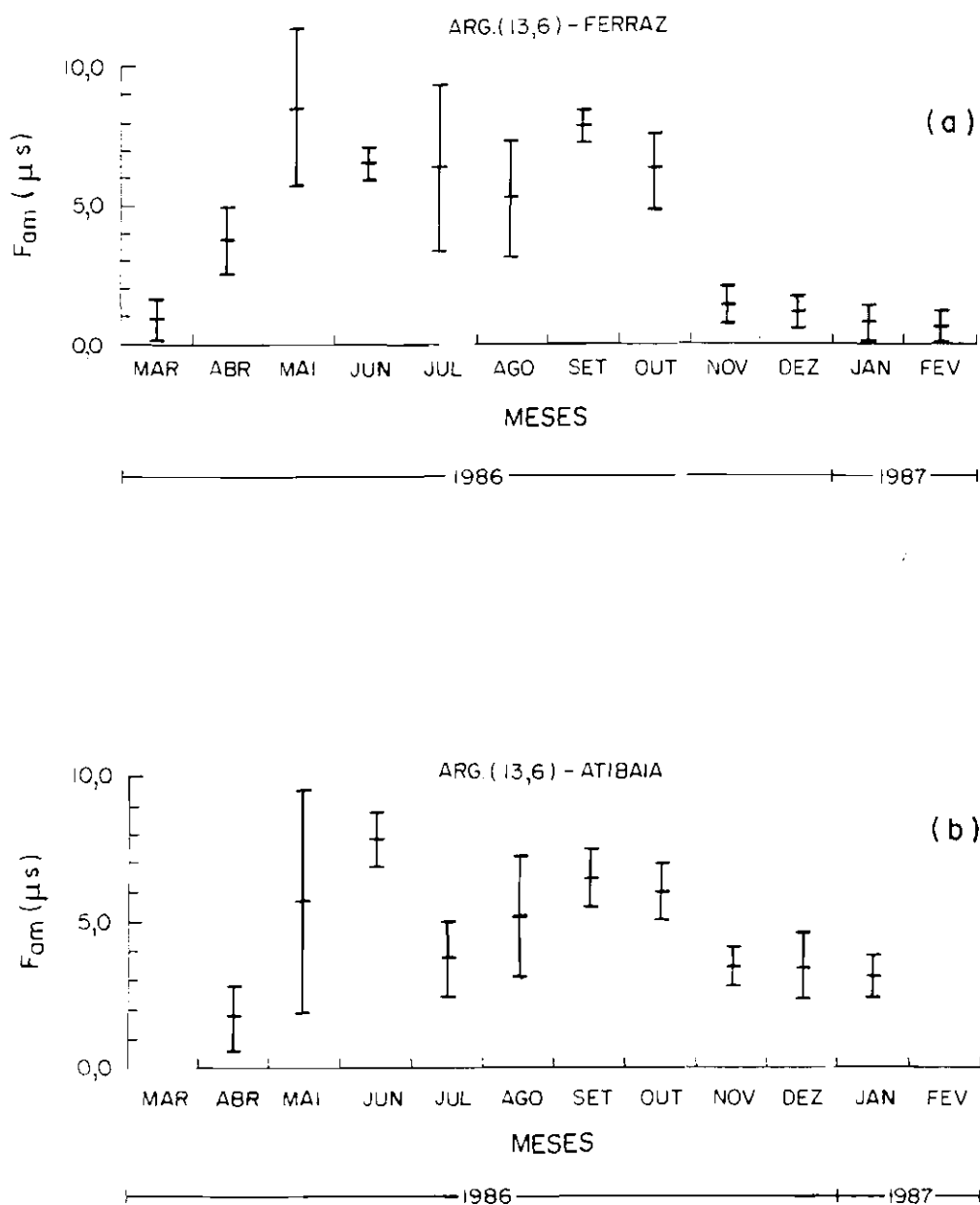


Fig. 5.8 - Médias mensais do coeficiente angular da reta (F_{am}) para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia. A reta ajusta a variação dos desvios de fase em função de $\ln (\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$ para o período de pre-iluminação máxima.

5.3 - ESTUDO DA VARIAÇÃO DA ALTURA DE REFLEXÃO DOS SINAIS DE VLF ATRAVÉS DA VARIAÇÃO DIURNA DE FASE

No estudo da variação da altura de reflexão dos sinais de VLF utilizou-se dados de fase dos trajetos Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia na frequência de 13,6 kHz durante o período de março de 1986 a fevereiro de 1987.

5.3.1 - COMPORTAMENTO ANUAL DA VARIAÇÃO DIURNA DE FASE

Para o cálculo da variação diurna de fase foram selecionados dias em que não ocorreram explosões solares e com índice magnético $\Sigma K_p \leq 14$ (Solar Geophysical Data, 1986, 1987) de maneira a eliminar fenômenos que poderiam, em princípio, perturbar o comportamento diurno da fase. Dos quinhentos e cinco dias inicialmente coletados, após a seleção restaram duzentos e cinquenta e dois.

A partir dos duzentos e cinquenta e dois dias resultantes da seleção, é calculada a diferença relativa de fase entre o período diurno mais estável, que ocorre por volta das 16:00 TU, e o período em que a trajetória está totalmente obscurecida (04:00 TU), para os dois trajetos.

As médias mensais da variação diurna de fase normalizadas pela distância entre o transmissor e o receptor e a variação do co-seno da distância zenital solar média ($\overline{\cos X}$) obtidos para os trajetos (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia são apresentados na Figura 5.9. Da comparação entre os valores do $\overline{\cos X}$ nos dois trajetos, nota-se que na trajetória Argentina-Ferraz a variação anual é mais pronunciada, porém no verão é inferior à do trajeto Argentina-Atibaia.

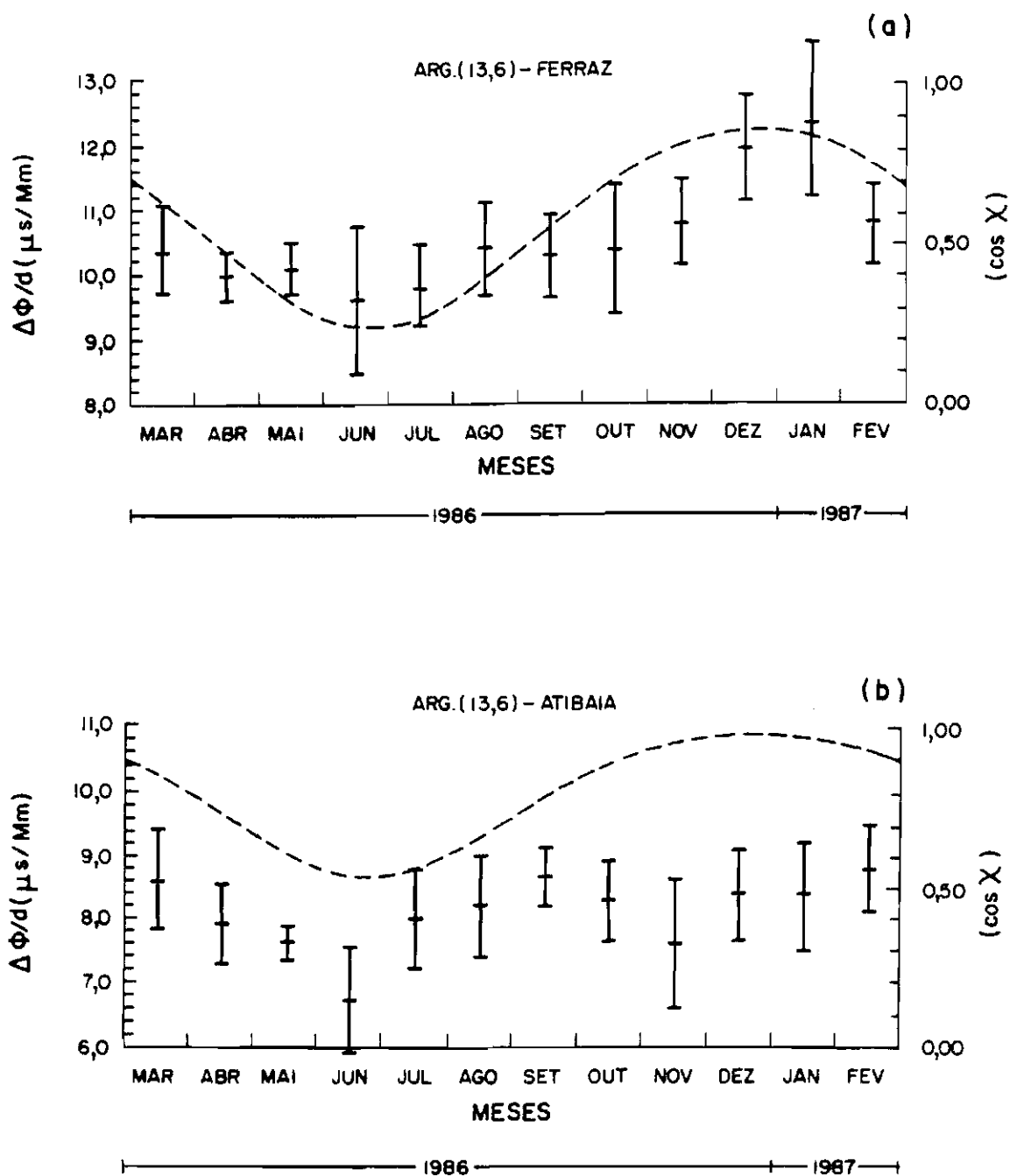


Fig. 5.9 - Médias Mensais da variação diurna de fase normalizada pela distância e a variação do $\overline{\cos(\chi)}$ (---), para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia.

As médias mensais da variação de fase para o trajeto Argentina-Ferraz mostram uma grande variação sazonal, com mínimo em junho ($9.5 \pm 0,5 \mu s$), período de inverno, com o cos também atingindo seu ponto de mínimo (0,23). Nota-se um sensível aumento na variação de fase durante o período de verão ($12,5 \pm 1,0 \mu s$ em janeiro). Contudo, as médias mensais não seguem o perfil do cos durante todos os meses, o que indica que não somente a distância zenital solar controla a variação noite-dia neste trajeto. Radicella (1990) tem pesquisado a possível influência da variação sazonal do ozônio na densidade eletrônica em altas latitudes e, portanto, na propagação dos sinais de VLF, como observado nos meses de setembro, outubro e novembro.

O trajeto Argentina-Atibaia apresenta diferentes características, com a ocorrência de dois mínimos de variação diurna de fase bem pronunciados: um no mês de junho ($6,5 \pm 1,0 \mu s$) e outro em novembro ($7,5 \pm 1,0 \mu s$). Devido à seleção feita anteriormente e ao índice R (número de Zurich) relativamente baixo para o mês de novembro (15,5), observa-se que esta trajetória está sujeita a outros efeitos além da distância zenital solar.

5.3.2 - SELEÇÃO DA ALTURA DE REFERÊNCIA (h_o)

Nos cálculos das variações da altura de reflexão dia/noite e da altura de reflexão noturna que se seguem, faz-se necessário obter a altura de referência diurna (h_o), ou seja, a altura onde ocorre a reflexão das ondas de VLF durante o dia.

Para obtenção da altura de referência toma-se a média das variações diurna de fase normalizada pela distância ($\Delta\phi/d$), obtidos no verão e no inverno, nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz, para as duas trajetórias. As médias obtidas para a trajetória Argentina-

Ferraz na frequência 13,6 kHz são $12,8 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (10 dias) e $9,6 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (18 dias) e na trajetória Argentina-Atibaia $8,8 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (5 dias) e $6,6 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (8 dias). Na frequência de 10,2 kHz os valores para a trajetória Argentina-Ferraz são $8,7 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (5 dias) e $6,4 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (8 dias), para verão e inverno, respectivamente. Na trajetória Argentina-Atibaia, nesta frequência, tem-se apenas medidas durante o verão com $11,4 \pm 0,5 \mu\text{s/Mm}$ (11 dias).

A Figura 5.10 ilustra as médias das variações diurna de fase normalizadas pelas distâncias em função da frequência. Juntamente são mostradas as curvas (b, c e d) da variação diurna de fase normalizada pela distância obtidas por Piazza et al. (1987) baseadas no modelo teórico de Wait e Spies (1964). As curvas foram ajustadas a partir de 90 combinações entre o gradiente de condutividade (β) e alturas de reflexão (h_o), para dados dos sinais do transmissor Omega Argentina nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz, nos mesmos períodos e trajetórias analisadas neste trabalho. No entanto, para o ajuste, os autores não consideraram a atividade magnética, como ocorre agora. Mostra-se também a curva (a) experimental obtida por Reder (1981), para propagação de sinais de VLF a longas distâncias.

Da observação da figura nota-se que os valores obtidos para o trajeto Argentina-Ferraz mostram-se superiores a previsão experimental de Reder (1981) na frequência de 13,6 kHz e inferiores em 10,2 kHz.

No trajeto Argentina-Atibaia, apesar das médias de verão estarem acima da previsão de Reder (1981), estas são ajustadas pelo modelo teórico de Wait e Spies, 1964 (curva b). No inverno, na frequência de 13,6 kHz a média é inferior a previsão experimental.

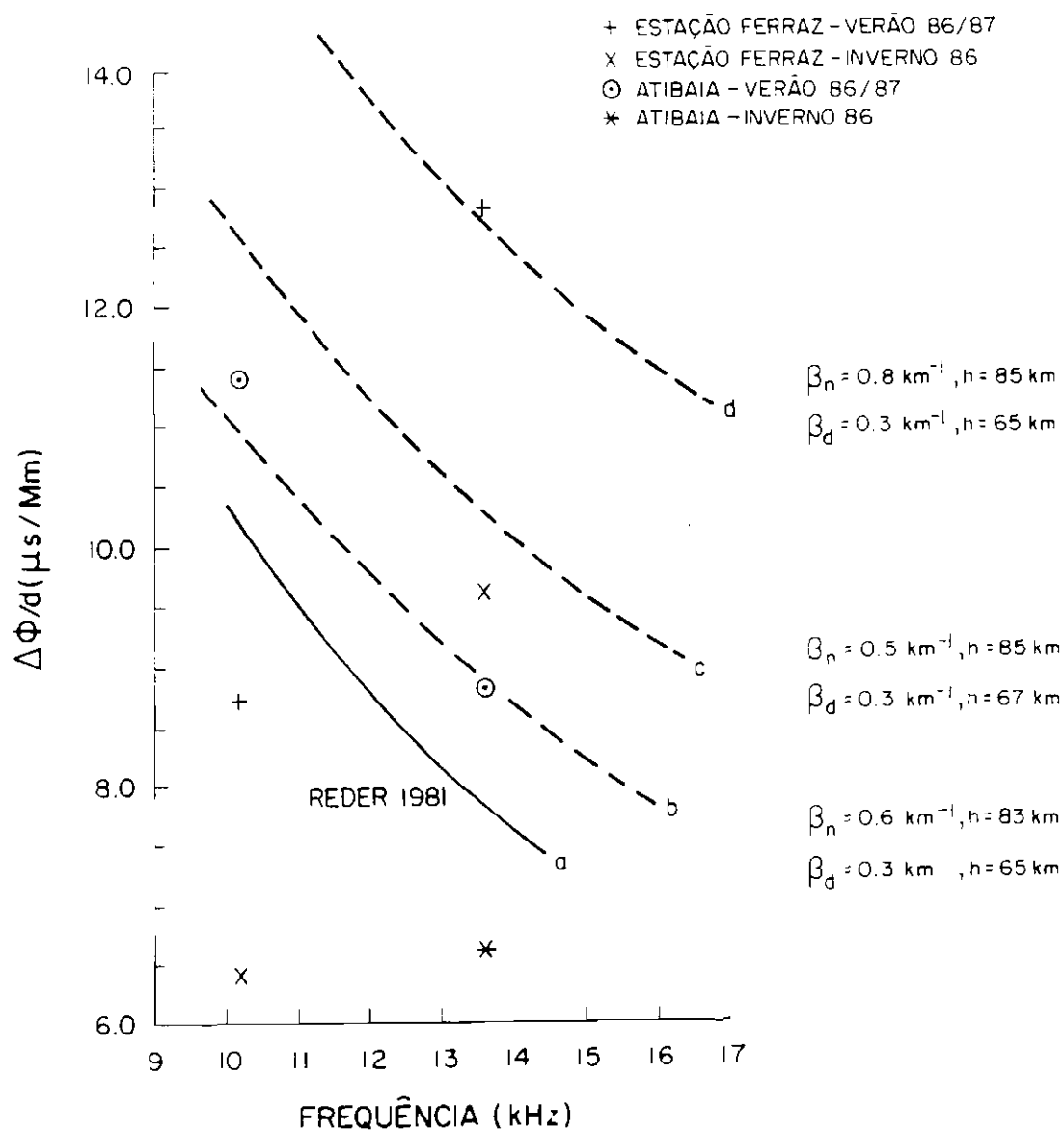


Fig. 5.10 - Variação sazonal da variação de fase diurna normalizada pela distância em função da frequência para a estação Omega Argentina recebida na Estação Antártica Comandante Ferraz e em Atibaia.

Observa-se na trajetória Argentina-Ferraz um comportamento oposto nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz ao previsto, tanto pelo modelo teórico de Wait e Spies, como pela previsão experimental de Reder. É importante frisar, que o modelo teórico de Wait e Spies (1964) é um modelo "clássico" no estudo de propagação de sinais de VLF. Kaufmann et al. (1985) analisaram dados referentes a expedição de verão de 1984 em Ferraz, obtendo o mesmo comportamento, e levantaram como possíveis, as seguintes causas: a reflexão parcial dos sinais de VLF em cadeias de montanhas (cadeia andina) podem alterar os parâmetros de propagação (Thomson, 1985); a propagação através de uma superfície de gelo, como ocorre principalmente nos meses de inverno na região Antártica, contribui para atenuar sensivelmente o sinal, uma vez que a condutividade do gelo está em torno de 2×10^{-5} mho/m; a descontinuidade água do mar/gelo, dependendo da espessura deste último e da altura de reflexão, pode levar a ocorrência de conversão modal; a interferência entre os dois modos de propagação durante a noite, pois o segundo modo é bastante significativo para a distância de 2,2 Mm do trajeto Argentina-Ferraz, como pode ser observado na Figura 5.11, que ilustra a atenuação do campo elétrico da onda, normalizado à 1 no transmissor, em função da distância para a frequência de 13,6 kHz, nos períodos noturno (a) e diurno (b) obtidos por Cardoso (1979).

A partir das curvas de melhor ajuste e das médias das variações diurna de fase selecionou-se as alturas de referência diurna de 65 km (curva d) e 67 km (curva c), para os períodos de verão e inverno, respectivamente, no trajeto Argentina-Ferraz. Para a trajetória Argentina-Atibaia a altura escolhida é de 65 km (curva b) para todo o período analisado, uma vez que não se obteve o ajuste dos parâmetros de propagação para o inverno, como mencionado anteriormente.

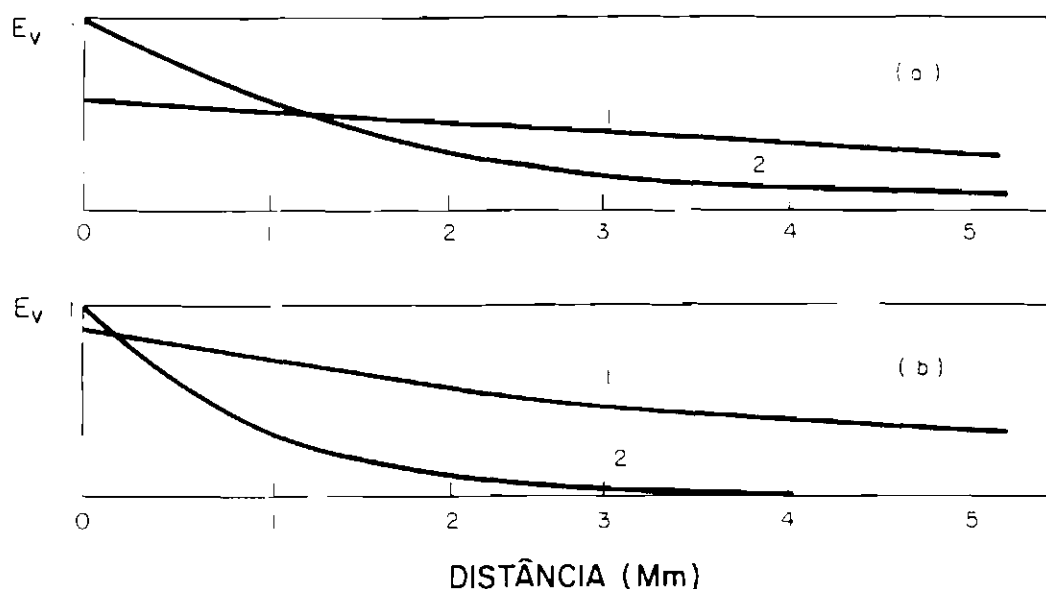


Fig. 5.11 - Curvas de atenuação com a distância para o primeiro (1) e segundo (2) modos de propagação, obtidos para a frequência de 13,6 kHz nos períodos noturno, com $h_0 = 90$ km (a) e diurno, com $h_0 = 70$ km (b).

FONTE: Cardoso (1979), p. 12.

5.3.3 - CÁLCULO DA VARIAÇÃO DE ALTURA DE REFLEXÃO

No estudo da variação da altura de reflexão (Δh) são utilizadas como alturas de referências diurnas (h_0), no trajeto Argentina-Ferraz, as alturas de 65 km e 67 km no verão e no inverno, respectivamente. Para o trajeto Argentina-Atibaia adotou-se 65 km como altura de referência tanto no inverno como no verão. A partir destas, são efetuados os cálculos da variação de altura de reflexão através da equação 3.9:

$$\frac{\Delta \phi}{d} = \frac{1}{\lambda} \left[\frac{1}{2R_T} + \frac{\lambda^2}{16h_0^3} \right] \Delta h$$

com as alturas de referência h_0 selecionadas anteriormente.

A Figura 5.12(a) ilustra a variação da altura de reflexão calculada através das médias mensais obtidas para o trajeto Argentina-Ferraz. Aqui ocorre o aparecimento de dois mínimos, sendo que o do mês de outubro está relacionado à altura de referência diurna selecionada.

A Figura 5.12(b) mostra a variação da altura de reflexão obtida de modo similar, através das médias mensais, para o trajeto Argentina-Atibaia. O resultado é bastante semelhante ao apresentado para a variação mensal da fase, ampliando as variações observadas na Figura 5.10(b). A variação deve estar relacionada com a escolha de uma única altura de referência para os 12 meses avaliados, o que necessariamente não deveria reproduzir a variação efetiva.

Comparando os dois resultados observa-se que enquanto a trajetória Argentina-Ferraz tem sua maior variação nos meses de verão, para a trajetória Argentina-Atibaia, esta ocorre nos meses de inverno. Esta diferença no comportamento das duas trajetórias entre inverno e verão parece indicar que não é somente a distância zenital solar o responsável pelo controle da ionosfera nas duas regiões.

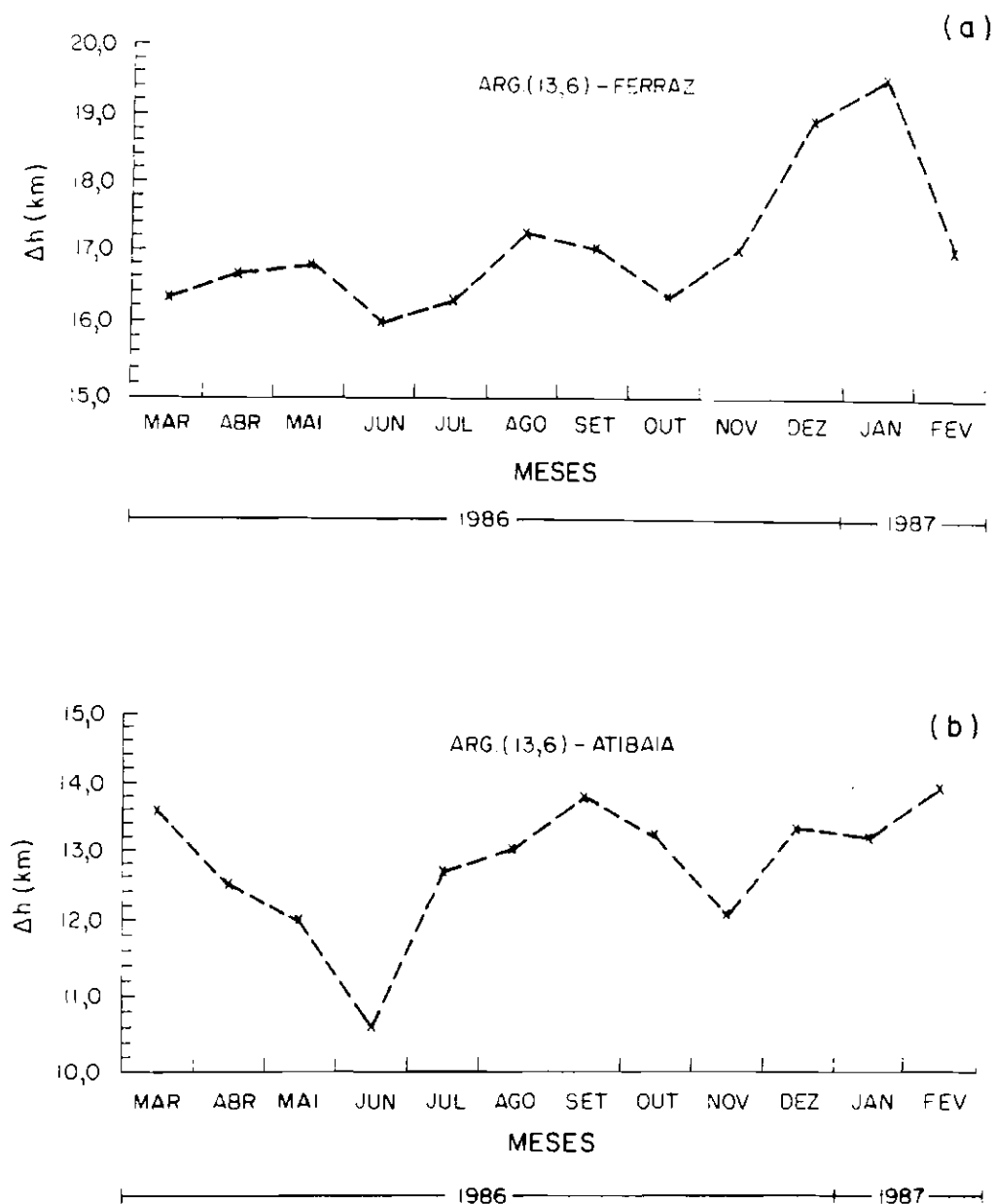


Fig. 5.12 - Variação da altura de reflexão de março/86 a fevereiro/87 obtidas para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz com $h_o = 65$ km no inverno e $h_o = 67$ km no verão e (b) Argentina-Atibaia com $h_o = 65$ km durante todo o período.

5.3.4 - VARIAÇÃO DA ALTURA DE REFLEXÃO CALCULADA ATRAVÉS DO MODELO SEMI-EMPÍRICO IRI-86

A partir da distribuição da concentração eletrônica com a altura obtida pelo modelo semi-empírico IRI-86 (International Reference Ionosphere, Bilitza, 1986), calculou-se a altura de reflexão para as ondas de VLF e comparou-se com as alturas anteriormente obtidas.

O IRI-86 compreende um conjunto de modelos que permite calcular a concentração eletrônica, temperatura e composição iônica de toda a ionosfera, tendo como variáveis a localização geográfica, mês, hora e o número médio anual de manchas, dado pelo índice R (índice de Zurich). Não é objetivo deste trabalho uma avaliação detalhada do modelo IRI.

De acordo com o modelo de Wait e Spies (1964) a altura de reflexão para as frequências de VLF ocorre onde o parâmetro de condutividade assume o valor $2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. Este parâmetro está relacionado com a concentração eletrônica e a frequência de colisões através da Equação 3.4. A frequência angular de plasma pode ser obtida a partir da concentração eletrônica através da fórmula (Wait e Spies, 1964):

$$\omega_0^2(h_0) = 3,18 \times 10^9 N_e(h) \quad (5.4)$$

onde N_e é a concentração eletrônica (cm^{-3}) a uma dada altura (km).

Fazendo-se as substituições convenientes na Equação 3.4, tem-se:

$$\omega_r(h) = 1,7511 \times 10^{-2} N_e(h) \exp(0,15xh) \quad (5.5)$$

A distribuição da concentração eletrônica foi então obtida às 16:00 TU para um dia de cada mês, sendo este o horário de maior ionização nos dois trajetos. Devido à grande variação mês a mês do número de manchas, optou-se por inserir o índice R médio mensal a fim de se obter o melhor ajuste do modelo às condições observadas. Os parâmetros de saída são ajustados de forma a fornecer a concentração eletrônica entre 70 e 74 km de altitude com passos de 0,2 km.

A partir das tabelas resultantes da variação da altura e densidade eletrônica, calculou-se através da Equação 5.5 o parâmetro de condutividade para as várias alturas até este se igualar a $2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$. Este cálculo foi realizado para todos os meses nos dois trajetos.

A variação anual da altura de reflexão calculada para os trajetos Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia estão ilustradas nas Figuras 5.13(a) e (b), respectivamente. As variações da altura resultante são muito semelhantes para o trajeto Argentina-Ferraz, mantendo-se os dois mínimos obtidos através do modelo teórico de Wait e Spies (1964), com exceção do mês de março. No trajeto Argentina-Atibaia nota-se uma diferença entre os dois modelos para o mês de fevereiro, o qual pode estar relacionado com o valor do R adotado. Em ambas as figuras a variação de altura calculada pelo modelo IRI é superior àquela obtida pelo modelo de Wait e Spies (1964).

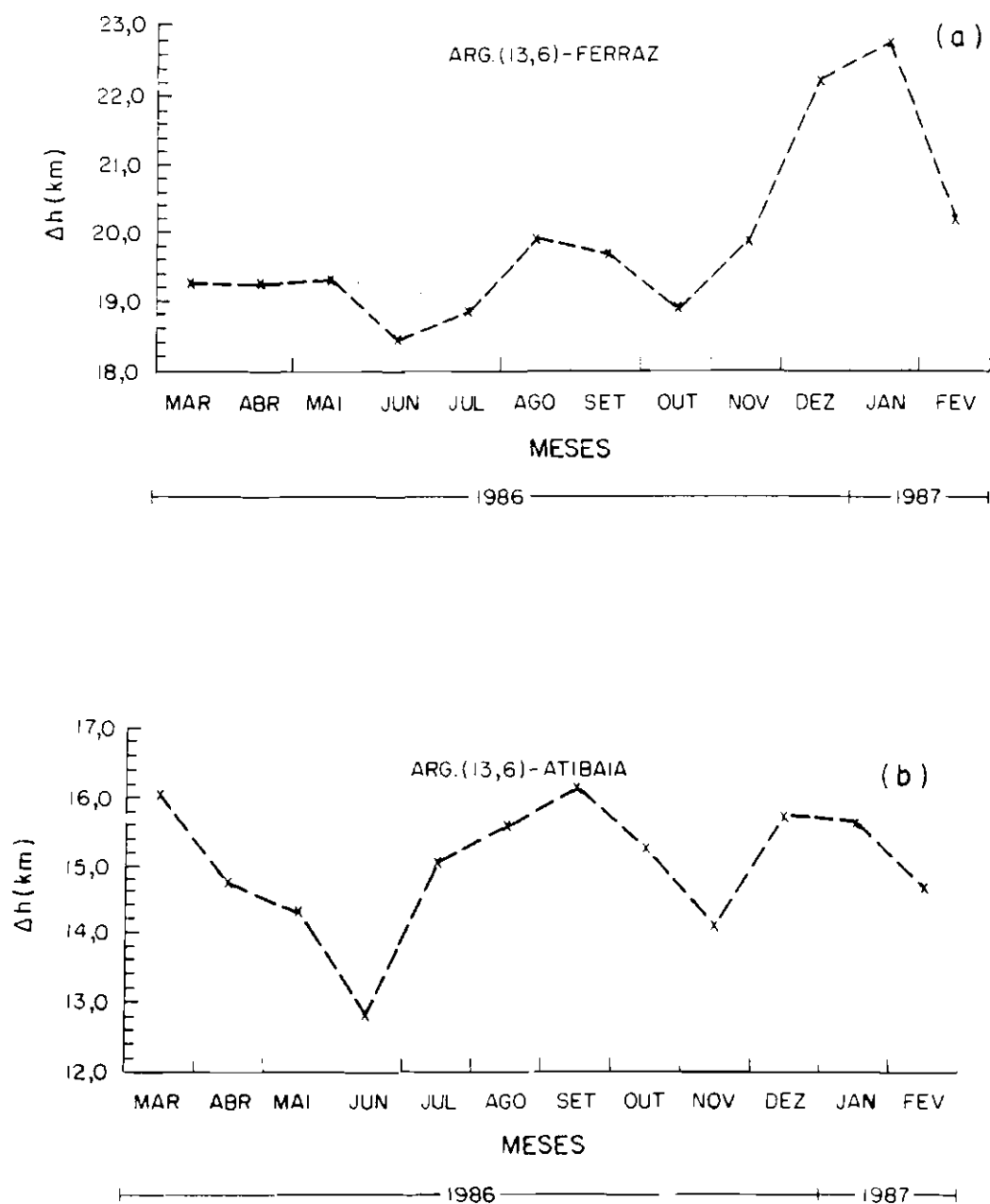


Fig. 5.13 - Variação da altura de reflexão de março/86 a fevereiro/87 utilizando a altura de referência calculada através do IRI-86 para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina Atibaia.

5.3.5 - COMPARAÇÃO DAS ALTURAS DE REFLEXÃO NOTURNA

A partir das variações anuais da altura de reflexão calculada para os dois trajetos nos modelos IRI e o de Wait e Spies (1964) obteve-se o comportamento da variação da altura de reflexão noturna.

A Figura 5.14(a) mostra os resultados para o trajeto Argentina-Ferraz. Observa-se que os dois modelos apresentam a mesma variação durante o ano, apesar dos resultados obtidos pelo modelo IRI estarem a uma altura maior do que a de Wait e Spies (1964). Nas duas figuras observa-se um maior abaixamento na altura de reflexão para o mês de outubro, inicialmente não verificado.

A Figura 5.14(b) mostra a variação da altura de reflexão noturna para o trajeto Argentina-Atibaia. Nota-se que o comportamento resultante dos dois modelos são bastante semelhantes.

Dos resultados observados anteriormente pode-se concluir que os modelos semi-empírico IRI-86 e o teórico de Wait e Spies (1964) apresentam respostas semelhantes, principalmente para o trajeto Argentina-Ferraz. Para o trajeto Argentina-Atibaia as diferenças surgem em períodos de alta atividade solar. No entanto, as alturas de reflexão noturna obtidas pelo IRI são superiores às utilizadas para a propagação de sinais de VLF.

Utilizando outra técnica em VLF (ionosonda oblíqua) diferente daquela aplicada neste trabalho, Macedo Moura (1990) obteve resultado semelhante, quando da aplicação do modelo IRI no cálculo das alturas de reflexão noturna.

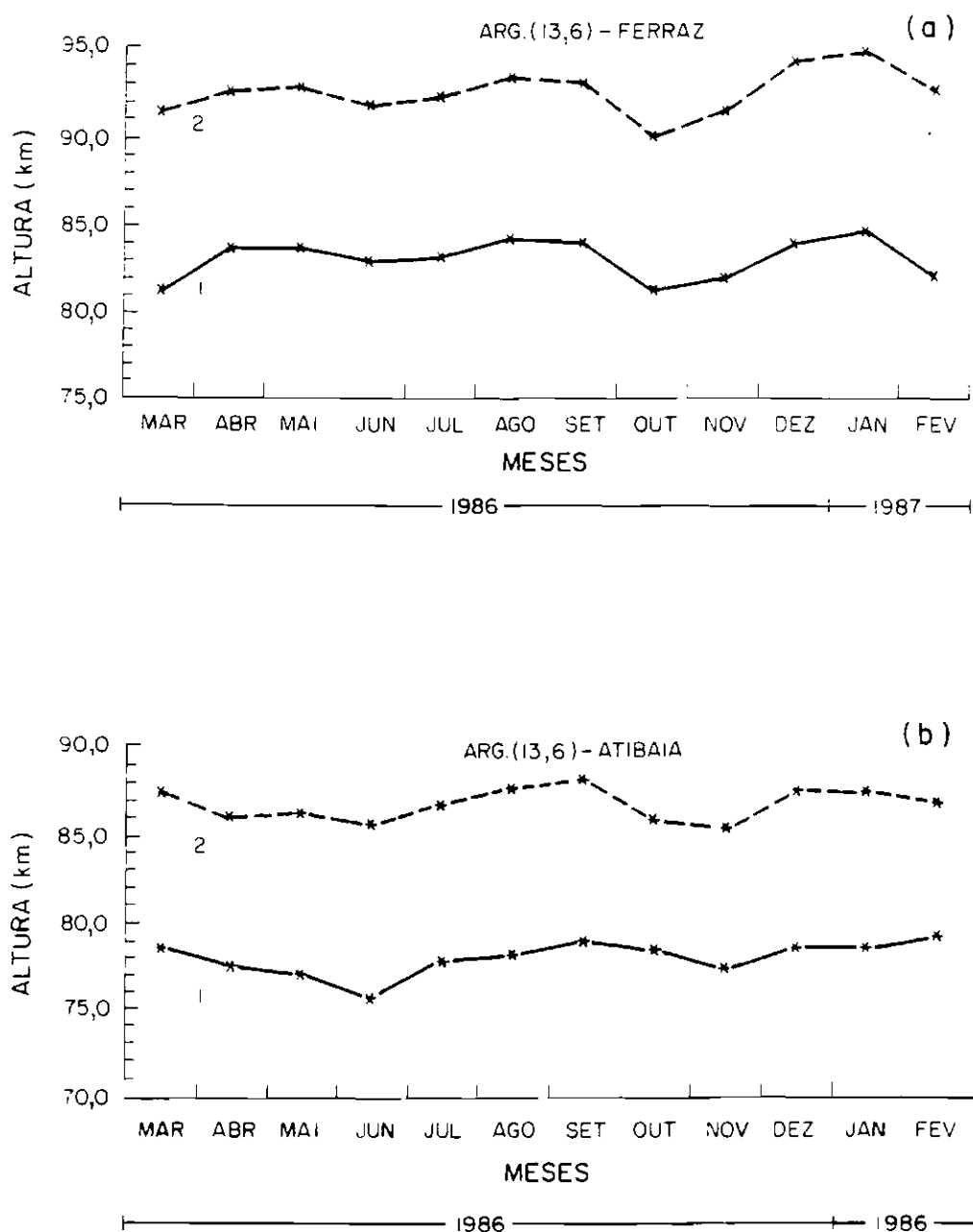


Fig. 5.14 - Variação da altura de reflexão noturna, de março/86 a fevereiro/87, utilizando-se os modelos (1) Wait e Spies (1964) e (2) IRI-86 para os trajetos: (a) Argentina-Ferraz e (b) Argentina-Atibaia.

5.4 - RESPOSTA DA BAIXA IONOSFERA ÀS EXPLOSÕES SOLARES

Neste item faz-se uma análise da resposta da baixa ionosfera sub-Antártica às explosões solares utilizando os registros da estação Omega Argentina nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz realizados na Estação Comandante Ferraz. Todavia, no período analisado, apenas os eventos descritos na Tabela 5.1 ocorreram simultaneamente nas duas frequências. Para uma comparação com os dados de Atibaia a Tabela 5.1 mostra também eventos ocorridos simultaneamente nas duas frequências no trajeto Argentina-Atibaia em julho de 1985.

Tabela 5.1

EFEITOS DE EXPLOSÕES SOLARES NA BAIXA IONOSFERA (SIDs)
REGISTRADOS SIMULTANEAMENTE NAS FREQUÊNCIAS 10,2 kHz e
13,6 kHz

Dia	13,6 kHz			10,2 Khz		
	Início (TU)	Máximo (TU)	$\Delta\phi$ (μs)	Início (TU)	Máximo (TU)	$\Delta\phi$ (μs)

FERRAZ - 1986

02/03	20:40	20:55	1,0	20:45	21:00	1,5
03/03	12:52	13:01	3,5	12:53	13:06	4,0
03/03	14:09	14:23	2,5	14:10	14:25	2,5
24/04	12:20	12:30	1,0	12:20	12:30	1,5
24/04	14:17	14:28	1,0	14:03	14:24	3,5
26/04	16:37	16:45	2,5	16,37	16:48	4,0

ATIBAIA - 1985

02/07	17:03	17:22	0,5	17:01	17:20	1,0
08/07	16:05	16:15	2,5	16:04	16:15	3,5
09/07	16:52	17:00	5,0	16:52	17:00	5,5
11/07	13:45	13:57	2,5	13:45	13:55	3,5
13/07	13:22	13:27	0,5	13:22	13:27	1,0

Durante a ocorrência de explosões solares, um aumento no fluxo de raios-X com comprimentos de onda menores que $10^{\circ}\text{\AA}$, que penetram até a região D, produzem um aumento de ionização. Este acréscimo de ionização produz vários fenômenos denominados genericamente distúrbios ionosféricos rápidos - SID (Sudden Ionospheric Disturbances). Nestas são observados poucas variações no fluxo da radiação ultravioleta (Ratcliffe, 1972).

No início do SID, a concentração eletrônica da região D sofre um rápido aumento, retornando lentamente ao seu valor normal após meia hora ou mais. Este aumento na concentração diminui a altura de referência e o gradiente de condutividade (Kaufmann e Mendes, 1968). Esta diminuição da altura de reflexão para sinais de VLF leva a um aumento da velocidade de fase e portanto a um avanço da fase, que recebe a denominação de anomalia súbita de fase - SPA (Sudden Phase Anomaly).

As variações de fase durante um SPA são proporcionais à distância entre o transmissor e o receptor, à iluminação do trajeto ($\cos \chi$) e à frequência (Ratcliffe, 1972; Comarmond, 1977).

A Figura 5.15 ilustra a variação de fase relativa para dois SPAs registrados em 3 de março de 1986 nas frequências de 10,2 kHz e 13,6 kHz no trajeto Argentina- Ferraz. Os dados para a frequência 10,2 kHz mostram um avanço de fase maior que o observado na frequência 13,6 kHz, confirmando as previsões de Reder (1981). No segundo evento as duas frequências apresentam a mesma variação, o que pode indicar uma saturação de ionização na altura de reflexão dos sinais em 10,2 kHz ou um menor fluxo de raios-X chegando até esta altura.

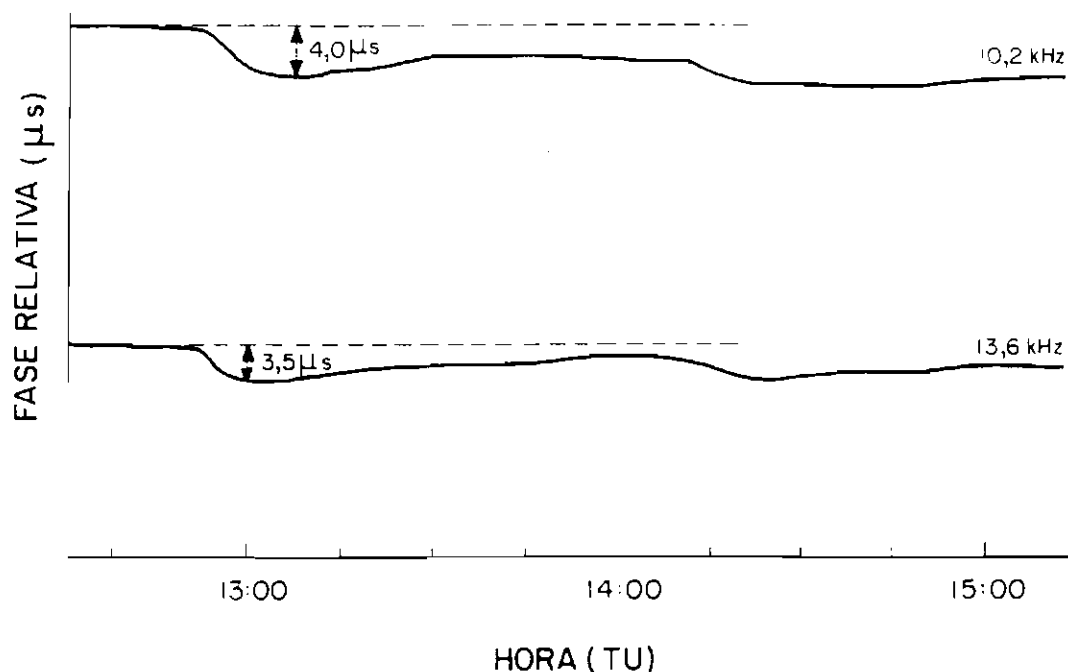


Fig. 5.15 - Variação relativa de fase para anomalia súbita de fase - SPA ("Sudden Phase Anomaly") registrada na Estação Antártica Comandante Ferraz nas frequências 10,2 kHz e 13,6 kHz em 03/03/86 no transmissor Omega Argentina.

Na Tabela 5.1 observa-se que o comportamento para o trajeto Argentina-Atibaia confirma as previsões discutidas para o comportamento da fase durante eventos SID.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O estudo de algumas características de propagação de ondas de VLF em latitudes médias e sub-Antárticas, considerando-se apenas dias com baixa atividade magnética ($\Sigma K_p < 14$) e sem ocorrência de explosões solares, mostra comportamentos diferentes para um mesmo transmissor, como se descreve a seguir:

- O estudo do comportamento diurno de fase para os trajetos Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia, durante os períodos de inverno e verão, mostra diferenças entre as duas trajetórias num mesmo período. O trajeto Argentina-Atibaia mostra-se mais perturbado no período noturno do que o trajeto Argentina-Ferraz, principalmente no inverno. Este comportamento pode estar relacionado com a SAGA, uma vez que o trajeto Argentina-Atibaia está todo dentro da Anomalia.
- Durante o período diurno o trajeto Argentina-Ferraz mostra um comportamento bastante regular, sem ocorrência de conversão modal e de efeito de camada C. Já o trajeto Argentina-Atibaia mostra a ocorrência de efeito de camada C, tanto no inverno como no verão. O mesmo trajeto mostra ainda uma taxa de variação de fase maior que a observada na trajetória Argentina-Ferraz, o que evidencia uma sensibilidade maior da baixa ionosfera em latitudes médias, durante o dia, em relação a distância zenital solar.
- As diferenças tornam-se mais visíveis no período de verão (Figura 5.2), onde a trajetória Argentina-Ferraz mostra um nítido aumento no tempo de

iluminação, com a consequente diminuição do período noturno. Observa-se que a baixa ionosfera na região sub-Antártica atinge o equilíbrio fotoquímico mais rapidamente que a região sob a Anomalia durante o dia.

- No estudo da variação de fase com a iluminação do trajeto para as trajetórias de propagação Argentina-Ferraz e Argentina-Atibaia, obteve-se alto coeficiente de correlação linear entre a variação de fase relativa ao máximo de iluminação da trajetória para o período pós-iluminação máxima em função de $\ln(\overline{\sec \chi} / \overline{\sec \chi_m})$. Este resultado mostra que não se faz necessário a introdução de um tempo de relaxação ionosférico no período pós-iluminação máxima, nas regiões compreendidas pelos trajetos aqui estudados.
- As variações das médias mensais do coeficiente angular da reta de melhor ajuste, para o período de pós-iluminação máxima (Figura 5.5), mostram um decréscimo do período de inverno para o verão nos dois trajetos estudados, evidenciando uma relação com o tempo de duração do dia. Observa-se que apesar da variação relativa destes coeficientes ser praticamente a mesma nos dois trajetos de propagação, os coeficientes angulares obtidos para a trajetória Argentina-Atibaia são em sua maioria superiores aos obtidos para a trajetória Argentina-Ferraz. Para o período de pré-iluminação máxima, os coeficientes foram em sua maioria inferiores, mas apresentam a mesma tendência observada anteriormente.
- O levantamento da variação mensal diurna de fase (Figura 5.9) mostra nítidas diferenças entre os dois trajetos de propagação, com respostas diferentes em cada caso em relação a distância zenital solar. No

trajeto Argentina-Ferraz observa-se grande variação entre inverno e verão, com um mínimo no mês de junho e um sensível aumento da variação diurna de fase para os meses de verão. Para o trajeto Argentina-Atibaia nota-se a ocorrência de dois mínimos, um em junho e outro menos pronunciado em novembro. Este trajeto mostra variações relativas menores entre inverno e verão que aquele observado para o trajeto Argentina-Ferraz decorrentes da menor variação da distância zenital solar durante o ano.

- Não se obteve ajustes adequados dos parâmetros do modelo teórico de Wait e Spies (1964) para as variações diurnas de fase normalizadas pela distância nas frequências 10,2 kHz e 13,6kHz no trajeto de propagação Argentina-Ferraz, tanto para o verão como para o inverno (Figura 5.10). A previsão experimental de Reder (1981) para as frequências VLF também não se ajusta aos dados obtidos na Estação Antártica Ferraz. A principal característica observada é a inversão dos valores entre a frequência 10,2 kHz e 13,6 kHz em relação aos esperados pelo modelo teórico de Wait e Spies (1964) e pela previsão de Reder (1981). A trajetória Argentina-Atibaia mostra uma variação que possibilita um ajuste dos parâmetros no modelo de Wait e Spies (1964) no período de verão, o que não ocorre no período de inverno. Outros parâmetros, como a interferência do segundo modo de propagação a noite, propagação através do gelo, química do ozônio na região D, devem ser pesquisados para uma compreensão melhor da baixa ionosfera nas regiões estudadas.
- As variações da altura de reflexão (Figura 5.12), calculadas a partir do modelo de Wait e Spies (1964) para os dois trajetos analisados, mostram boa

concordância com os valores da variação diurna de fase normalizada pela distância. As diferenças observadas para o trajeto Argentina-Ferraz no mês de outubro deve-se a altura de referência adotada.

- O cálculo da variação da altura de reflexão noturna para os dois trajetos através do modelo semi-empírico IRI-86 (Figura 5.13) resultou bastante semelhante ao obtido pelo modelo de Wait e Spies (1964), sendo que as variações resultantes do modelo IRI são superiores às obtidas pelo modelo de Wait e Spies (1964).
- Uma avaliação de SPAs recebidos no trajeto Argentina-Ferraz, nas frequências 10,2 kHz e 13,6 kHz em março de 1986 e no trajeto Argentina-Atibaia em julho de 1985 (Tabela 5.1) mostra que as variações relativas de fase estão de acordo com as previsões de Reder (1981).

Finalizando, coloca-se a necessidade de um estudo mais detalhado dos parâmetros de propagação e da própria ionosfera local, principalmente para a região sub-Antártica, que apresenta os maiores desvios em relação aos modelos teóricos existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M.A.; ANANTHAKRISHNAN, S.; KRISHNAN, B.A.;
MASSAMBANI, O. Cosmic ray ionization in the D-region at
sunrise: evidence from VLF phase measurements. Radio
Science, 8(8/9):733-736, Aug. 1973.
- ARNOLD, F.; KRANKOWSKY, D. Ion composition and electron-and
ion-loss process in the Earth's atmosphere. In: GRANDAL,
B.; HOLTET, J.A., ed. Dinamical and chemical coupling
between the neutral and ionized atmosphere. Netherland
Reidel Dordrecht, 1977. p. 93-127.
- ARNOLD, F.; KRANKOWSKY, D.; ZETTWITZ E.; JOOS, W. Strong
temperature control of the D-region: evidence from in
situ ion composition measurements. Journal of
Atmospheric and Terrestrial Physics, 42(3):249-256,
Mar. 1980.
- BAILEY, D.K. Abnormal ionization in the lower ionosphere
associated with cosmic ray flux enhancements.
Proceedings of the IEEE, 47(2):255-266, Feb. 1959.
- BATES, D.R.; BEDERSON, D. Advances in atomic and molecular
physics. New York, NY, Academic Press, 1976. V.12
375p.
- BENBROOK, J.R.; BERING, E.A.; LEVERENZ, H.; ROEDER, J.L.;
SHELDON, W.R. Quiet-time electron precipitation at
L=4 in South Atlantic Anomaly. Journal of Geophysical
Research, 88(A1):189-199, Jan. 1983.
- BILITZA, D. International reference ionosphere: Recent
developments. Radio Science, 21(3):343-346, May/June
1986.
- BRANDT, J.C. Introduction to the solar wind. San
Francisco, CA, W.H.F. Freeman, 1970.

CARDOSO, A.H. Alguns efeitos de propagação de ondas de VLF nas proximidades da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul. (Dissertação de mestrado em Ciências) - CRAAM/Mackenzie, São Paulo, 1979.

CHAPMAN, S. The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating Earth. Proceedings of Physics Society, 43(1): 26-45, Jan. 1931.

CHILTON, C.J.; DIEDE, A.H.; RADICELLA, S.M.
Transequatorial reception of a very low frequency transmission. Journal of Geophysical Research, 69(7):1319-1328, Apr. 1964a.

CHILTON, C.J.; CROMBIE, D.D.; GLENN, A.G. Phase variation in VLF propagation. In: BLACKBAND, W.T. Propagation of radio waves at frequencies below 300 kc/s. London, Pergamon, 1964b. p. 257-289. (AGARDgraph 74).

COMARMOND, J.M. Contribution a l'étude de la basse ionosphere par des mesures de phase et d'amplitude d'ondes élektromagnétique a très basses fréquences. (Tese de doutorado em Ciências) - Universidade Pierre et Marie Curie, Paris, 1977.

CROMBIE, D.D. Differences between the west-east propagation of VLF signals over long distances. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 12(2/3):110-117, Feb./Mar. 1958.

DANILOV, A.D.; SIMONOV, A.G. Seasonal variations of D-region aeronomical parameters. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 44(7):567-571, July 1982.

FORBES, J. M. Temperature and solar zenith angle control of D-region positive ion chemistry. Planetary and Space Science, 30(10):1065-1072, Oct. 1982.

- GLEDHILL, J.A. Aeronomy effects of the south atlantic anomaly. Reviews of Geophysics and Space Physics, 14(2): 173-187, May 1976.
- GLEDHILL, J.A. Particle precipitation paterns in southern hemisphere higt latitudes-longitude dependence. In: WORKSHOP ON ANTARCTIC MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE PHYSICS, San Diego, June 2-21, 1986. Proceedings. San Diego, SCARUAP, 1986, p. 1-48.
- KAUFMANN, P.; MENDES, A.T.M. Relative changes on lower ionosphere conductivity gradiente during SID events. Journal of Geophycal Research, 73(7):2487-2493, Apr. 1968.
- KAUFMANN, P.; PIAZZA, L.R.; PAES LEME, N.M.; Survey of VLF Omega transmission received during summer in the Antarctic Peninsula. Memoirs of the National Institute of Polar Research, 38:106-111, 1985. Special issue.
- KIKUCHI, T. Anomalous diurnal phase shifts of Omega VLF waves (10-14kHz) on the east-west low latitude and transequatorial paths. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 45(11):743-751, Nov. 1983.
- _____ Waveguide model analyses of Omega VLF wave propagation at 13.6 kHz. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 48(1):15-23, Jan. 1986.
- KIKUCHI, T.; EVANS, D.S. Quantitative study of substorm associated VLF phase anomalies and precipitating energetic electrons. Journal of Radio Research Laboratories, 29(128):183-199, Nov. 1982.
- KUNTZ, V.L.R. Efeitos do ciclo solar e dependência latitudinal na formação da camada C ionosférica. (Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. (INPE-4342-TDL/293).

- LELEVIER, E.T.; BRASCOMB, L.M. Ion chemistry governing mesospheric electron concentration. Journal of Geophysical Research, 73(1):27-41, Jan. 1968.
- LYNN, K.J.W. VLF modal interference over west-east paths. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 39(3): 347-357, Mar. 1977.
- MACEDO MOURA, M.S. Aplicação do modelo IRI-86 a dados de ionosonda oblíqua. São José dos Campos, 1990. Comunicação pessoal à Plínio Carlos Alvalá, em 15 de janeiro.
- MITRA, A.P. Chemistry of middle atmospheric ionization-a review. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 43(8):737-751, Aug. 1981.
- MOLER, W.F. VLF propagation effects of D region produced by cosmic rays. Journal of Geophysical Research, 65(5): 1459-1468, May 1960.
- NARCISI, R.S.; PHILBRICK, C.R.; ULWICK, J.C.; GARDNER, M.E. Mesospheric nitric-oxide concentration during PCA. Journal of Geophysical Research, 77(7):1332-1336, July 1972.
- PAES LEME, N.M. Estudo comparativo dos efeitos de tempestades magnéticas em VLF na Anomalia Magnética do Atlântico Sul. (Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986. (INPE-4084-TDL/251).
- PAPAGIANNIS, M.D. The ionosphere. In: Space Physics and Space Astronomy. New York, NY, Gordon and Breach, 1972, p. 28-62.
- PIAZZA, L.R. Variação das características da baixa ionosfera com o ciclo solar. (Dissertação de mestrado em Ciências) - CRAAM/Mackenzie, São Paulo, 1975.

- PIAZZA, L.R.; MENDES DA COSTA, A.; KAUFMANN, P.; KUNTZ, V.L.R.; PAES LEME, N.M.; MACEDO MOURA, M.S.S. Results on VLF long distance propagation received at Brazil and Antarctic Peninsula. In: BIREGIONAL LATIN AMERICAN-AFRICAN WORKSHOP ON RADIO PROPAGATION RESEARCH AND APPLICATION, Buenos Aires, Apr. 1-4, 1987. Proceedings. Buenos Aires, BLA, 1987, p. 107-124.
- PINTADO, I.O.; RADICELLA, S.M.; FERNANDEZ, P.M. Experimental estimates of electron density variation at reflection height of VLF signals. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 49(2):129-133, Feb. 1987.
- PINTO JR., O.; GONZALEZ, W.D. Energetic electron precipitation at South Atlantic Magnetic Anomaly: A review. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 51(5):351-365, May 1989.
- RADICELLA, S.M. Densidade de ozônio em altas latitudes. São Paulo, 1990. Comunicação pessoal a Liliana Rizzo Piazza, em 12 de janeiro.
- RATCLIFFE, J.A. The formation and nature of the ionosphere and magnetosphere. In: An introduction to the ionosphere and magnetosphere. Cambridge University, 1972. p. 3-100.
- REAGAN, J.B.; WATT, T.M. Simultaneous satellite and radar studies of the D-region ionosphere during the intense solar particle events of august 1972. Journal of Geophysical Research, 81(25):4579-4596, Sep. 1976.
- REDER, F.H. Omega and VLF (COMM) propagation. In: ANNUAL INTERNATIONAL OMEGA MEETING, 6., Montreal, Aug. 18-20, 1981. Proceedings. Montreal, IOA, 1981, p. 32-57.

- REID, G.C. The production of water-cluster positive ions in the quiet daytime D region. Planetary and Space Science, 25(3):275-290, Mar. 1977.
- RISHBETH, H.; GARRIOTT, O.K. Introduction to ionospheric physics. New York, NY, Academic Press, 1969.
- ROEDERER, J.G. Southern hemisphere anomalies. Washington, D.C., NASA, 1965. (NASA X-641-65-24).
- SEWARD, F.D; GRADER, R.J.; TOOR, A.; BUNGINYUN, G.A.; HILL, R.W. Electron at low altitudes: a difficult background problem for X-ray astronomy. Livermore, CA, University of California, 1973. (UCRL-51470).
- SOLAR GEOPHYSICAL DATA. Boulder, NOAA, V. 501-510, Pt.2, 1986.
- SOLAR GEOPHYSICAL DATA. Boulder, NOAA, V. 511-513, Pt.2, 1987.
- THOMAS, L.; BOWMAN, M.R. Model studies of the D-region negative-ion composition during day-time and night-time. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 47(6): 547-556, June 1985.
- THOMSON, N.R. Refletion of radio waves from distant montain ranges. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 47(4):353-362, Apr. 1985.
- TORR, D.G. The photochemistry of the upper atmosphere. In: BRASSEUR G.; SOLOMON, S. Atmosphere - Earth, the Others Planets and Comets, San Diego, CA, Academic Press, 1985. p. 165-277.
- TURCO, R.P.; SECHRIST, C.F. An investigation of the ionospheric D region at sunrise, 3, Time variation of negative-ion and eletron densities. Radio Science, 7(7):725-727, July 1972.

VELINOV, P. On ionization in ionospheric D region by galactic and solar cosmic rays. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 30(10):1891-1905, Oct. 1968.

WAIT, J.R. Diurnal changes of ionospheric heights deduced from phase velocity measurements at VLF. Proceedings of the IRE, 47(5):998-1005, May 1959.

_____. Electromagnetic waves in stratified media.
Oxford, NY, Pergamon, 1962.

WAIT, J.R.; SPIES, K.P. Characteristics of the Earth-Ionosphere wave-guide for VLF radio waves. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1964. (NBS Technical Notes 300).

_____. Characteristics of Earth-Ionosphere wave guide for VLF radio waves. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1965a. (NBS Technical Notes 300). Numerical Supplement.

_____. Characteristics of Earth-Ionosphere wave guide for VLF radio waves. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1965b. (NBS Technical Notes 300). Numerical Supplement.

WAIT, J.R.; WALTERS, L.C. Numerical calculations for reflection of electromagnetic waves from a lossy magnetoplasma. Washington, D.C., National Bureau of Standards, 1964. (NBS Technical Notes 205).

WESTERLUND, S.; REDER, F.H. VLF propagation at auroral latitude. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 35(8):1453-1474, Aug. 1973.

WISEMBERG, J.; KOKARTS, G. Negative ion chemistry in the terrestrial D region and signal flow graph. Journal of Geophysical Research, 85(A9):4642-4652, Sept. 1980.

73