

RESULTADOS PRELIMINARES DE UM MODELO DETERMINÍSTICO SIMPLES PARA  
DESCREVER A ESTRUTURA TÉRMICA VERTICAL DO MAR, USANDO  
TEMPERATURAS SUPERFICIAIS OBTIDAS COM SATÉLITE

José L. Stech, Merritt R. Stevenson e Hector M. Inostroza V.

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq  
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Informações da estrutura térmica vertical na camada superior de 100 metros do oceano são importantes para uma grande variedade de estudos e aplicações oceanográficas. O modelo simples apresentado neste trabalho representa um primeiro esforço em descrever temperaturas na camada superior de 100 metros, para uma área selecionada na costa sudeste do Brasil, usando todos os dados de temperatura disponíveis no Centro Nacional de Dados Oceanográficos na Diretoria de Hidrografia e Navegação. Uma grade espacial que consiste em quadrados de  $1/2^{\circ}$  de latitude por  $1/2^{\circ}$  de longitude foi selecionada para obter uma resolução razoável. O desenvolvimento do modelo constituiu-se basicamente de: determinação das temperaturas médias da superfície até a profundidade de 100 metros, variâncias e intervalos de confiança para cada perfil estatístico de temperatura e coeficientes de equações empíricas em cada quadrado. Com estas equações, foi possível determinar a temperatura nas profundidades de 0 a 100 metros, com uma exatidão e precisão, no mínimo, iguais aos erros associados com os originais e/ou com as variâncias subsequentes dos dados combinados. Para os propósitos deste trabalho, o campo de temperatura superficial foi obtido do satélite GOES-5 para 15 de fevereiro de 1984. As temperaturas obtidas com satélites foram então corrigidas, devido aos efeitos atmosféricos, usando temperaturas obtidas por navios para a mesma área, naquele dia. Finalmente, foram determinadas diferenças entre o campo de temperatura superficial corrigida e o campo climatológico associado (primeiro trimestre). Foi realizado um teste simples do modelo utilizando o campo de temperatura obtido com satélite para 16 de fevereiro de 1984.

ABSTRACT

Information about the vertical temperature structure in the upper 100m of the ocean are important for a variety of oceanographic studies. The simple model presented herein is a first attempt to describe the thermal structure in the upper 100m for a selected area of

the southeast coast of Brazil, by utilizing all data of the National Oceanographic Data Center in the Diretoria de Hidrografia e Navegação. In order to obtain a reasonable accuracy, a  $1/2^\circ$  latitude by  $1/2^\circ$  longitude grid was selected. The development of the model was done in the following steps: calculations of the average temperature profile down to 100m, depth; variances and confidence intervals for each statistical temperature profile and determination of coefficients of empirical equations for each square. With these equations, it was possible to calculate the temperature from 0 to 100m with an accuracy consistent with the original data or combined data variances. Satellite data from the GOES-5 VISSR sensor were utilized for 15 February 1984 to obtain the surface temperature field. Satellite temperatures were then corrected for atmospheric effects by using ship temperature data in the same area on that day. Finally, differences between the satellite and climatological temperatures were done. A simple test with the model was made by using the satellite temperature field for 16 February, 1984.

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da estrutura térmica dos oceanos é um dos problemas mais importantes da oceanografia. Muito se tem feito neste ramo da oceanografia física, como mostrado pelos inúmeros trabalhos sobre o assunto, tais como: Miyakoda e Rosati (1984); Blanc et alii (1983); Wolf et alii (1969) e outros.

O objetivo principal do presente trabalho é relacionar a distribuição de temperaturas da superfície do mar com a estrutura térmica vertical numa região da costa sudeste do Brasil (Figura 1) em base de tempo trimestral. Para tanto, foram utilizados dados oceanográficos e dados de satélites meteorológicos da série GOES.

A região Sudeste do Brasil, compreendida entre os paralelos  $20^\circ$  e  $25^\circ$ S e os meridianos  $40^\circ$  e  $45^\circ$ W, foi dividida em subquadrados de  $1/2^\circ$  de latitude por  $1/2^\circ$  de longitude (Figura 1) e constitui a região de estudo. Ela é de grande interesse para a oceanografia brasileira, pois é nesta região que se localiza Cabo Frio, onde ocorre o fenômeno da ressurgência, caracterizado pelo deslocamento da água de fundo para as camadas superficiais. Também nesta região circula a Corrente do Brasil, caracterizada por ser uma corrente de altas temperaturas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como a metodologia utilizada constitui-se de três partes distintas, é dada a seguir uma descrição de cada uma delas.

## a) Climatologia

Foi realizado em cada subquadrado um levantamento de dados de temperatura existentes no Centro Nacional de Dados Oceanográficos, na Diretoria de Hidrografia e Navegação, no período de 1957 a 1982. Aqueles que apresentarem menos que 3 informações (lançamento de BT, de XBT, ou 3 estações oceanográficas), ou o conjunto de três destas informações não foram consideradas. Como as coletas de temperatura por estes três métodos são feitas em profundidade diferentes, foi necessário fazer interpolação da temperatura para as profundidades que variavam de 10 metros até a máxima de 100 metros. Foram utilizados dois métodos para tais interpolações: 1) se o número de níveis observados num perfil fosse maior que três, utilizava-se o método da "spline" cúbica, como descrito por Pennington (1970); 2) se o número de níveis fosse igual a três, utilizava-se o método de interpolação biquadrática. Se o número de níveis fosse menor que três, o perfil era rejeitado automaticamente.

Uma vez selecionados e interpolados os dados, obtiveram-se o perfil médio, a variância e os perfis envolventes inferior e superior para cada subquadrado que continha o número mínimo de dados. O perfil médio foi obtido calculando a temperatura média para cada profundidade de 10 em 10 metros, através da seguinte fórmula:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^N T_i / N, \quad (1)$$

onde:  $T_i$  são as temperaturas observadas em cada nível,

$N$  é o número de observações para cada nível.

Para os cálculos dos perfis envolventes, utilizou-se a seguinte relação:

$$\bar{T} - K \sqrt{\frac{S^2}{N}} < T_z < \bar{T} + K \sqrt{\frac{S^2}{N}}, \quad (2)$$

onde:  $T$  é a temperatura média para cada nível

$S^2 = \frac{\sum(T-\bar{T})^2}{N-1}$  é a variância calculada para cada profundidade,

$N$  é o número de observações para cada profundidade,

$K$  é o coeficiente de confiança; neste trabalho utilizou-se 0,025.

Para cada perfil médio foram determinados coeficientes de polinômios até 5º grau. Isto foi feito da seguinte forma: para os subquadrados mais profundos que apresentaram dados em profundidades maiores que 50 metros, obtiveram-se polinômios de 5º grau. Para aqueles subquadrados menos profundos, obtiveram-se polinômios de menores graus. Por exemplo: num determinado subquadrado onde existiam dados até a profundidade de 40 metros, portanto com 5 valores de temperatura em 5 profundidades, ajustou-se um polinômio com 1 grau menor que o número de temperatura, isto é, um poli-

nômio de 4º grau. A Equação 3 representa um destes polinômios:

$$T_i = A + BZ_i + CZ_i^2 + DZ_i^3 + \dots \quad (3)$$

onde:  $T_i$  é a temperatura calculada na  $i$ -ésima profundidade,

$Z_i$  é a  $i$ -ésima profundidade,

A, B, C, D são os coeficientes calculados para o polinômio.

Os coeficientes do polinômio foram calculados pelo método dos mínimos quadrados, como descrito em Pacitti e Atkinson (1977).

#### b) Satélite

Como a cobertura de nuvens é um fator limitante na utilização do satélite em estudos oceanográficos, foi feita primeiramente uma seleção das imagens que apresentam uma pequena cobertura de nuvens. Foi selecionada uma imagem do satélite GOES-5 do dia 15 de fevereiro de 1984, processada e analisada no sistema IMAGE-100, obtendo-se uma distribuição de temperatura de superfície. Esta distribuição foi obtida utilizando os canais visível (VIS) e infravermelho (INFRA) do sensor VISSR do satélite GOES-5, segundo a metodologia descrita por Inostroza, et alii (1984). As temperaturas médias obtidas por satélite foram inferidas na mesma resolução espacial de 1/2 de latitude por 1/2 de longitude. Estes valores de temperatura foram corrigidos, devido ao efeito atmosférico, utilizando o método dos mínimos quadrados e os dados de temperatura coletados por navios em trânsito na área, na mesma época da gravação da imagem. Com estes dados corrigidos foi elaborada uma carta final de temperatura que representava a distribuição térmica da superfície obtida por satélite.

#### c) Modelo estatístico

O modelo estatístico adotado para este trabalho é determinístico e estocástico. É determinístico no sentido de que são permitidas e consideradas variações de temperaturas de um subquadrado para outro na região de estudo. O aspecto estocástico é devido ao fato de se ter considerado a mesma estrutura térmica dentro de cada subquadrado.

A primeira parte do modelo é vista na Figura 2. A relação entre a temperatura radiométrica observada pelo satélite e a temperatura real é dada por:

$$T'_{bb}(X_i, Y_i) = T_{bb}(X_i, Y_i) + \Delta T_{H_2O}, \quad (4)$$

onde:  $T_{bb}$  é a temperatura radiométrica não corrigida na posição  $X_i, Y_i$ ,

$\Delta T_{H_2O}$  é a correção a ser aplicada à temperatura radiométrica,

$T'_{bb}$  é a temperatura radiométrica corrigida.

A parte superior da Figura 2 representa a distribuição dos valores  $T'_{bb}$  para um tempo particular. A parte inferior da figura representa as temperaturas superficiais climatológicas para cada um dos trimestres. Aqui os trimestres são representados por  $Q_i$ , onde o índice significa cada um dos trimestres. A próxima etapa do modelo é verificar se  $T'_{bb}(X_i, Y_i, Q_i)$  está ou não dentro do intervalo de confiança de 95% da temperatura climatológica superficial  $T_s(X_i, Y_i, Q_i)$ . Se  $T'_{bb}$  estiver fora do intervalo aceitável, o modelo considerará que  $T'_{bb}$  está fora da climatologia e rejeitará o valor  $T'_{bb}$ . Caso contrário segue-se para a próxima etapa.

A Figura 3 mostra a estrutura da temperatura climatológica vertical do modelo que acomoda um intervalo de profundidade de 0 a 100 metros, para os mesmos subquadrados, em cada trimestre. A recuperação dos perfis verticais de temperaturas é feita por:

$$T(X_i, Y_i, Q_i, Z_i) = T_c(X_i, Y_i, Q_i, Z_i) \pm f(T'_{bb}, \partial T_{cs}, \partial T/Z). \quad (5)$$

Nesta equação o perfil climatológico está sendo corrigido por uma função, que inclui a temperatura superficial corrigida, a temperatura climatológica superficial e um gradiente vertical de temperatura. A razão para o termo gradiente vertical de temperatura é que pode existir uma diferença entre as temperaturas observada e a climatológica. Esta diferença deve desaparecer com o aumento da profundidade e torna-se zero na profundidade máxima. A forma como o perfil estimado relaciona-se com o perfil climatológico é melhor visualizada selecionando um subquadrado particular de um trimestre. Tem-se então:

$$T(Z) = T_c - (T'_{bb} - T_s) \tanh\left(\frac{Z_* - \alpha}{\beta}\right). \quad (6)$$

As relações entre os vários termos são vistas na Figura 4. O perfil com linha sólida representa os dados climatológicos, enquanto o perfil com linha tracejada representa o perfil obtido através da Equação 6, sendo  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $Z_*$  os coeficientes usados para ajustar a Equação 6 ao perfil climatológico de cada subquadrado. É importante notar que a profundidade da camada de mistura calculada é imutável, enquanto o perfil calculado dentro da termoclina converge para a curva climatológica. O método de convergência usado é semelhante aos usados por Camerlengo (1982) e O'Brien e Heburn (1983).

### 3. RESULTADOS

Através do levantamento dos dados de temperatura existentes, verificou-se que para o primeiro trimestre, somente os subquadrados de números 3, 4, 25, 29 e 42 da Figura 1 não apresentaram o número mínimo de informações. Para os outros foi possível obter polinômios que determinaram as temperaturas nas diferentes profundidades com uma exatidão e precisão, no mínimo, iguais aos erros associados com os originais e/ou com as variâncias subsequentes dos dados combinados.

A seguir são mostrados, na Tabela 1, os resultados da climatologia para o subquadrado 23 e descrito cada termo da tabela:

- *Posição média*: é a posição do perfil médio obtido tomando a posição média entre as informações daquele subquadrado.
- *Número de observações*: é o número de dados existentes numa determinada profundidade, por exemplo, 11 dados na profundidade de 0 metro.
- *Temp ( $^{\circ}C$ )*: é a temperatura média em cada profundidade.
- *Variância*: é a variância calculada para cada profundidade.
- *Intervalos de confiança superior e inferior*: através destes valores é que se determinam os perfis envolventes.

Para este subquadrado o polinômio ajustado foi de 5º grau, pois, como mencionado na metodologia, quando a profundidade do perfil fosse maior que 50 metros este polinômio seria ajustado para o 5º grau. A parte final da tabela representa os coeficientes do polinômio.

Foi realizada a correlação entre a temperatura da superfície e as outras em diferentes profundidades, até a máxima de 100 metros. A Figura 5 mostra a curva de correlação para o primeiro trimestre. Como pode ser visto para este período, tal correlação foi bastante alta com o valor mínimo de 75%.

Pelo processamento, no sistema IMAGE-100, da imagem do dia 15 de fevereiro de 1984, obteve-se uma carta com diferentes símbolos (Figuras 6 e 7). A cada símbolo é associado um determinado valor de temperatura  $T'_{bb}$ , como pode ser visto na Figura 6. Estes valores  $T_{bb}$  variaram entre 19,8°C e 23,3°C e foram obtidos diretamente pelo satélite; devido ao efeito atmosférico, houve necessidade de corrigi-los. Na figura 6,  $T_s$  representa a temperatura corrigida. Com os valores de  $T_s$ , foi possível elaborar uma carta de temperatura de superfície (Figura 8), a qual representa a distribuição da temperatura de superfície obtida com satélite.

#### 4. CONCLUSÕES

Utilizou-se somente uma carta de temperatura de superfície obtida por satélite, não se tendo a tendência central de sua distribuição durante o trimestre, mas somente um sinal de sua variabilidade. Acredita-se que com pelo menos três imagens no trimestre esta tendência pode se tornar mais clara.

Outro fator limitante em modelos estatísticos é a disponibilidade de dados. Alguns subquadrado não apresentaram o número mínimo de informações, outros apresentaram um número próximo do mínimo.

Assim, se forem feitas mais coletas de dados, tanto por sensoria-mento remoto como por XBT e oceanografia convencional, o modelo ora utilizado poderá ser aperfeiçoado.

TABELA 1

EXEMPLO DA CLIMATOLOGIA PARA O SUBQUADRADO 23

QUADRADO DE MARSDEN		376				
SUBQUADRADO DE MARSDEN		32,0				
POSICÃO MÉDIA:		LATM= 23,77				
		LONGM= 42,24				
PERÍODO: MESES						
Nº OBS	PROF (M)	TEMP. °C	VARIÂNCIA	INT. CONF. SUP.	INT. CONF. INF.	
11	0	24,98	0,7596	25,5881	24,3773	
11	10	24,78	0,4297	25,2369	24,3263	
11	20	23,99	1,9255	24,9528	23,0251	
11	30	23,02	3,7199	24,3571	21,6777	
11	40	22,08	3,6520	23,4058	20,7510	
11	50	21,16	3,0221	22,3673	19,9524	
10	60	20,24	3,5884	21,6429	18,8353	
10	70	19,53	4,6261	21,1276	17,9398	
10	80	18,90	5,4695	20,6351	17,1688	
10	90	18,32	5,6383	20,0826	16,5632	
10	100	17,77	5,2780	19,4756	16,0705	
O GRAU DO POLINÔMIO = 5						
COEFICIENTES DO POLINÔMIO						
0,2499E+02	0,1153E-01	-0,4302E-02	0,7350E-04	-0,5356E-06	0,1471E-08	

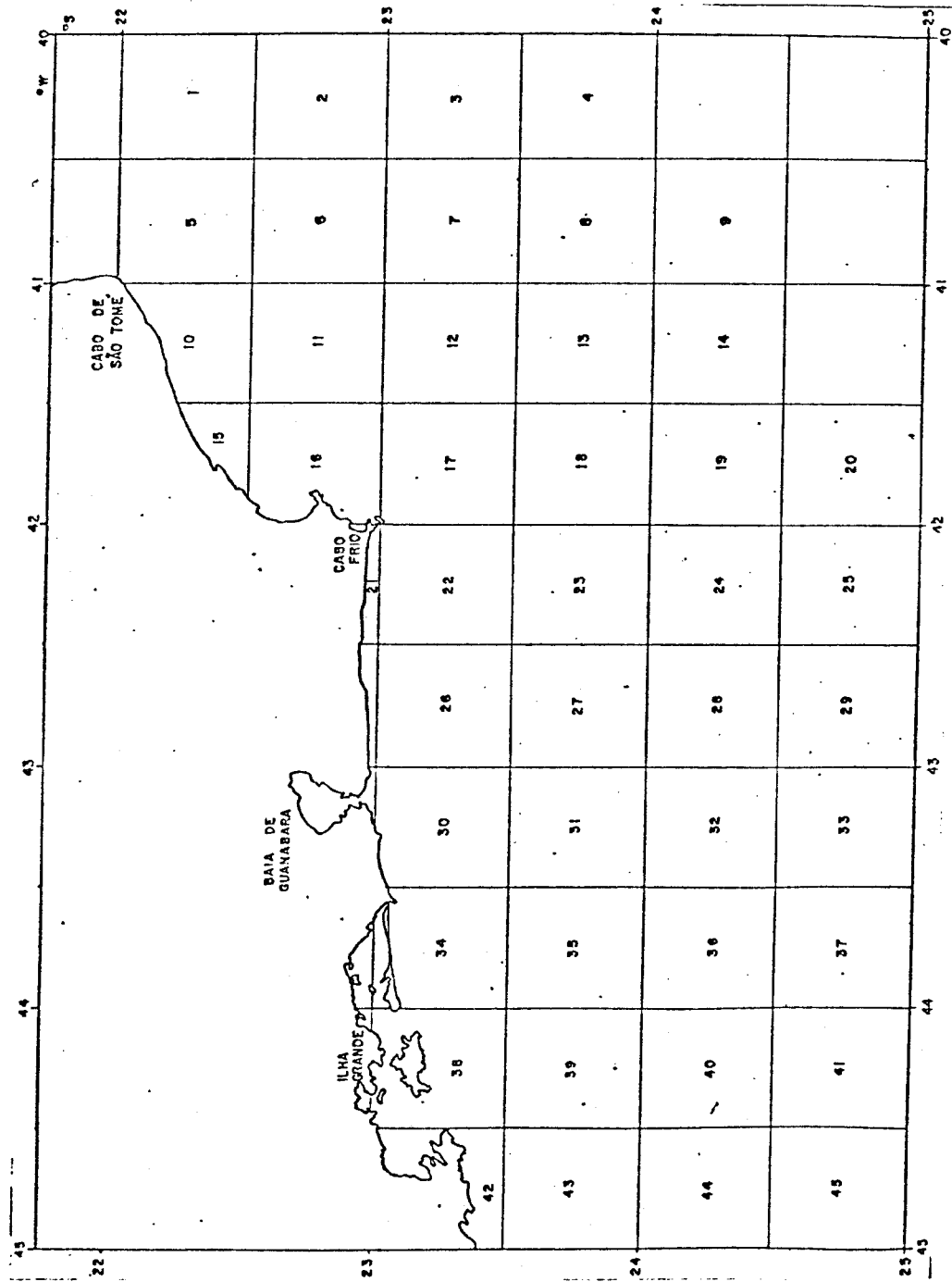
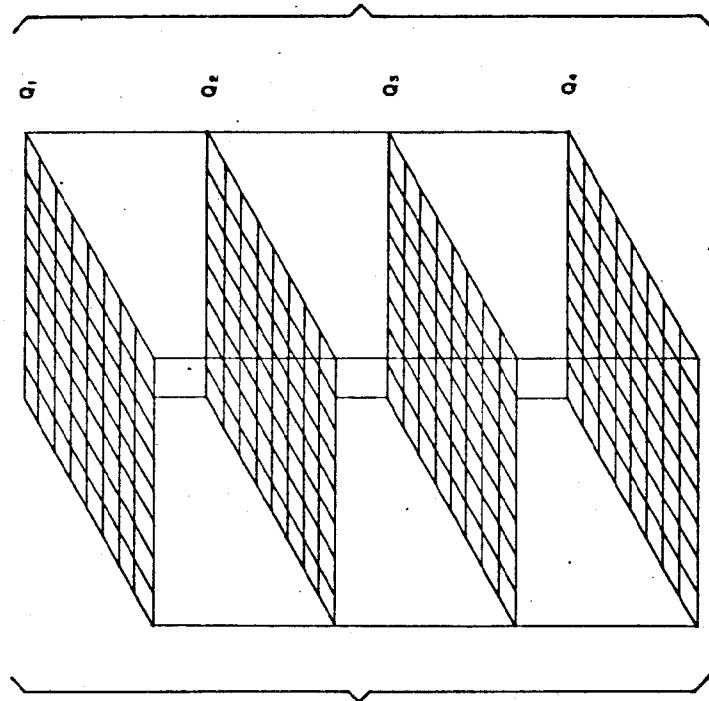
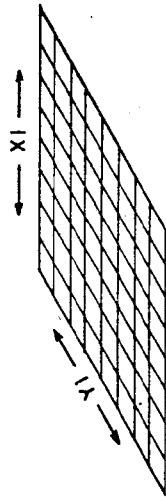


Fig. 1 - Área de estudo



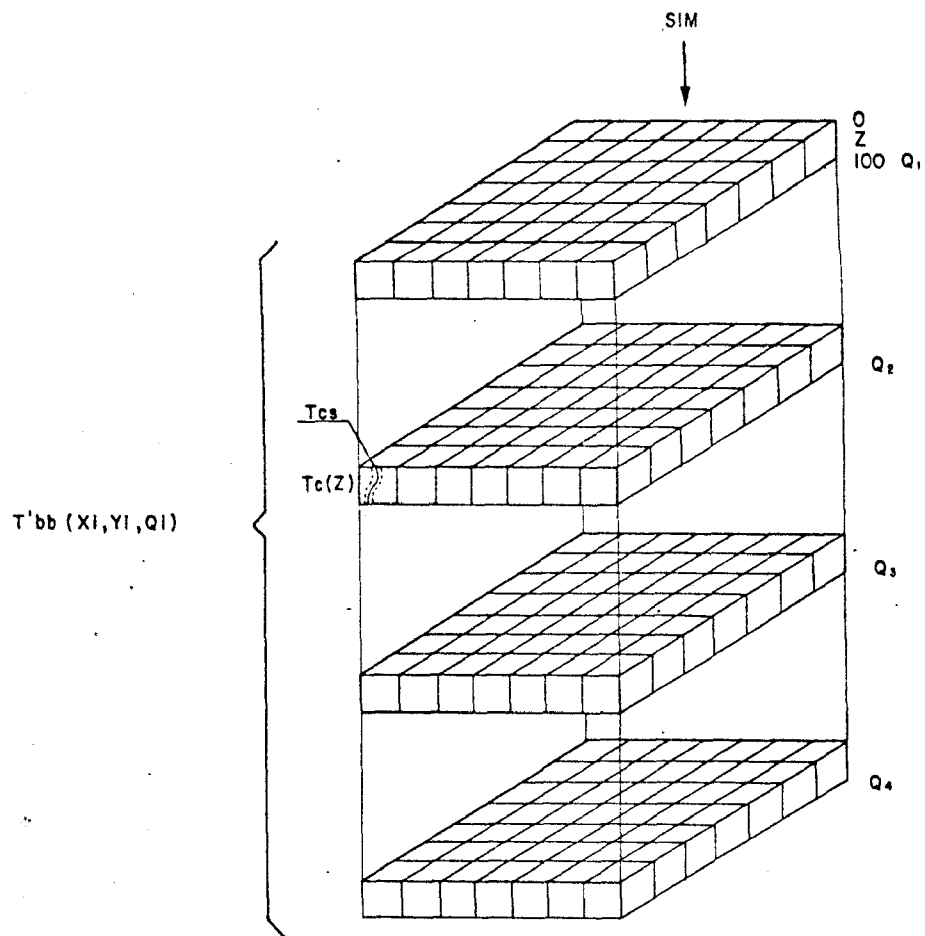
$$T'_{bb}(X_i, Y_i) = T_{bb}(X_i, Y_i) + \Delta T_{n_20} = T_s(X_i, Y_i)$$



$$[T_s(X_i, Y_i, Q_i)] \leq T'_{bb}(X_i, Y_i, Q_i) \leq [T_s(X_i, Y_i, Q_i)] + 95\%$$

$$T'_{bb}(X_i, Y_i, Q_i)$$

Fig. 2 - Representação esquemática da primeira parte do modelo



$$T(X_i, Y_i, Q_i, Z_i) = T_c(X_i, Y_i, Q_i, Z_i) \pm f(T'_{bb}, T_{cs}, \frac{\partial T}{\partial Z})$$

Fig. 3 - Estrutura da temperatura climatológica vertical do modelo

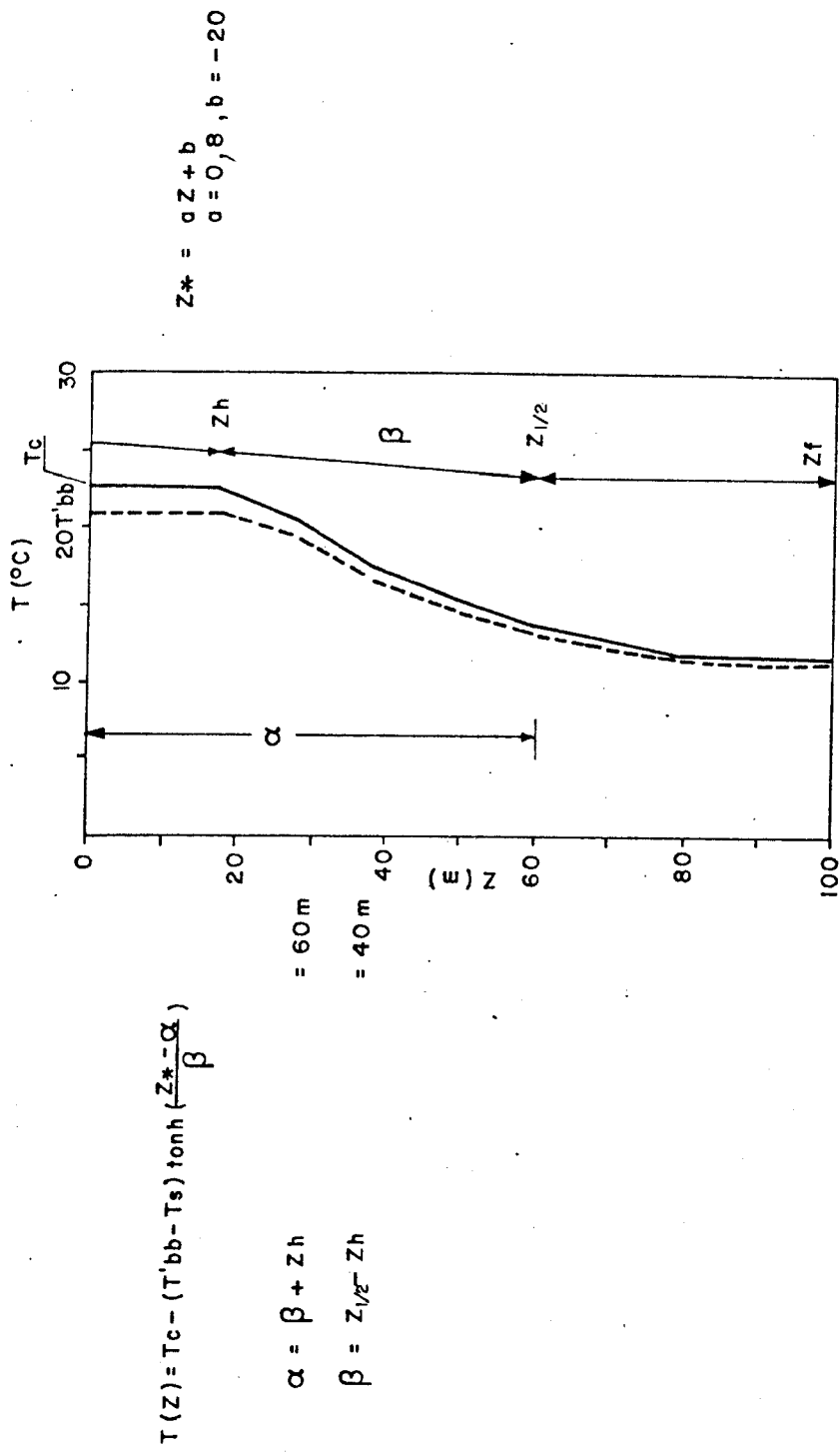


Fig. 4 - Representação esquemática da relação entre os perfis estimado e climatológico

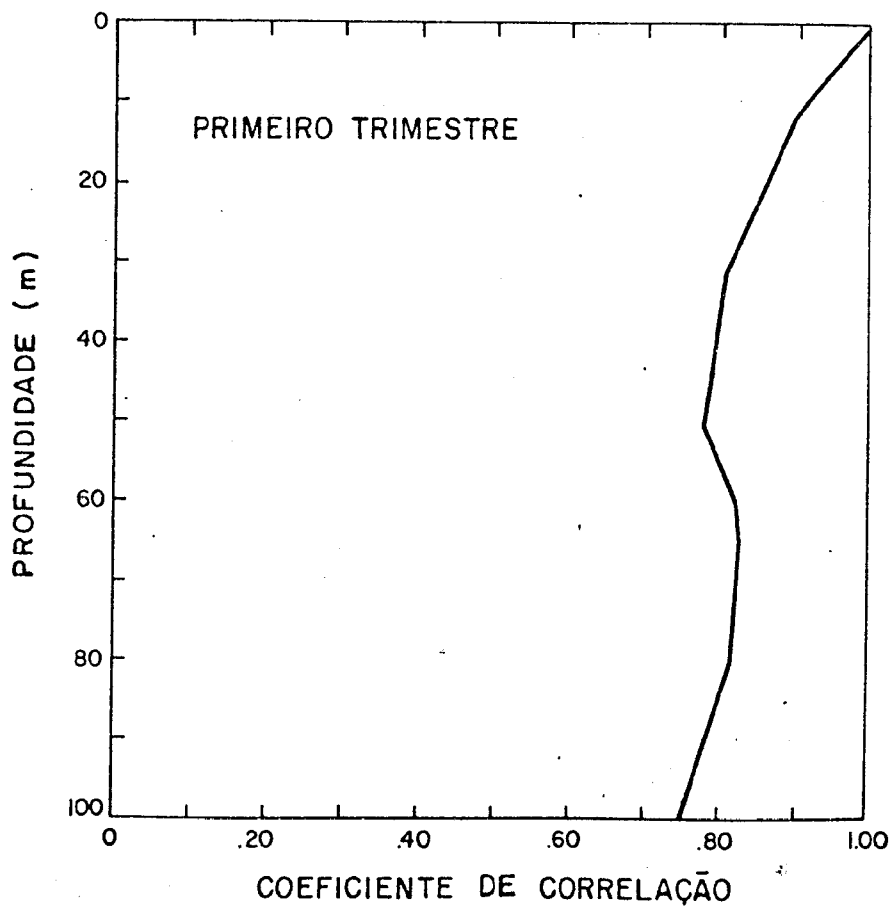


Fig. 5 - Curva de correlação para o primeiro trimestre

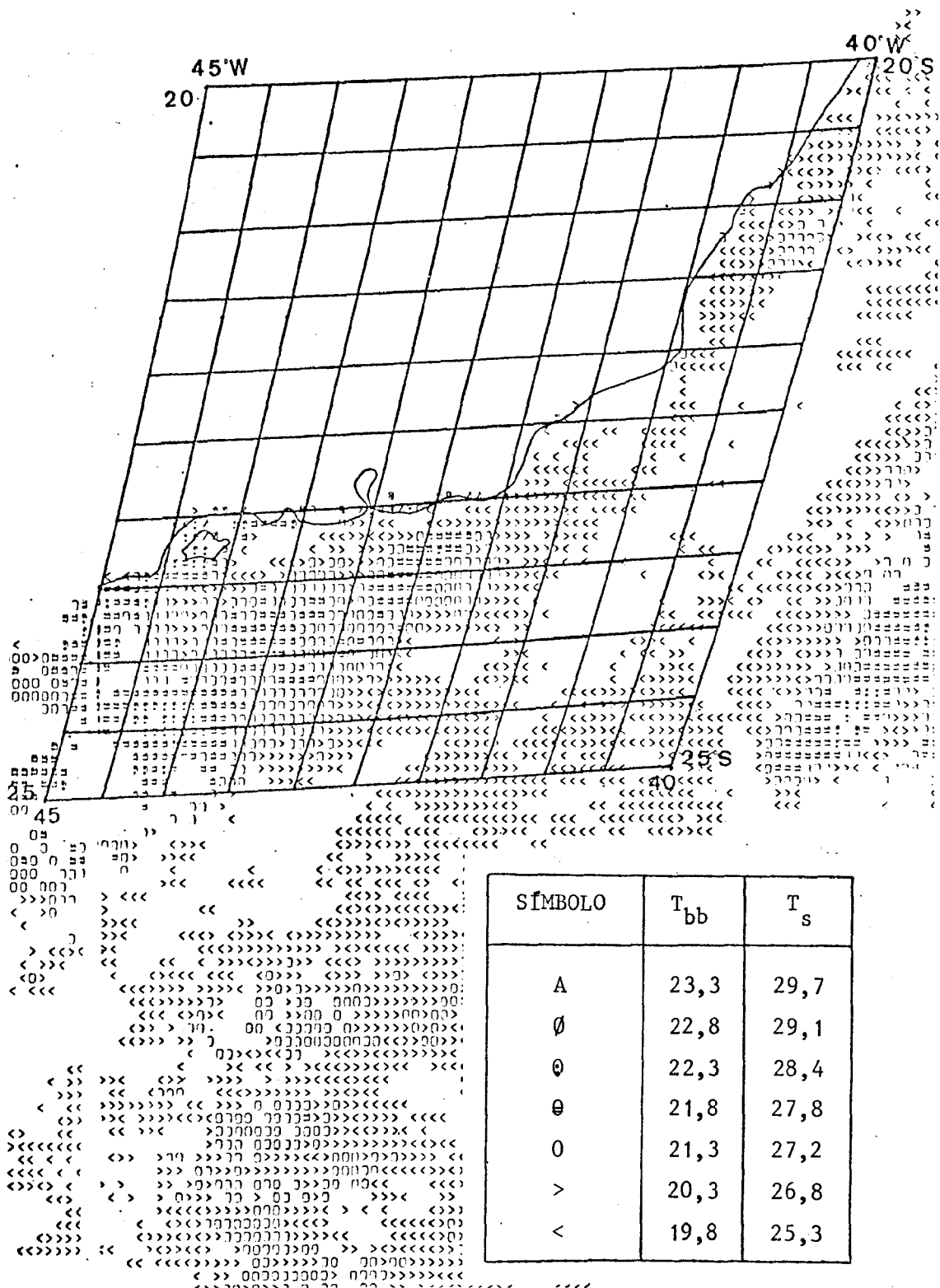


Fig. 6 - Temperatura (°C) da superfície obtida com o VISSR do GOES-5, durante 15 de fevereiro de 1984.

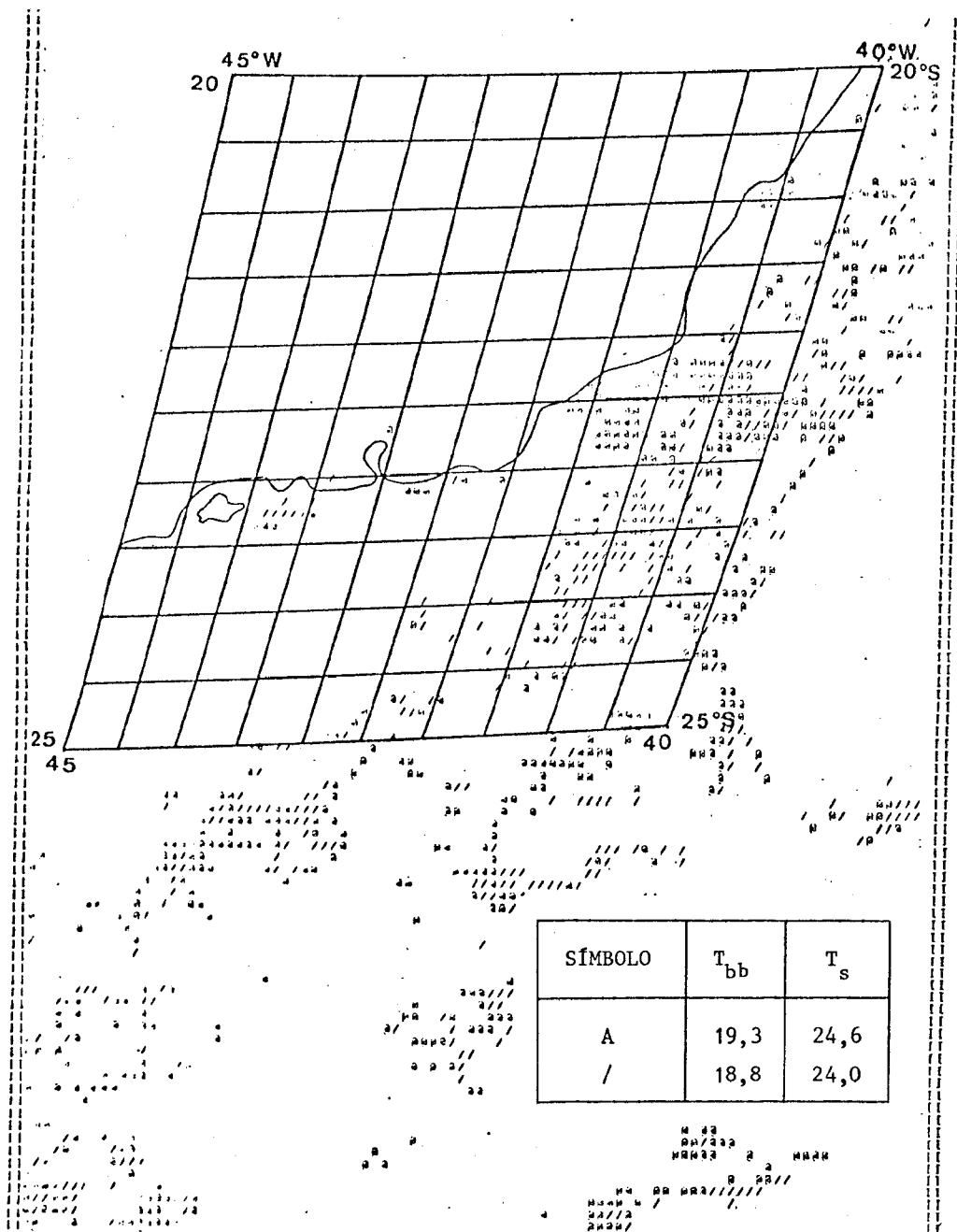


Fig. 7 - Mesma figura como figura 6 mas correspondendo os intervalos da temperatura 24,0 e 24,6°C

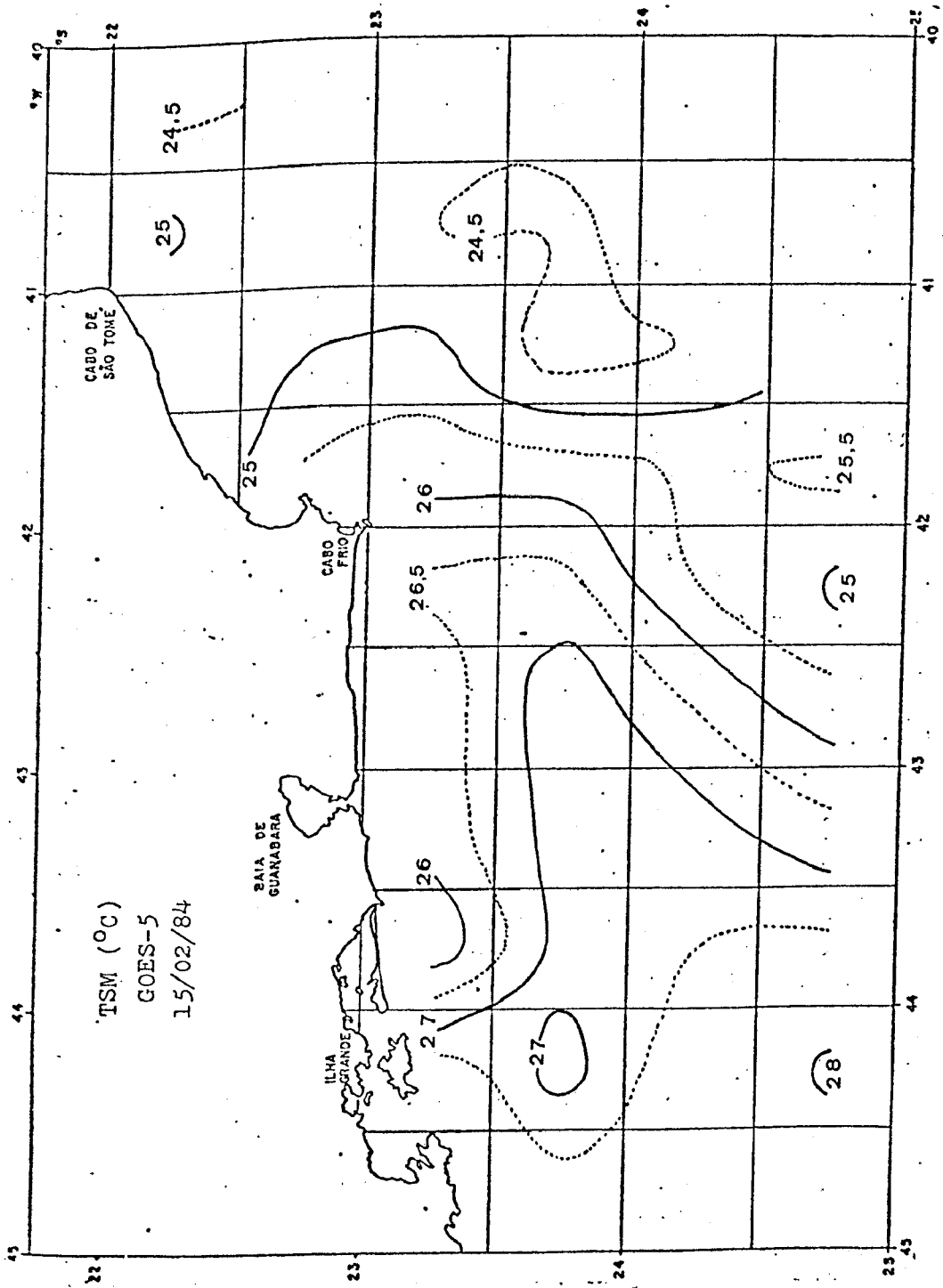


Fig. 8 - Temperatura (°C) da superfície do mar (TSM) obtida com o VISSR do GOES-5 em 15 de fevereiro de 1984

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico/ Instituto de Pesquisas Espaciais e à Comissão Interministerial para Recursos do Mar (CIRM) 4006 pelo suporte financeiro ao subprojeto COSTA (912530).

Ao Centro Nacional de Dados Oceanográficos na Diretoria Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha (MM) pelo fornecimento dos dados oceanográficos utilizados neste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANC, S.; GOÑI, G.; NOVARINE, J. Surface mixed layer temperature and layer depth in water off the Argentinian Coast. *Journal of Geophysical Research*, 88(C10):5987-5996, 1983.
- CAMERLENGO, A.L. Large-scale response of the Pacific Ocean Subarctic front to momentum transfer: a numerical study. *Journal of Physical Oceanography* 12(10):1106-1121, 1982.
- INOSTROZA, V.,H.M.; STEVENSON, M.R.; MOREIRA, J.C. Estudio de un vórtice de la Corriente del Brasil observado el 30 de septiembre de 1983, con el sensor VISSR del satélite GOES-5. *Reunión Plenaria SELPER*, 4., Santiago do Chile, 12-16 noviembre de 1984.
- MIYAKODA, K.; ROSATI, A. The variation of sea surface temperature in 1976 and 1977. 2. The simulation with mixed layer depth. *Journal of Geophysical Research*, 89(C4):6533-6542, 1984.
- O'BRIEN, J.J.; HEBURN, G.W. The state-of-the art in coastal ocean modelling: a numerical model of coastal upwelling off Peru - including mixed layer dynamics. In: GADE, H., EDWARDS, A.; SVENDSEN, H. *Coastal Oceanography*. Plenum, 1983. p.118-164.
- PACITTI, T.; ATKINSON, C.P. Programação e métodos computacionais. Rio de Janeiro, Livros técnicos e científicos, 1977. v.2.
- PENNINGTON, R.H. Introductory computer methods and numerical analysis. London, MacMillan, 1970.
- WOLFF, P.M.; LAEVASTU, T.; PATRO, P. *Oceans from space*. Houston, Gulf, 1969.