

ANALISIS ESTADISTICO DE LA ESTABILIDAD ESTATICA DE LA ATMOSFERA SOBRE SANTIAGO A PARTIR DE RADIOSONDEOS ATMOSFERICOS.

Patricio Aceituno G.

RESUMEN

*Utilizando la información proporcionada por radiosondeos realizados a lo largo de tres períodos intensivos de mediciones meteorológicas, se describen las características relevantes del comportamiento de la atmósfera sobre Santiago en cuanto a su estabilidad estática.*

1. INTRODUCCION.-

El conocimiento de las condiciones medias de estabilidad atmosférica constituye una necesidad básica en cualquier estudio para determinar la potencialidad de difusión atmosférica en una región. En una ciudad, esta evaluación es particularmente necesaria al considerar la gran cantidad de sustancias que diariamente se inyectan a la atmósfera y que es preciso eliminar por difusión.

La noción de una capa de inversión térmica limitando la difusión vertical es ampliamente conocida. Esta situación revela un caso extremo en la estabilidad estática de la atmósfera y su incidencia sobre Santiago ha sido ya analizada (Aceituno et. al, 1972). En esta ocasión se considera en forma más general el comportamiento de la atmósfera en cuanto a su estabilidad estática, caracterizando a través de frecuencias de ocurrencia, desde los casos más inestables a aquéllos de extrema estabilidad.

Se analiza la información recogida en varios cientos de radiosondeos cautivos, a lo largo de tres períodos de mediciones intensivas. Estas fueron efectuadas en la Sede de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile (Fundo Antumapu), a unos 15 Km del centro de la ciudad (Lat. 33° 34' S, Long. 70° 38' W).

## 2. DEFINICIONES.

El tipo de estabilidad estática se define para una atmósfera en equilibrio hidrostático, es decir, aquélla en que la fuerza asociada al gradiente vertical de presión, equilibra el peso de la columna de aire. Adicionalmente, se suponen transformaciones termodinámicas adiabáticas cuando una masa de aire se desplaza verticalmente. En estas condiciones y cuando no se produce saturación, la variación térmica experimentada por dicha masa está dada por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_a = -\frac{g}{c_p} = \Gamma = -0.98 \text{ (}^\circ\text{C/100 m)}$$

$g$  : aceleración de gravedad

$c_p$  : calor específico del aire a presión constante.

Si el gradiente térmico observado en una capa atmosférica coincide con el adiabático, dicho estrato presentará una estabilidad neutra; no aparecerán fuerzas de empuje sobre un elemento de masa desplazado verticalmente.

La situación es diferente si el gradiente térmico no coincide con la variación adiabática. Una disminución de la temperatura con la altura, mayor que  $\Gamma$  da lugar a una capa inestable. En este caso aparecen fuerzas de empuje, que tienden a separar de su posición cualquier elemento de masa sometido a un desplazamiento vertical.

Esta fuerza de empuje también aparece en el caso de un gradiente vertical mayor que  $-0.98$  ( $^{\circ}\text{C}/100$  m) pero con signo opuesto a la anterior. La capa atmosférica es entonces estable y ante cualquier perturbación vertical presenta fuerzas de restitución que inhiben el movimiento vertical.

Como se advierte de los párrafos anteriores, la situación de inversión térmica constituye un caso extremo de estabilidad pudiendo observarse estratos igualmente estables incluso con un gradiente térmico negativo.

La clasificación de los tipos de estabilidad se ha realizado utilizando un criterio ya definido (Gifford, 1975) cuya descripción aparece detallada en la Tabla 1. Si bien, casi todos los tipos estables corresponden a situaciones de inversión térmica, uno por lo menos (E) incluye las capas isotermas o con gradientes levemente decrecientes.

TABLA 1

TIPOS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA DE ACUERDO AL GRADIENTE TERMICO VERTICAL (GIFFORD, 1975)

$\Delta T/\Delta Z$ ( $^{\circ}\text{C}/100$ m)	Tipo	Descripción
$< -1.9$	A	Extremadamente inestable
$-1.9$ a $-1.7$	B	Inestabilidad moderada
$-1.7$ a $-1.5$	C	Ligeramente inestable
$-1.5$ a $-0.5$	D	Neutralidad
$-0.5$ a $1.5$	E	Ligeramente estable
$1.5$ a $4.0$	F	Estabilidad moderada
$> 4.0$	G	Estabilidad extrema

### 3. METODOLOGIA.-

El análisis estadístico se ha realizado usando la información entregada por radiosondeos cautivos, realizados durante tres períodos de mediciones intensivas.

Los radiosondeos se realizaron cada dos horas durante todo el día, alcanzando una altura promedio cercana al kilómetro. La información fue procesada mediante computador entregándose para cada radiosondeo la temperatura estimada cada 100 m. Con estos valores se calculó posteriormente los gradientes térmicos y con éstos los tipos de estabilidad. La Tabla 2 presenta el número de radiosondeos realizados en cada período.

TABLA 2

Año	Período	N° de radiosondeos
1971	16 al 31 Agosto	135
1972	17 Agosto al 1° Sept.	136
1975	13 Mayo al 26 Mayo	158

### 4. SELECCION DE LA INFORMACION METEOROLOGICA Y CARACTERISTICA DE CADA PERIODO.-

La cantidad de información disponible es limitada y por lo tanto los valores estadísticos calculados no tienen una validez climatológica, puesto que reflejan condiciones meteorológicas particulares de cada período de medición. Sin embargo, como una forma de tener una base común de comparación entre cada período se ha eliminado de ellos aquellos días afectados por situaciones frontales. El análisis estadístico presentado considera sólo aquellos días con buenas condiciones de tiempo, con cielos despejados o parcialmente cubiertos. Desde el punto de vista de la estabilidad



de la atmósfera cerca del suelo se han considerado sólo días "normales" en el sentido que presentan condiciones estables durante la noche y neutras o inestables en las horas de mayor calentamiento de la superficie.

El análisis detallado de las condiciones meteorológicas en la región durante los períodos de Agosto de 1971 y 1972 ha sido realizado por Rutilant (1973). Basado en este trabajo y con las restricciones previamente impuesta a los datos, se seleccionaron nueve días y medio en Agosto 1971 y cuatro en Agosto 1972, período este último caracterizado por una gran actividad frontal.

En el análisis estadístico se ha considerado en forma conjunta los dos períodos de Agosto haciéndolos representativos de condiciones típicas de fines de invierno. Considerando la escasez de datos para alturas superiores a 700 m no se ha considerado las observaciones sobre ese nivel.

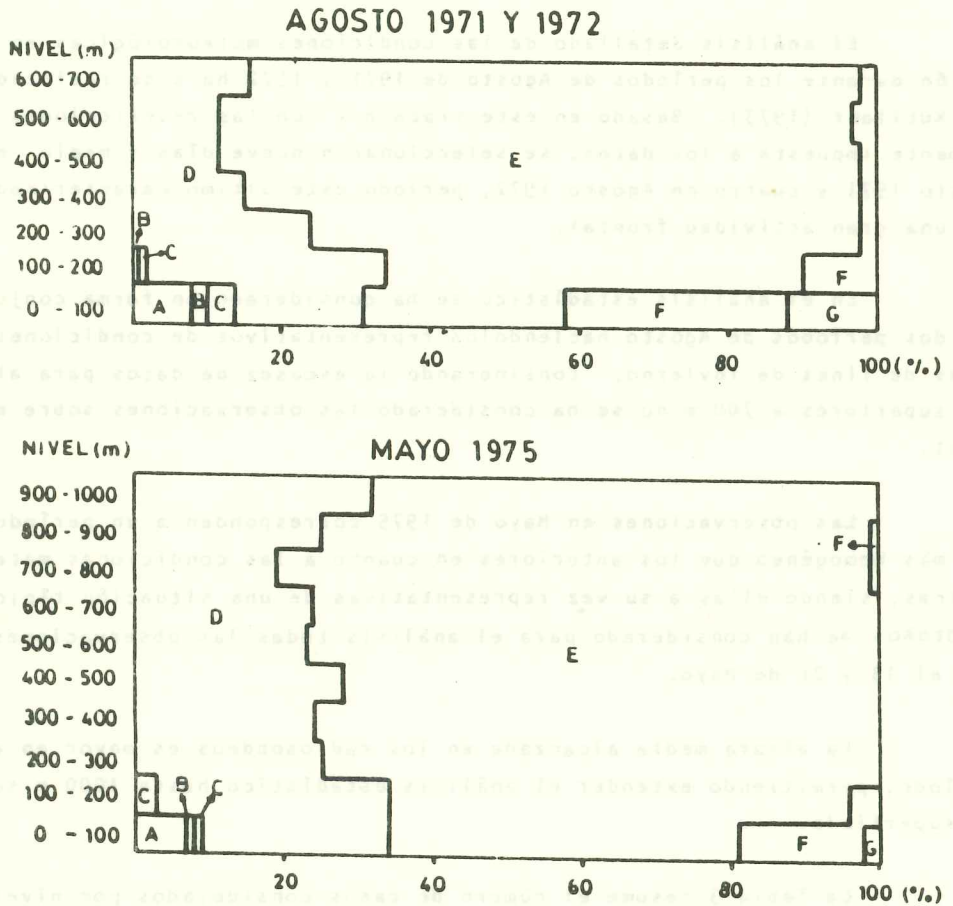
Las observaciones en Mayo de 1975 corresponden a un período mucho más homogéneo que los anteriores en cuanto a las condiciones meteorológicas, siendo ellas a su vez representativas de una situación típica de Otoño. Se han considerado para el análisis todas las observaciones entre el 13 y 26 de Mayo.

La altura media alcanzada en los radiosondeos es mayor en este período, permitiendo extender el análisis estadístico hasta 1000 m sobre la superficie.

La Tabla 3 resume el número de casos considerados por nivel y hora para cada conjunto de datos.

## 5. RESULTADOS.-

La Fig. 1 y Tabla 4 muestran la distribución porcentual de los diferentes tipos de estabilidad para cada nivel, considerando en forma conjunta todas las horas de observación. A partir de los 100 m de altura se advierte en los dos períodos, una fuerte predominancia de situaciones de estabilidad ligera (tipo E). Este comportamiento no resulta extraño,



**Figura 1 : Distribución porcentual de los diferentes tipos de estabilidad para cada nivel considerando todas las observaciones.**



teniendo en cuenta la clasificación utilizada para los tipos de estabilidad. En estricto rigor, el criterio fue originalmente definido para ser aplicado a la capa atmosférica junto a la superficie.

El ciclo diario de calentamiento y enfriamiento del suelo imprime a este estrato variaciones extremas en el gradiente térmico vertical a lo largo del día. De esta forma los tipos de estabilidad observados en los niveles más bajos de la atmósfera, pueden variar desde condiciones muy estables durante la noche hasta otras altamente inestables en las horas de mayor calentamiento del suelo.

La observación de la Fig. 1 permite establecer algunas diferencias significativas en el comportamiento de la estabilidad atmosférica durante los dos períodos. El período otoñal muestra en todo el espesor de superficie hasta los 700 m, condiciones menos estables que en el período de invierno. Este hecho es particularmente notorio en el primer estrato (0 - 100 m), donde las condiciones de alta estabilidad (tipos F y G) alcanzan un 19% de los casos en Mayo 1975 y un 42% en el otro período. Probablemente sea la intensificación de la inversión radiativa nocturna durante las noches despejadas de invierno, la que explique las diferencias observadas.

En cualquier caso, el tamaño de la muestra en cada período es pequeña y las diferencias observadas pueden no reflejar variaciones climatológicas.

Un hecho que es interesante de destacar es la alta frecuencia de ocurrencia de situaciones estables en el primer estrato desde superficie hasta 100 m. Se observa allí una frecuencia de 69% de situaciones estables (tipos E, F y G) durante el período invernal, bajando a 66% en la época otoñal.

Hay que destacar el hecho de que las observaciones analizadas fueron realizadas en un sector rural en las afueras de Santiago. Mediciones preliminares han revelado que el centro de Santiago presenta un efecto de aumento de la temperatura por causas urbanas, observable principalmente durante la noche. Este efecto puede inhibir el desarrollo de inversiones térmicas cercanas a la superficie durante la noche. No se dispone de observaciones simultáneas que permitan cuantificar la corrección que habría que hacer a los resultados presentados, para hacerlos representativos de lo que realmente sucede en el centro de la ciudad.



### Variación diaria de los tipos de estabilidad.-

La Fig. 2 muestra el resultado de un análisis hora a hora de las condiciones de estabilidad estática para los primeros 400 m sobre la superficie para Otoño e Invierno.

El primer nivel (0 - 100 m) presenta una variación máxima en las condiciones de estabilidad a lo largo del día. Aparecen desde condiciones de inestabilidad extrema (tipo A) en las horas de mayor insolación, hasta condiciones de máxima estabilidad (tipo G) en la madrugada.

El período de mayor inestabilidad se extiende entre las 10 y 17 horas aproximadamente, con una fuerte predominancia de condiciones inestables o neutras. A partir de las 19 horas prevalecen condiciones de estabilidad (tipos E, F y G) durante los dos períodos.

Entre 100 y 200 m ya no se observan condiciones muy inestables, el ciclo diario se manifiesta sólo por el fuerte aumento en la frecuencia de condiciones neutras (tipo D) durante el día y la aparición de algunas situaciones de inestabilidad (tipo B y C) a las horas de mayor calentamiento. Durante la noche prevalecen condiciones ligeramente estables (tipo E). El período invernal muestra una mayor ocurrencia de situaciones tipo F correspondiendo a una mayor incidencia de inversiones térmicas fuertes ( $\Delta T/\Delta Z > 1.5 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ).

Entre 200 y 400 m el esquema anterior se repite, sólo que las condiciones tipo F prácticamente no ocurren. La interacción con la superficie sigue apareciendo como un aumento de condiciones neutras después del mediodía pero que es cada vez menos significativa a medida que se consideran alturas mayores.

Sobre los 400 m no se observaron nuevos rasgos significativos. El ciclo diario se hace cada vez menos evidente, pudiendo afirmarse que en promedio sobre los 600 m las condiciones de estabilidad ligera (tipo E) prevalecen durante todo el día.

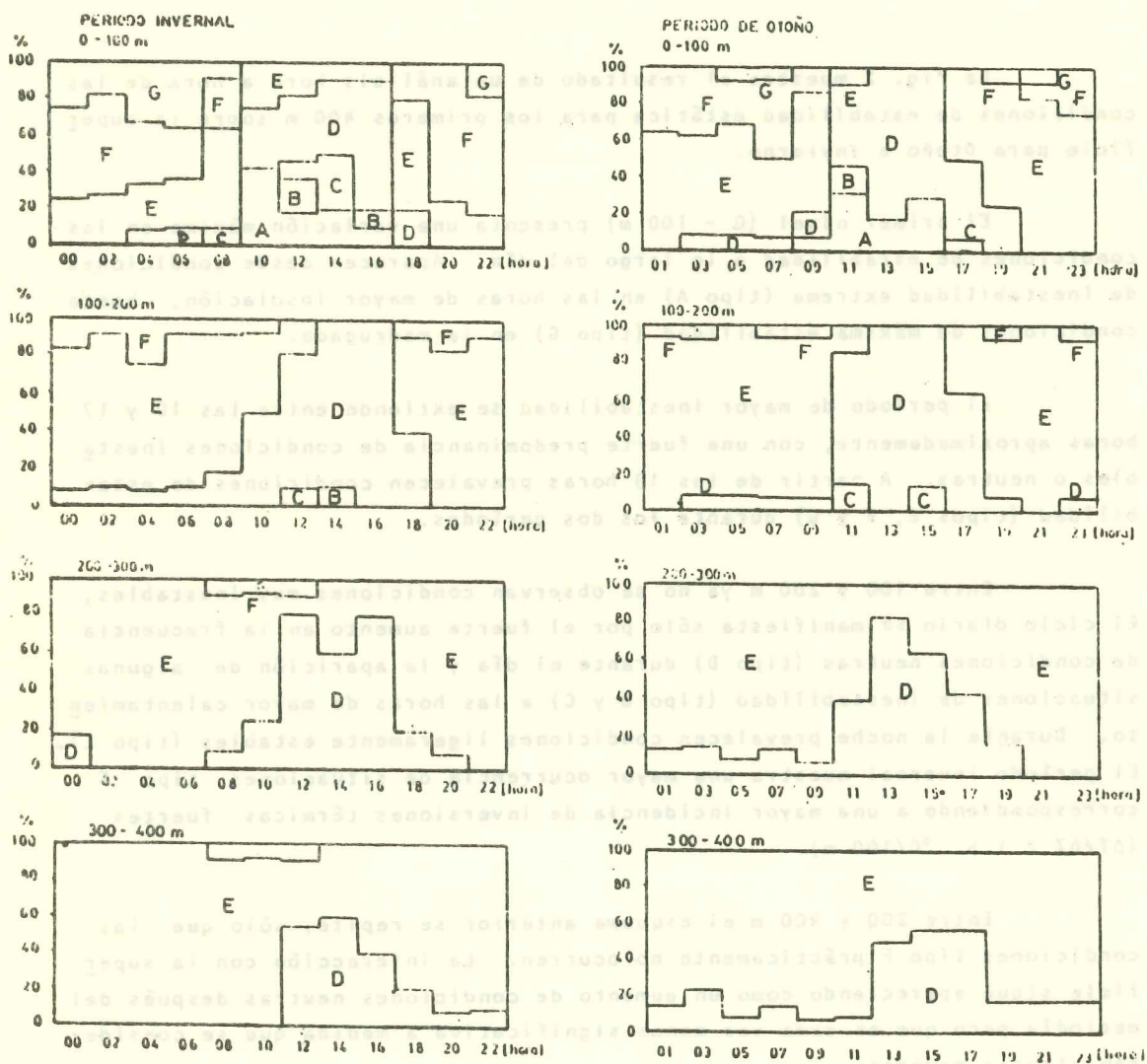


Figura 2 : Variación diaria de la distribución de los tipos de estabilidad estática en los primeros 400 metros sobre la superficie.

## 6. CONCLUSIONES.-

Las condiciones de estabilidad estática de la atmósfera sobre Santiago no difieren en forma significativa al comparar un período de Otoño con otro de final del Invierno. Se exceptúa el primer nivel (0 - 100 m), en el cual durante el Invierno se presentan con mayor frecuencia condiciones de estabilidad extrema, provocadas por un mayor enfriamiento radiativo del suelo.

Sobre los 200 m prevalecen condiciones de estabilidad ligera (tipo E). La interacción con la superficie se refleja a través de una proporción máxima de condiciones de neutralidad, relativa al resto del día.

Las condiciones medias de estabilidad estática junto a la superficie representa una potencialidad muy pobre para la difusión de contaminantes, habiéndose observado condiciones de tipo estable cerca del 70% del tiempo.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.-

- ACEITUNO, P., RUTLLANT, J., SIPPA, G.: "Análisis de datos previamente existentes de los factores meteorológicos de la Contaminación Atmosférica de Santiago". 1as. Jornadas sobre Contaminación del Ambiente en Chile. Santiago, 20-24 Marzo 1972.
- GIFFORD, F.A.: "A review of Turbulent Diffusion Typing Schemes". 1975, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory. Contribution N° 75/2.
- RUTLLANT, J.: "Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica de Santiago". 1973, Departamento de Geofísica, Univ. de Chile. Publicación N° 164.