

## ALTURA DA CAMADA DE MISTURA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Benedito Crescencio Ribeiro

ABSTRACT - This work describes the methods for determination of the mixing depths at morning and afternoon hours. In over Rio de Janeiro the morning mixing depth is calculated extending a dry adiabat on the "SKEW T - LOG P" diagram from 12 GMT surface temperature to its intersection with vertical temperature profile, observed at the minimum temperature hours. In the afternoon hours a dry adiabat is extended from maximum surface temperature to its intersection with the 12 GMT observed vertical temperature profile.

The mean mixing depth is calculated for each month over the period 1967-1976 through two distinct ways. The results are very well correlated and show a correlation coefficient greater than 0.9. Over Rio de Janeiro the mean maximum mixing depths are heigher in July (1216 m) and lower in october (812 m). The mean mixing depths in the morning hours are heigher in December (633 m) and lower in June (369 m).

## I - Introdução

Em instalações de Centrais Eletro-Nucleares, torna-se necessário o estudo da Climatologia de Difusão Atmosférica da região escolhida. Neste estudo, a altura da camada de mistura é um dos parâmetros de fundamental importância. Como parâmetro climatológico a altura da camada de mistura recebe os mesmos tratamentos estatísticos próprios dos métodos utilizados em climatologia.

É conveniente calcular a altura da camada de mistura a partir de uma sequência de observações, durante 10 anos, realizadas 4 vezes por dia. Entretanto no Brasil, as sondagens são feitas geralmente uma vez por dia, às 12 h G M T. Tem-se diariamente em torno de 15 estações de radiossondagem operando, sendo que algumas raramente funcionam. Os dados de radiossondagem disponíveis são fornecidos só nos níveis padrões, caso fossem de 50 mb em 50 mb, obter-se-ia melhor refinamento dos perfis médios. Entretanto os dados existentes são adequados para cálculos da altura da camada de mistura para qualquer local do país.

## II - Considerações teóricas e métodos de cálculo

Compreende-se por camada de mistura uma lâmina de ar que vai desde a superfície até o nível de primeira inversão térmica observada na radiossondagem. Nesta camada, a temperatura potencial é praticamente constante com a altura, ou melhor, a temperatura do ar livre diminui de acordo com a razão adiabática seca ( $+0,98 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$ ), por causa das turbulências térmica e mecânica que favorecem a difusão horizontal e vertical dos materiais em suspensão no ar.

Geralmente esta camada é máxima durante o dia de tarde, e mínima pela manhã. Em uma camada mais profunda há melhores condições de difusão e numa mais rasa, piores condições. A profundidade da camada de mistura sobre o mar depende notadamente das diferenças de temperatura entre a superfície e o ar. Sobre mares quentes deverá haver uma camada de mistura mais profunda que sobre as águas mais frias, desprezando o efeito dos ventos.

Sobre o litoral a camada de mistura apresenta-se muito complexa em relação à camada de mistura sobre o continente. Durante o dia a brisa marítima que sopra em direção ao continente traz para o litoral a camada de mistura marinha. De noite a brisa terrestre, menos intensa, sopra para o mar levando consigo o ar continental.

Holzworth (1972) fez nos EUA cálculos para determinar a altura da camada de mistura urbana pela manhã, estendendo uma adiabática seca a partir da temperatura mínima à superfície somada a  $5^\circ\text{C}$ , até a interseção com o perfil vertical de temperatura observado às 12 h G M T. O fator  $+ 5^\circ\text{C}$  é estabelecido arbitrariamente a fim de compensar as diferenças na temperatura, à superfície, pela manhã entre zonas urbanas e rurais, pois as observações nos EUA são feitas nos aeroportos rurais ou suburbanos próximos de áreas urbanizadas, e também para compensar os efeitos de aquecimento na superfície após o nascer do sol. As diferenças de temperatura mínima entre zonas rurais e urbanas variam consideravelmente, devendo-se talvez em parte à dimensão da cidade, topografia, estado do solo, velocidade e direção do vento e a outros fatores.

Holzworth (1972) estimou as alturas da camada de mistura pela manhã, no intervalo de tempo desde o amanhecer até a hora do "rush", quando há maior emissão de poluentes não reativos e consequentemente concentrações. Para calcular a altura da camada de mistura de tarde, Holzworth (2) estende uma adiabática seca da temperatura máxima observada à superfície no intervalo de 1200 horas e

1600 horas locais até a interseção com o perfil vertical de temperatura observado às 1200 G M T. As diferenças entre a temperatura máxima de zonas urbanas e rurais são desprezadas.

A altura da camada de mistura de tarde estimada por Holzworth (1972) coincide aproximadamente com o horário de menor concentração dos poluentes urbanos. Calculou-se as alturas mensais da camada de mistura pela manhã e de tarde (altura mensal máxima) no Rio de Janeiro utilizando o diagrama "Skew T - Log P". Escolheu-se este diagrama termodinâmico em virtude de serem os ângulos entre as isotermas e as adiabáticas secas mais adequadas às estimativas e interpolações.

No cálculo da altura mensal da camada de mistura pela manhã usou-se a sondagem feita no horário mais próximo da hora da ocorrência da temperatura mínima, a própria temperatura mínima e a temperatura observada às 9 h locais. Calculou-se então a altura mensal da camada de mistura pela manhã estendendo uma adiabática seca, no diagrama "Skew T - Log P", a partir da média mensal da temperatura à superfície às 9 h locais, até sua interseção com o perfil vertical médio mensal de temperatura do ar livre, observado no horário mais próximo da temperatura mínima. A hipótese física do método é que o transporte vertical de calor sensível se realiza apenas pela convecção induzida pelo aquecimento solar.

O método de Holzworth (2) quando aplicado no Brasil, produz resultados inadequados para a altura da camada de mistura pela manhã, inaceitáveis em aplicações práticas.

Para o horário da tarde calculou-se a altura mensal da camada de mistura (altura mensal máxima) estendendo uma adiabática seca no diagrama "Skew T - Log P" a partir da média mensal da temperatura máxima à superfície até a interseção com o perfil vertical médio mensal de temperatura do ar livre de 9:00 horas locais.

### III - Resultados e Discussão

Na tabela 2 estão os valores obtidos para as alturas mensais da camada de mistura pela manhã e de tarde (altura mensal máxima), respectivamente, no período, esta tabela apresenta, também, as medidas de dispersão, dos dois parâmetros.

Nota-se que pela manhã as alturas da camada de mistura são em média maiores em dezembro (633 m) e menores em junho, (369 m). No

período estudado os valores médios das profundidades de mistura de dezembro são menos variáveis ( $cv \approx 6,9\%$ ) e os de agosto mais variáveis ( $cv \approx 20,2\%$ ) apesar de  $\sigma$  ( $\approx 83,9$  m) indicar maior variabilidade em janeiro. De tarde a camada de mistura apresenta-se, em média, maior no inverno e menor na primavera. Durante o período analisado, os valores médios das alturas da base da camada de inversão tem valores menos variáveis em maio ( $cv \approx 6,4\%$ ) e mais variáveis em abril ( $cv \approx 15,6\%$ ), ocorrendo o valor mais alto em julho (1216 m) e menor em outubro (812 m).

Em virtude de não se dispor, para determinados locais do Brasil de uma sequência longa de dados para cálculo de normais, optou-se pelas médias, obtendo-se valores mensais mais representativos da altura da camada de mistura no Rio de Janeiro.

Para melhor análise e comparação do comportamento das temperaturas do ar superior e à superfície, foram plotadas juntas as médias das temperaturas no período dos diversos níveis, e nota-se que apresentam variações verticais bastante idênticas (Fig. 1). No verão há elevação de temperatura em todos os níveis. Nessa época o aquecimento da superfície da terra, devido à radiação solar, é muito mais intenso, e maior será a convecção que resulta no aumento das temperaturas nos níveis abaixo da camada de inversão. Nota-se ainda que essas temperaturas são menores em julho (inverno).

Na Fig. 2 foram plotados os valores médios mensais do período das alturas da camada de mistura de tarde (altura mensal máxima) e da camada de mistura pela manhã, juntamente com a quantidade de horas de insolação, com o propósito de se comparar o efeito desta sobre a altura da camada de mistura. A fig. 2 mostra que a quantidade de horas de insolação e a altura da camada de mistura de tarde (altura mensal máxima) em média, no período, não são muito dependentes. No verão, apesar da insolação ser em média maior, a camada de mistura é rasa, enquanto que no inverno a insolação é, em média, menor e a camada de mistura apresenta-se mais profunda. Embora se possa observar que existe alguma forma de dependência entre os dois parâmetros.

O comportamento da camada de mistura pela manhã é muito complexo, devido ao efeito das inversões noturnas. Apresenta-se, em média, menor em junho (369 m) e maior em dezembro (633 m).

Do ponto de vista teórico, o aumento da insolação tem como consequência o aumento da temperatura máxima à superfície, que

por sua vez implica diretamente no aumento da profundidade da camada de mistura. Entretanto, existem outros fenômenos, tais como advecção de massas de ar, precipitação, nebulosidade, umidade do solo, etc. que atuam provocando efeitos opostos a esses processos.

A fig. 3, onde foram plotados os valores da altura da camada de mistura de tarde (altura mensal máxima) e a média da precipitação total, e postas lado a lado, de modo a possibilitar melhor comparação. Nota-se que no verão a precipitação total é maior, sendo a camada de mistura mais rasa e, no inverno, a precipitação total é menor e a camada de mistura apresenta-se mais profunda (ver fig. 3). Apresenta-se a Fig. 4 com os valores das médias mensais das temperaturas máximas no período e quantidade de horas de insolação. Na Fig. 4 observa-se que só a partir do mês de setembro a média da temperatura máxima apresenta alguma dependência da média mensal de insolação.

A Fig. 5 apresenta a frequência percentual acumulada do período 1967-1976 da altura mensal da camada de mistura, e verificou-se que pela manhã:

- há apenas 3% de ocorrência de alturas menores que 300 metros;
- há 50% de ocorrência de alturas menores que 489 metros;
- há 80% de ocorrência de alturas até 581 metros;
- entre 300 e 500 metros estão 52% das ocorrências;
- e, finalmente 25% dos valores estão acima de 560 metros.

De tarde verificou-se que:

- entre 500 e 700 metros há, apenas, 1% de ocorrência;
- há 50% de ocorrência de alturas menores que 1020 metros;
- há 83% de ocorrência de alturas até 1200 metros;
- entre 800 e 1200 metros estão 73% das ocorrências;
- e, finalmente 10% dos valores estão acima de 1270 metros.

Na Figura 6 foram plotadas, juntas, as médias das alturas máxima da camada de mistura ( $\bar{H}_x$ ), as médias das temperaturas máximas ( $\bar{T}_x$ ), os índices absolutos de insolação (IAI) e os índices absolutos de precipitação (IAP).

Onde:

$$(IAI)_j = \left( \frac{(INT)_j}{(HT)_j} \times 200 \right), \quad (I)$$

$$(IAP)_j = \left( \frac{(PT)_j}{(HT)_j} \times 100 \right), \quad (II)$$

onde  $j = 1, 2, 3, \dots, 12$ , são os meses do ano

$$(INT)_j = \sum_{i=1}^N I_{ji} \quad (\text{hs}),$$

onde  $(INT)_j$  = número de horas de insolação havidas nos meses  $j$  do período e  $I_{ji}$  (hs) é o número total de horas de insolação no mês  $j$  em cada ano  $i$ .

onde  $i = 1, 2, 3, \dots, N$

$$(PT)_j = \sum_{i=1}^N P_{ji} \quad (\text{mm}),$$

onde  $(PT)_j$  = quantidade de precipitação havida nos meses  $j$  do período,

e  $P_{ji}$  (mm) é a precipitação total no mês  $j$  em cada ano  $i$ .

$$(HT)_j = \sum_{i=1}^N h_{ji},$$

onde  $(HT)_j$  = número total de horas no período correspondentes a um dado mês  $j$ ,

e  $h_{ji}$  = número total de horas no mês  $j$  em cada ano  $i$ .

Observa-se que o índice absoluto de insolação (IAI) é maior em janeiro e menor em setembro e outubro. O índice absoluto de precipitação é maior em fevereiro e menor em junho e julho.

Com o propósito de verificar se o método usado no cálculo das alturas de mistura, pelo perfil médio do mês, produz resultados que realmente representam a camada de mistura média do mês e do período considerado quando se fazem as médias dos valores mensais sobre todo o período desejado, foram calculadas as sondagens médias do período e determinadas as alturas  $\bar{H}_9^*$  e  $\bar{H}_x^*$  do período. Desse modo, se  $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_x^*$  se correlacionarem bem, assim como  $\bar{H}_9$  e  $\bar{H}_9^*$ , tem-se um método mais curto de obter valores das alturas de mistura para um período longo.

Na tabela 1 estão os valores médios das alturas da camada de mistura pela manhã ( $\bar{H}_9$  e  $\bar{H}_9^*$ ) e no horário da tarde ( $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_x^*$ ) no período de 1967 a 1976.  $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_9$  foram obtidos através da média arit

métrica de  $H_x$  e  $H_9$  (tabelas 01 e 02).

Determinaram-se os coeficientes de correlação ( $r$ ) no período, entre  $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_x^*$  e entre  $\bar{H}_9$  e  $\bar{H}_9^*$ , cujos valores são respectivamente 0,95 e 0,98. Esses coeficientes indicam um nível de significância maior que 1% para a correlação entre os dois métodos. As retas de regressão são respectivamente:

$$(I) \bar{H}_x = 0,8493 \bar{H}_x^* + 151,5$$

$$(II) \bar{H}_9 = 1,0205 \bar{H}_9^* + 3,1$$

Como se pode ver nas Figs. 8 e 9 os pontos se ajustam em torno das retas dadas pelas equações (I) e (II). Conclui-se que existe boa correlação entre os dois procedimentos e é praticamente indiferente calcular esses parâmetros médios por um método ou por outro.

Na Fig. 7 nota-se que no horário da tarde, em média, as maiores profundidades de mistura ocorrem no outono-inverno e as menores na primavera, enquanto que pela manhã em média as maiores profundidades ocorrem na primavera-verão e as menores no outono-inverno.

#### IV - Conclusões

No Rio de Janeiro, no período de 1967 a 1976 em todos os níveis, as temperaturas mais altas ocorreram em janeiro e fevereiro (Fig. 1) e as temperaturas mais baixas em julho. O IAI é máximo em janeiro e decresce ligeiramente desse mês até abril. Em maio, julho e agosto há ligeiro aumento do IAI. Em setembro e outubro seu valor é mínimo e daí até janeiro aumenta. Observa-se que enquanto o IAI torna-se mínimo em setembro-outubro, o IAP começa novamente a subir depois de ter passado por valores mínimos nos meses de junho e julho. Portanto, os meses mais secos coincidem com os meses de temperaturas mais baixas. É importante notar que a camada de mistura apresenta-se pouco profunda no verão e mais profunda no inverno, em julho (1216 m) e daí em diante começa a decrescer até atingir um valor mínimo em outubro (812 m) (Fig. 2). Isto ocorre porque a cidade do Rio de Janeiro está sujeita ao predomínio da camada de mistura marinha. No verão as águas costeiras apresentam-se com temperaturas mais baixas do que o ar. O grande aquecimento continental intensifica as brisas marítimas, que trazem consigo a camada de mistura mari

nha, que é mais estável.

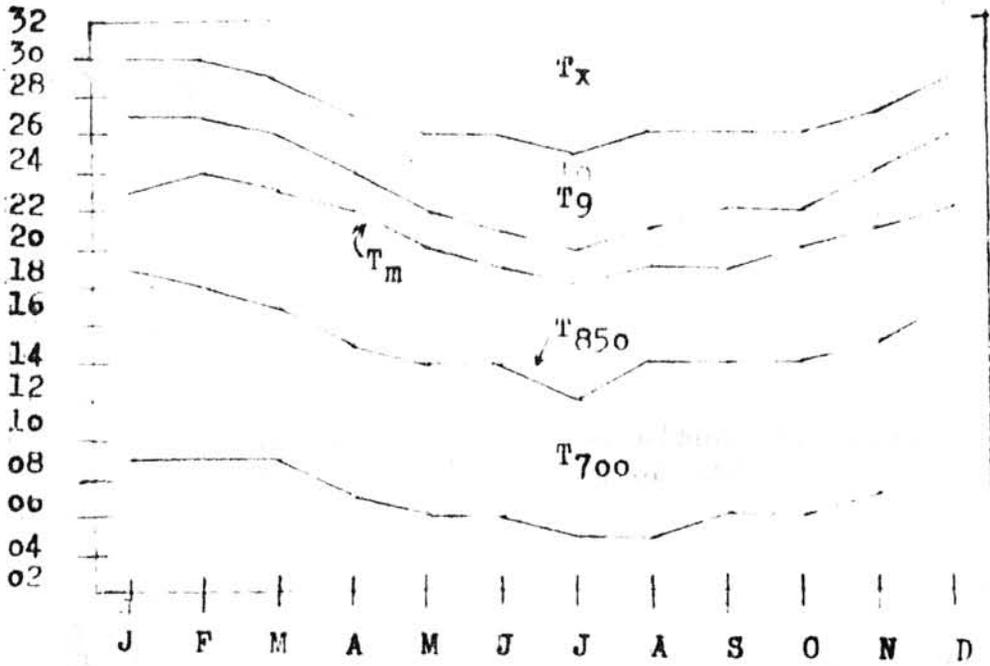
Nos meses de inverno, no Rio de Janeiro, embora as temperaturas sejam menores (Fig. 1) a camada de mistura é mais profunda provavelmente porque as águas costeiras são mais quentes do que o ar e há uma fraca convecção produzida pela diferença de temperatura entre o mar e a atmosfera. Conclui-se que no horário da tarde, nos meses de inverno, as condições de difusão atmosférica em média são pouco afetadas pela altura da inversão térmica.

A altura da camada de mistura pela manhã é máxima em dezembro (633 m) e daí para a frente começa a decrescer até junho, quando é mínima (369 m). Portanto, o comportamento das alturas da camada de inversão pela manhã acompanha o comportamento das temperaturas durante o ano. A massa de água oceânica torna a camada de mistura mais úmida no litoral. A umidade impede a formação de inversões noturnas intensas e conseqüentemente de condições de difusão muito desfavoráveis pela manhã, como acontece em locais distantes de massas d'água.

A altura média da camada de mistura no período de 1967 a 1976 foi calculada por dois procedimentos diferentes. Determinou-se  $\bar{H}_x^*$  e  $\bar{H}_9^*$  pela sondagem média do período e ao mesmo tempo obteve-se  $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_9$  fazendo a média dos valores obtidos em cada ano estudado. O coeficiente de correlação ( $r$ ) entre  $\bar{H}_x$  e  $\bar{H}_x^*$  de tarde e entre  $\bar{H}_9$  e  $\bar{H}_9^*$  pela manhã é maior que 0,9, portanto, com nível de significância maior que 1%. Esses resultados obtidos pelos dois procedimentos visam dois objetivos: primeiro verificar a aplicabilidade do método ora desenvolvido no Brasil; segundo testar os resultados. Conclui-se que os dois procedimentos produzem valores médios quase que idênticos ( $r > 0,9$ ) e que, apesar da grande quantidade de interpolações e cálculos necessários, o trabalho foi conduzido com rigor. As alturas da camada de mistura no horário da tarde, em média, são em mais de 54% dos casos superiores a 1000 m. Pela manhã, tem-se, em média, quase 54% das inversões abaixo de 500 m.

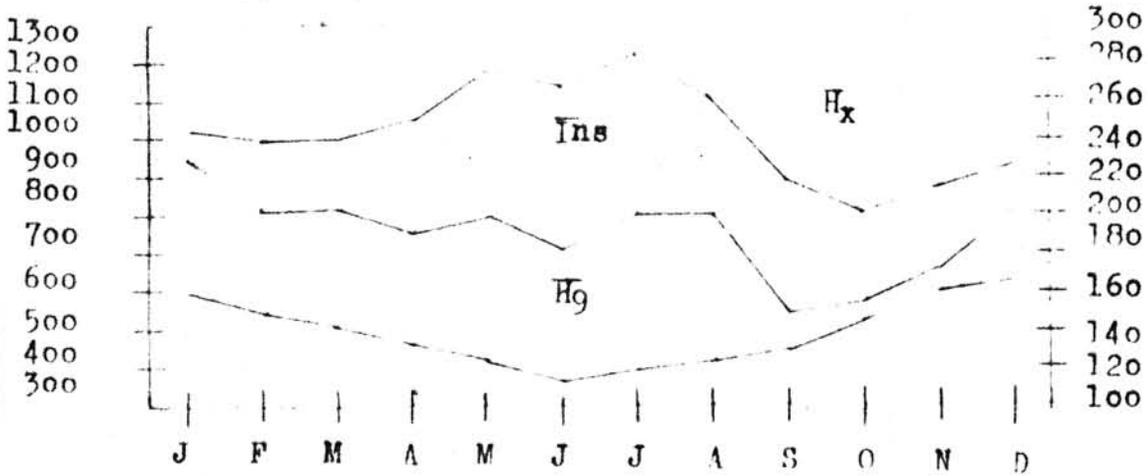
Fig.1: Perfis médios das temperaturas obtidas pelas radiosondagens, no Rio, no período de 1967 a 1976.

Médias das temperaturas em °C



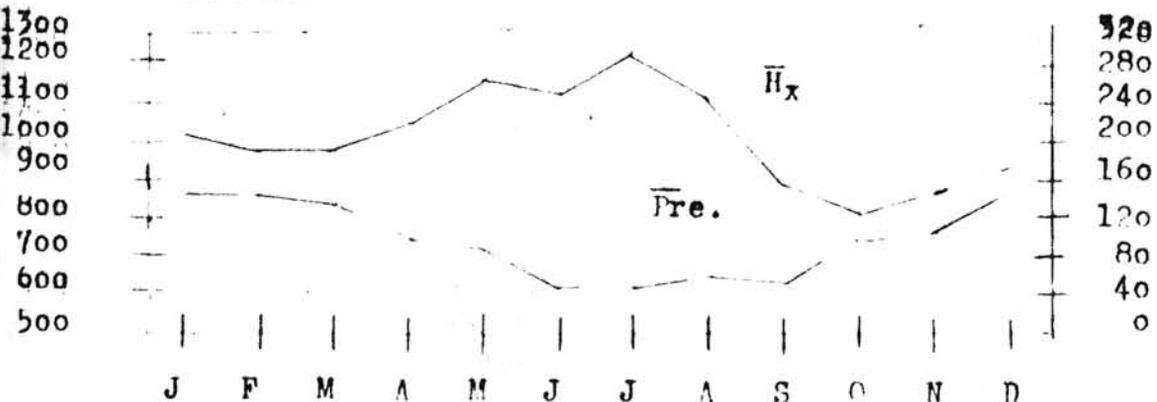
T<sub>x</sub>, T<sub>g</sub>, T<sub>m</sub>, T<sub>850</sub> e T<sub>700</sub> - Média das temperaturas máxima, às 9 horas locais, mínima, em 850 mb e 700 mb respectivamente, no período.

Fig.2: Comparação das médias de H<sub>x</sub> e H<sub>g</sub> com as médias mensais da insolação no Rio, no período de 1967 a 1976.



Média mensal da insolação em horas.

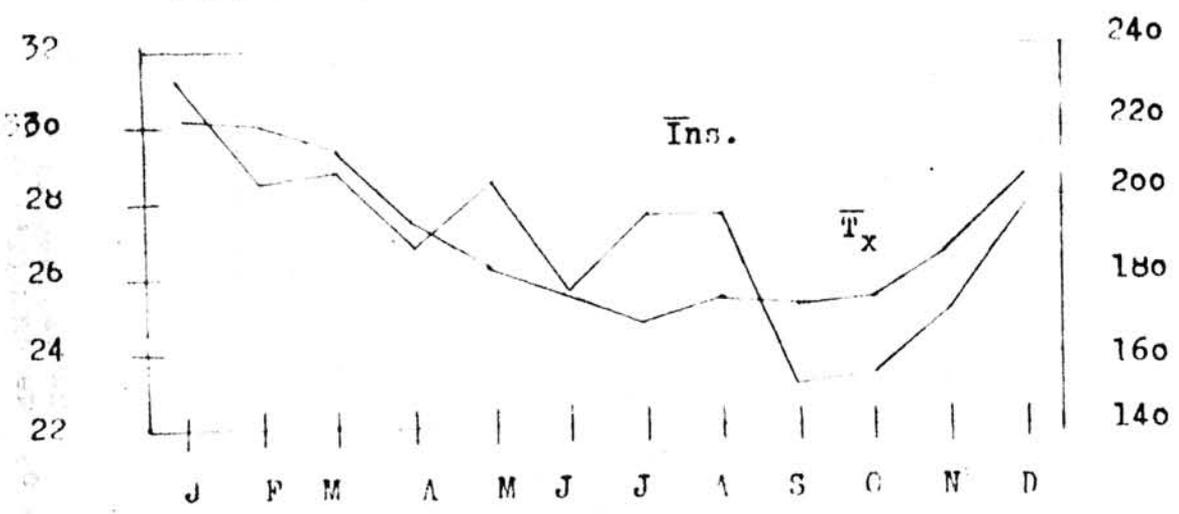
Fig.3: Comparação das médias de H<sub>x</sub> e H<sub>g</sub> com as médias mensais da precipitação no Rio, no período de 1967 a 1976.



Média mensal da precipitação em milímetros.

Fig.4: Comparação das médias de  $T_x$  com as médias mensais da insolação no Rio, no período de 1967 a 1976.

Média das temperaturas em °C.



insolação em horas

Fig.5: Frequência percentual acumulada de  $H_x$  e  $H_g$  no Rio, no período de 1967 a 1976.

Alturas  $H_x$  e  $H_g$  em metros

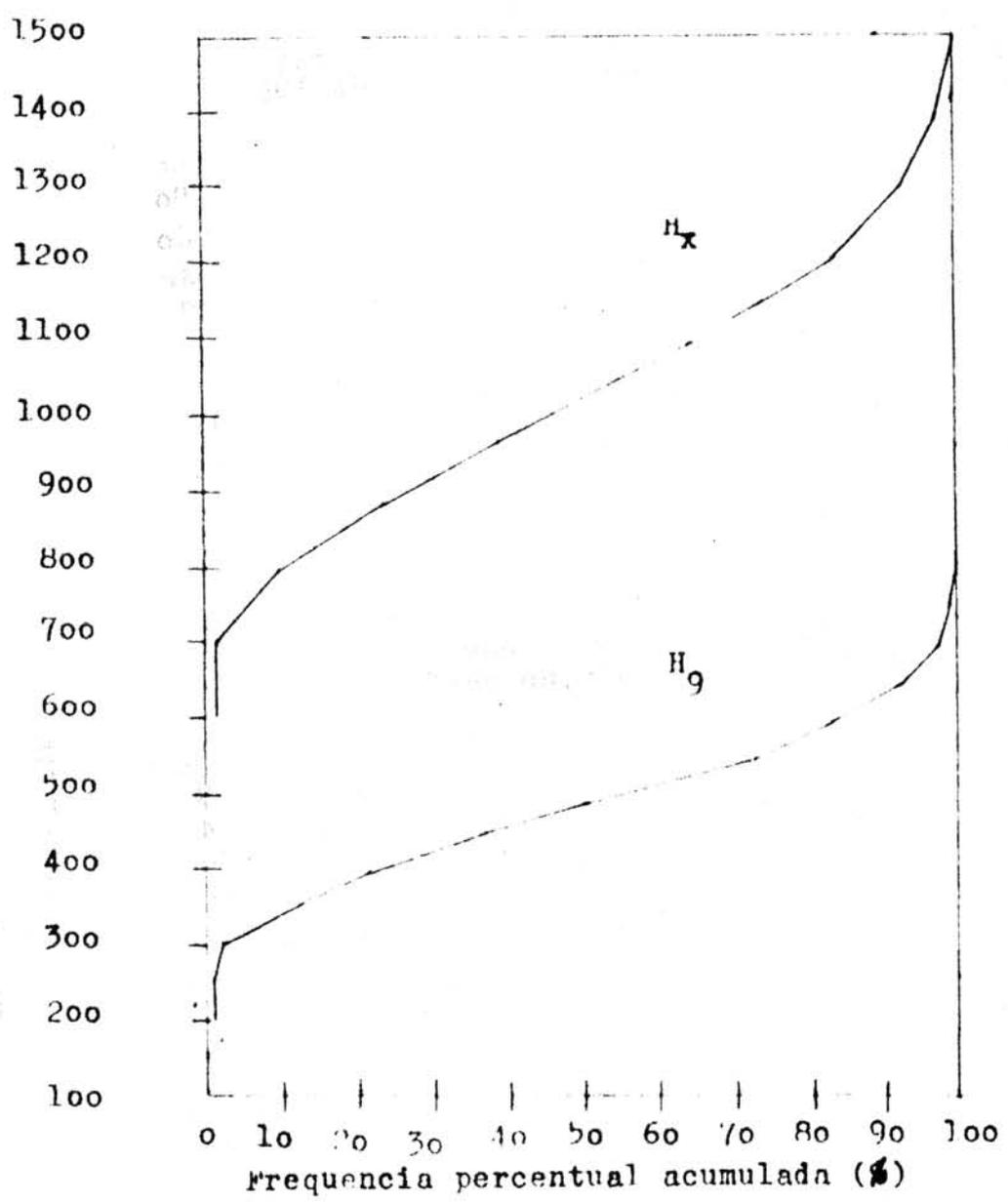
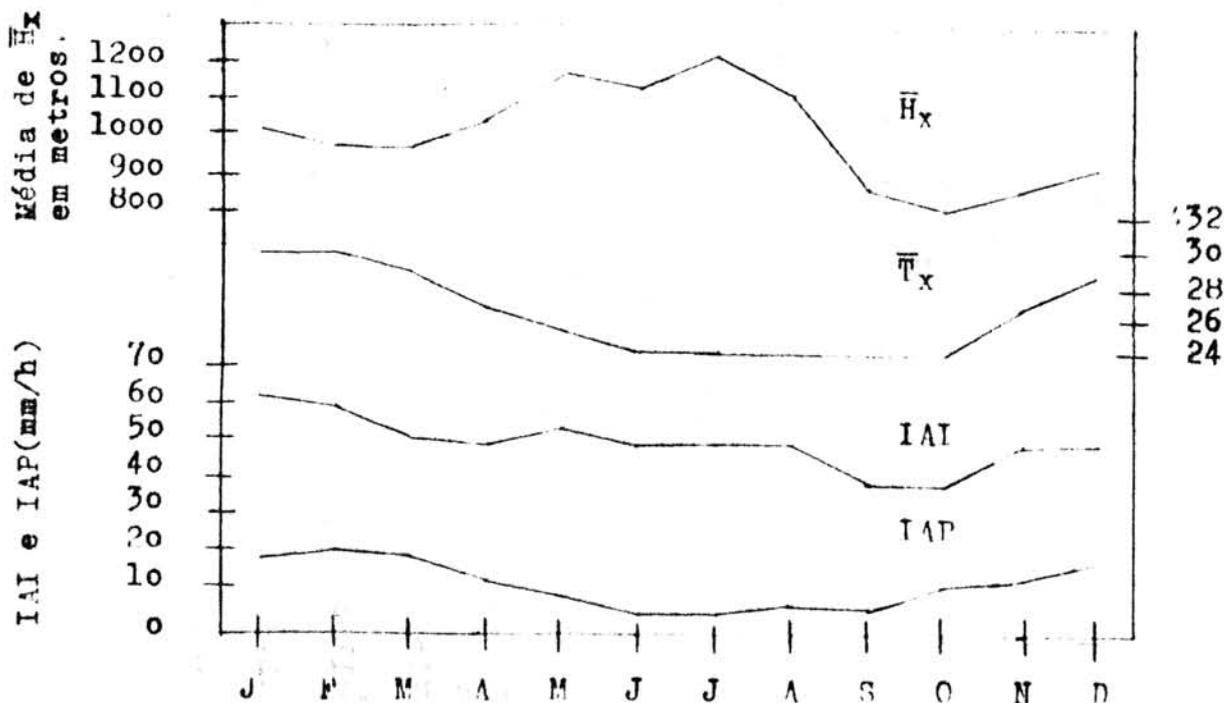


Fig.6: Comparação entre as médias de  $\bar{H}_x$  e as médias de  $\bar{T}_x$  com os índices absolutos de insolação (IAI) e precipitação (IAP), no Rio, no período de 1967 a 1976.



Média de  $\bar{T}_x$  em  $^{\circ}C$ .

Fig.7: Comparação entre as médias das alturas ( $\bar{H}_x^*$ ,  $\bar{H}_g^*$ ) e as alturas ( $H_x$ ,  $H_g$ ) determinadas pelas sondagens médias, no período de 1967 a 1976.

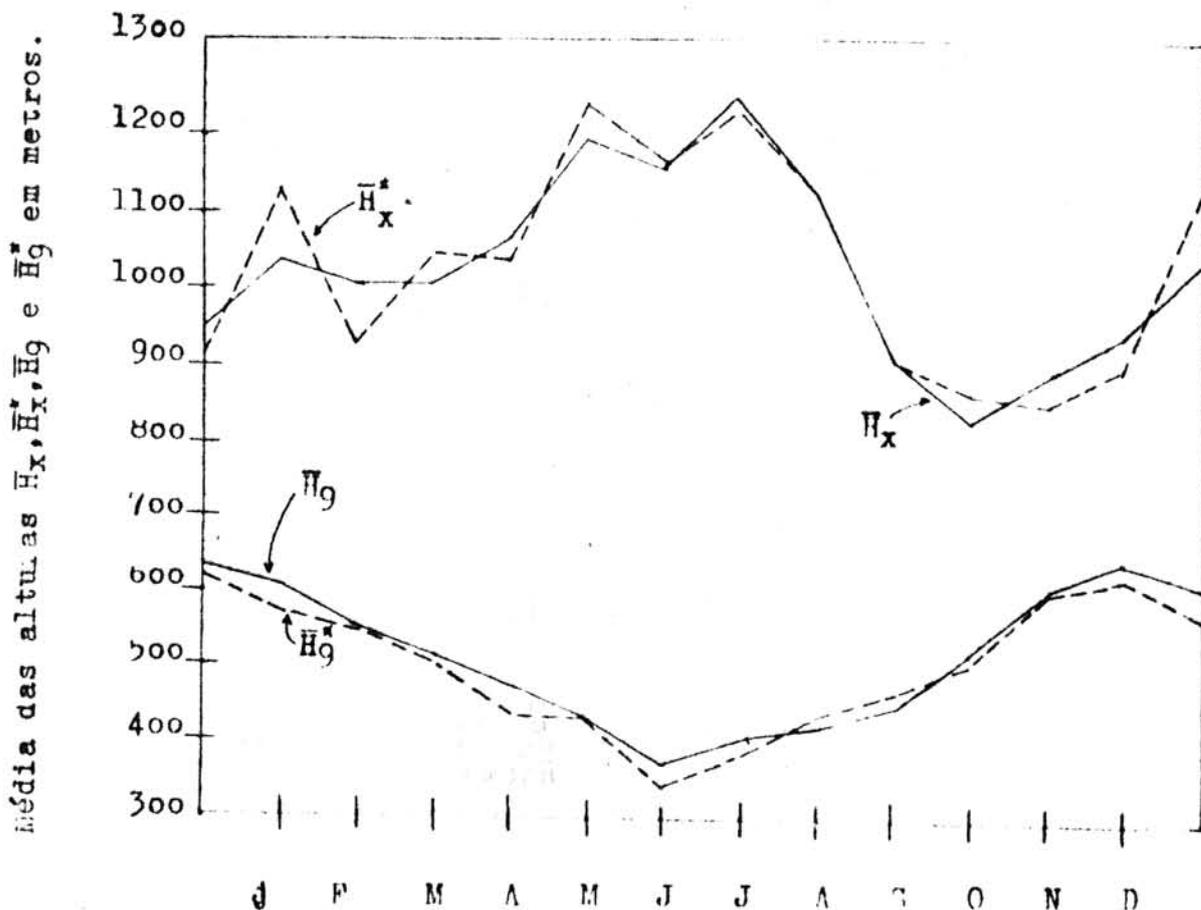


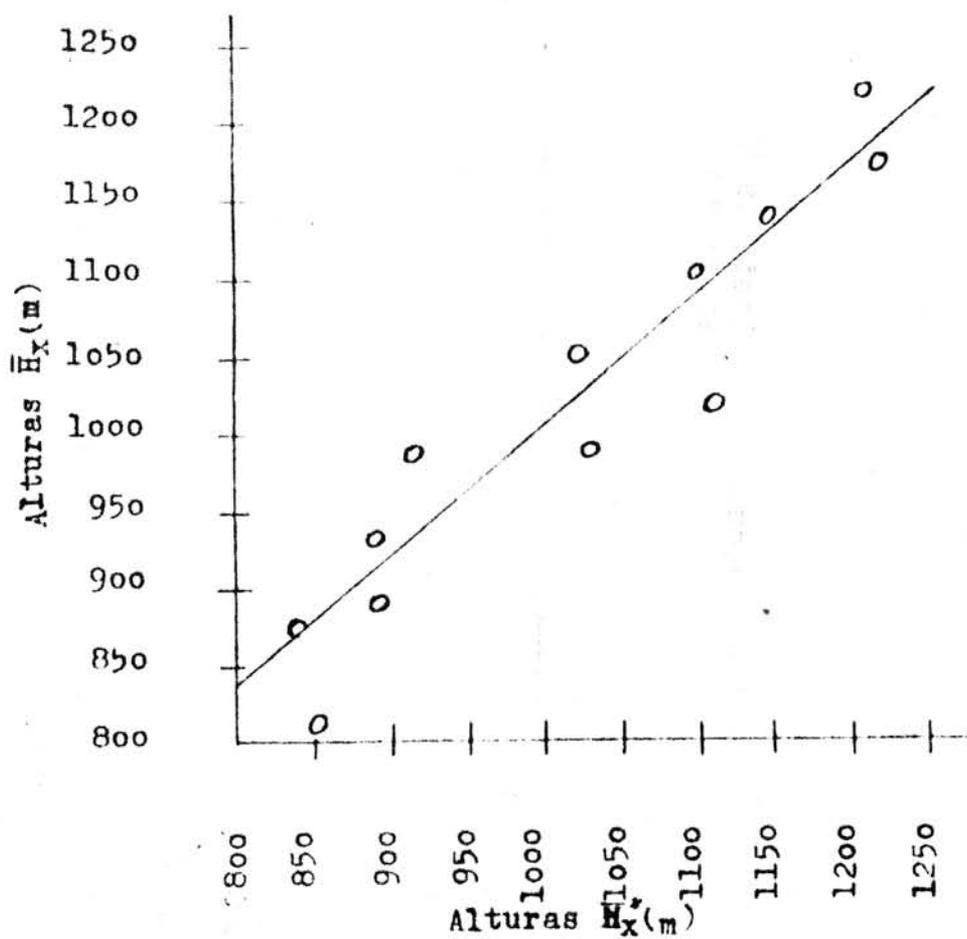
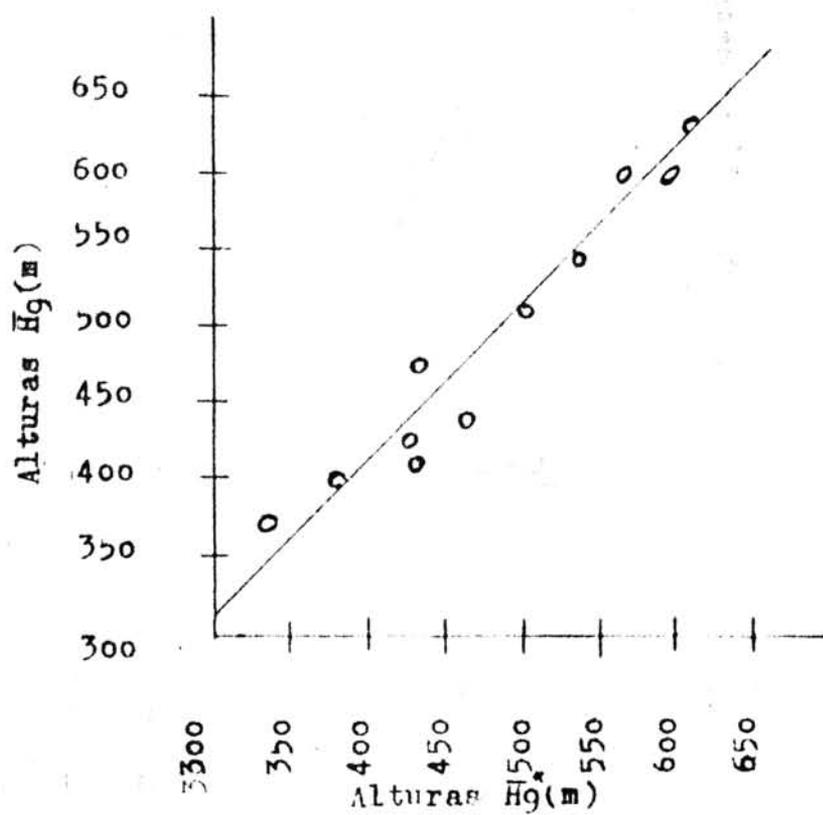
Fig.8:Reta de regressão de  $\bar{H}_x$  para  $H_x^*$ .Fig.9:Reta de regressão de  $H_g$  para  $\bar{H}_g$ .

Tabela 1

| Índices absolutos de insolação e precipitação no Rio, no período de 1967 a 1976. |              | Comparação entre as médias das alturas ( $\bar{H}_x, \bar{H}_g$ ) e as alturas ( $H_x, H_g$ ) obtidas pelas sondagens médias, no Rio no período de 1967 a 1976. |     |               |                    |                    |              |              |     |
|--|--------------|---|-----|---------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|-----|
| INTx10<br>(hs)   | Px10<br>(mm) | HTx10<br>(hs)   | IAI | IAP<br>(mm/h) | $\bar{H}_x$<br>(m) | $\bar{H}_g$<br>(m) | $H_x$<br>(m) | $H_g$<br>(m) | MES |
| 2315   | 1468         | 7440  | 62  | 20            | 1022               | 1113               | 602          | 565          | JAN |
| 2052   | 1506         | 6792  | 60  | 22            | 990                | 913                | 546          | 536          | FEV |
| 2077   | 1408         | 7440  | 56  | 19            | 993                | 1029               | 511          | 498          | MAR |
| 1894   | 911          | 7200  | 53  | 14            | 1053               | 1018               | 474          | 433          | ABR |
| 2034   | 835          | 7440  | 55  | 11            | 1175               | 1223               | 425          | 425          | MAY |
| 1760   | 450          | 7200  | 49  | 6             | 1141               | 1152               | 369          | 344          | JUN |
| 1972   | 447          | 7440  | 53  | 6             | 1216               | 1214               | 399          | 379          | JUL |
| 1963   | 582          | 7440  | 53  | 8             | 1105               | 1102               | 414          | 429          | AGO |
| 1797   | 543          | 7200  | 41  | 7             | 890                | 890                | 444          | 456          | SET |
| 1532   | 985          | 7440  | 41  | 13            | 812                | 850                | 507          | 503          | OUT |
| 1700   | 1082         | 7200  | 47  | 15            | 874                | 837                | 602          | 595          | NOV |
| 1976   | 1466         | 7440  | 53  | 20            | 931                | 892                | 635          | 608          | DEZ |

Tabela 2

valores médios e dispersão dos dados de  $H_x$  e  $H_g$  no Rio, no período de 1967 a 1976.

| $H_x$ | *<br>m xlo | $\sigma$<br>m xlo | CV<br>% | $H_g$ | *<br>m xlo | $\sigma$<br>% | CV<br>% | CV       |       | MES |
|-------|------------|-------------------|---------|-------|------------|---------------|---------|----------|-------|-----|
|       |            |                   |         |       |            |               |         | $\sigma$ | m xlo |     |
| 10220 | 10017      | 1546              | 151     | 6020  | 830        | 130           |         |          |       | JAN |
| 9900  |            | 238               | 95      | 5460  | 635        | 116           |         |          |       | FEV |
| 993   |            | 865               | 87      | 5115  | 574        | 112           |         |          |       | MAR |
| 10535 |            | 1649              | 156     | 4740  | 738        | 156           |         |          |       | ABR |
| 11750 | 11232      | 757               | 64      | 4250  | 692        | 163           |         |          |       | MAI |
| 11410 |            | 1410              | 124     | 3690  | 482        | 133           |         |          |       | JUN |
| 12160 | 10703      | 1287              | 106     | 3990  | 736        | 182           |         |          |       | JUL |
| 11050 |            | 1457              | 132     | 4140  | 838        | 202           |         |          |       | AGO |
| 8900  |            | 933               | 105     | 4440  | 751        | 169           |         |          |       | SET |
| 8120  | 8723       | 1183              | 146     | 5070  | 594        | 117           |         |          |       | OUT |
| 8740  |            | 937               | 107     | 6020  | 826        | 137           |         |          |       | NOV |
| 9310  |            | 1242              | 133     | 6330  | 439        | 69            |         |          |       | DEZ |

\* - valor médio por estação (xlo)

## BIBLIOGRAFIA

- HOLZWORTH, G.C. 1967. Mixing Depths, Wind Speeds and Air Pollution Potential for Selected Locations in the United States, J. Appl. Met., V. 6, 1039-1044.
- HOLZWORTH, G.C. 1972. Mixing Heights Wind Speeds, and Potential for Urban Air Pollution Throughout the Contiguous United States, U.S. Environment Protection Agency, Report nº AP 101.
- NICOLLI, D. 1977. Altura da Camada de Inversão Térmica e Potencial de Poluição do Ar, CNEN - DR/GAL-001-77.
- NICOLLI, D. 1978. Um Método para Determinação da Altura da Camada de Inversão Térmica e da Profundidade da Camada de Mistura Efetiva. ATOMINDEX, V. 09 (26), Ref. 417440; CNEN-DR nº 70/78.