

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD
PROYECTO NUCLEOELECTRICO LAGUNA VERDE
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL

ESTUDIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LAS
CONDICIONES DE DISPERSION QUE PREVALECE EN LA
ATMOSFERA DE LAGUNA VERDE, VERACRUZ.

Por

Vicente Fuentes Gea

Seccion de Ingeniería Ambiental
División de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería

U N A M

MEXICO, D.F.
JUNIO, 1981

G(2). 3329

PERSONAL QUE PARTICIPO EN EL ESTUDIO

UNAM

Vicente Fuentes Gea^{*}

César Moreno Moreno

Alberto Carlos Hernández

Claudio Sánchez Jiménez

Luis Domingo Gutiérrez Hernández

CFE

Miguel Angel Valdovinos^{**}

Juan Manuel Rodríguez

Martín López Lugo

* Profesor de tiempo completo. DEPMI-UNAM

** Jefe del Departamento de Ingeniería Ambiental del Proyecto Nucleoeléctrico de Laguna Verde, Ver., CFE.

I N D I C E

Página

1.	INTRODUCCION	1
1.1	<i>Objetivos</i>	2
2.	MODELOS DE DISPERSION PARA ESTIMAR CONCENTRACIONES DE MATERIAL RADIOACTIVO EN LA ATMOSFERA	3
2.1	<i>Cálculo de las concentraciones de material libera- do accidentalmente</i>	13
2.2	<i>Cálculo de las concentraciones promedio anual</i>	18
2.2.1	<i>Mecanismos de remoción del material radiactivo</i>	24
3.	APLICACION DE LOS MODELOS DE DISPERSION	35
3.1	<i>Resultados</i>	38
4.	ENSAYOS PRELIMINARES DE DISPERSION EN LA ATMOSFERA DE LA REGION	70
4.1	<i>Características topográficas y meteorológicas</i>	71
4.2	<i>Procedimiento experimental</i>	72

4.3	Metodología para el cálculo de los parámetros de dispersión	Página 74
4.4	Resultados	77
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
	REFERENCIAS	85
	ANEXO 1. Concentraciones normalizadas medias anuales sin considerar decaimiento radiactivo y sorpción en la superficie del suelo (material liberado a nivel del piso)	87
	ANEXO 2. Deposición y concentraciones normalizadas medias anuales considerando decaimiento radiactivo y sorpción en la superficie del suelo (material liberado en "forma mixta")	90
	ANEXO 3. Niveles de probabilidad y concentraciones normalizadas medias a dos horas para el caso de presentarse una emisión accidental de material radiactivo a la atmósfera	95

INDICE DE FIGURAS

Página

FIGURA 3.1	Lineas de isoconcentración normalizada promedio anual (seg/m^3). Laguna Verde, Veracruz	49
FIGURA 3.2	Lineas de isoconcentración normalizada promedio anual (seg/m^3). Laguna Verde, Veracruz	50
FIGURA 3.3	Valores de χ/Q que se exceden 0.5% del tiempo en cada dirección de la rosa de los vientos	51
FIGURA 3.4	Valores de χ/Q que se exceden 5% del tiempo considerando todas las direcciones en conjunto	67
FIGURA 3.5	Valores de χ/Q que se exceden 0.5% del tiempo en el límite de la zona de exclusión	68
FIGURA 3.6	Valores de χ/Q que se exceden 0.5% del tiempo en el límite de la zona de baja población	69
FIGURA 4.1	Localización de los puntos de muestreo	80

INDICE DE TABLAS

Página

TABLA 2.1	Coeficientes para generar valores de las desviaciones estandar	7
TABLA 2.2	Coeficientes para generar valores de la fracción del material radiactivo no depositado	31
TABLA 2.3	Coeficientes para generar valores del factor de deposición relativa	33
TABLA 3.1	Distribución de frecuencias conjuntas de vientos y categorías de estabilidad atmosférica	41
TABLA 3.2	Alturas del terreno. Laguna Verde, Ver.	48

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La Comisión Federal de Electricidad construye en la actualidad una planta nucleoelectrica en Laguna Verde, Ver., la cual estará integrada por dos unidades de 650 MW de capacidad cada una. La generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear plantea el riesgo de liberar material radiactivo a la atmósfera, el cual puede causar efectos adversos sobre los núcleos de población potencialmente expuestos a dicho material. La CFE consciente de esta posibilidad, ha iniciado estudios tendientes a determinar, mediante herramientas de simulación adecuadas, el grado de dilución del material radiactivo que pudiera liberarse a la atmósfera así como sus posibles trayectorias. Estas herramientas de simulación utilizan modelos matemáticos mediante los cuales se pueden predecir los movimientos y la dispersión en la atmósfera de los materiales radiactivos; sin embargo, para que los modelos puedan considerarse confiables, se requiere verificar su aplicabilidad y, si es necesario, ajustarlos a las características particulares que presentan las zonas de estudio.

Por lo anteriormente expuesto y en virtud de que el sitio donde se construye la planta nucleoelectrica antes mencionada tiene características muy particulares, tanto en lo referente a la topografía del lugar, como a los regímenes de los vientos que prevalecen, la CFE pidió la colaboración de la Facul-

tad de Ingeniería de la UNAM para aplicar las herramientas de simulación que se requieren a fin de conocer, en forma confiable, el comportamiento del material radiactivo que continuamente estará descargándose a la atmósfera, y del que accidentalmente pudiera vertirse.

1.1 *Objetivos*

Los objetivos que se pretenden alcanzar mediante la realización de este estudio son los siguientes:

- a) Plantear y aplicar dos modelos de dispersión que permitan evaluar los factores de dilución y el comportamiento de los efluentes radiactivos que se descarguen a la atmósfera; uno de ellos aplicable a los efluentes que se liberen en forma continua, y el otro para los que pudieran emitirse en caso de accidente.
- b) Establecer una metodología que permita determinar el ajuste que requieran los modelos arriba citados y su aplicabilidad a las condiciones particulares que presenta la zona de estudio.

CAPITULO 2 MODELOS DE DISPERSION PARA ESTIMAR CONCENTRACIONES DE MATERIAL RADIOACTIVO EN LA ATMOSFERA

Los métodos que más comúnmente se emplean para estimar concentraciones de materiales radiactivos liberados a la atmósfera en plantas nucleoelectricas se basan en la aplicación de la siguiente ecuación¹:

$$\chi(x, y, z) / Q = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2} \left(y^2 / \sigma_y^2 + H^2 / \sigma_z^2\right)\right\}}{\Pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (2.1)$$

la cual es consecuencia directa del principio de conservación de la masa y de la consideración de que la distribución espacial del material obedece a una curva de Gauss, tanto en la dirección vertical como en la horizontal transversal a la dirección del viento.

Los términos que aparecen en esta ecuación tienen el siguiente significado:

$\chi(x,y,o)/Q$	concentración normalizada a nivel del piso, en seg/m^3
Q	flujo del material radiactivo descargado a la atmósfera, en Ci/seg.

x, y	coordenadas del receptor con respecto a la fuente; x , en la dirección viento abajo e y , en la dirección horizontal transversal al eje x .
H	altura efectiva de la fuente, en metros
u	velocidad del viento en la dirección x a la altura de la fuente, en m/seg
σ_y, σ_z	desviaciones estandar de la distribución de la concentración sobre los ejes y e z , respectivamente, en metros

La ecuación (2.1) supone que el material se descarga a la atmósfera en forma continua desde una fuente puntual localizada a una altura H sobre el nivel del terreno. Además, se ha considerado régimen estacionario, dispersión vertical no restringida por inversiones térmicas elevadas y que el material que se dispersa en el aire no decae, no se sedimenta y no se remueve una vez que alcanza la superficie del suelo.

Una característica muy importante de destacar de la ecuación (2.1), es que los parámetros meteorológicos implícitos en ella (estabilidad atmosférica, velocidad y dirección del viento) deben ser además de uniformes, estacionarios. Esta última condición implica, dado que las variables meteorológicas arriba mencionadas permanecen constantes únicamente durante periodos relativamente pequeños, que los intervalos de tiempo adecuados para aplicar directamente esta ecuación están restringidos a lapsos suficientemente pequeños de manera de poder garantizar que dicha condición se cumpla. Esta restricción establece un período de validez de aplicación de la ecuación que, para propósitos prácticos puede tomarse menor a 1 hora, sin embargo, es conveniente hacer notar que la expresión (2.1) puede utilizarse para construir modelos de dispersión como el que se expone en la

parte 2.2 de este capítulo, mediante los cuales se efectúan predicciones de concentraciones medias correspondientes a períodos mayores al antes mencionado.

Por otra parte, los parámetros σ_y y σ_z que aparecen en la ecuación (2.1), son función de la intensidad del proceso de difusión turbulenta generado por procesos térmicos y mecánicos que tienen lugar en la atmósfera; sin embargo, como no existe aún una teoría de difusión turbulenta en la atmósfera que además de estar fundamentada en conceptos sólidos permita obtener resultados prácticos, ha sido necesario estimar dichos parámetros en forma empírica. De acuerdo con numerosos estudios experimentales, la estabilidad atmosférica, la distancia entre la fuente y el receptor, la altura de la fuente, la rugosidad del terreno y el tiempo de muestreo, son factores que influyen en los valores experimentales de σ_y y σ_z . Estos experimentos han dado origen a varios sistemas de valores de dichos parámetros, entre los cuales destacan los desarrollados por Pasquill-Gifford; Klug, Vogt, Singer-Smith y McElroy-Pooler². De entre éstos, los utilizados más ampliamente son los primeros, los cuales son característicos de terrenos de baja rugosidad (1 cm), de fuentes situadas al nivel del suelo o muy próximas a éste, y de períodos de muestreo menores a los 15 minutos. Los sistemas de valores restantes, con excepción de el de Klug, el cual corresponde a condiciones de rugosidad del terreno, tiempo de muestreo y alturas de fuentes similares a las de Pasquill-Gifford, son característicos de superficies con elementos de rugosidad altos (1-2 m) y de períodos de muestreo en el rango de 30 a 60 minutos. En el presente trabajo se utilizaron, para las categorías de estabilidad atmosférica de la A a la F, los valores de σ_y y σ_z publicados por Turner³, los cuales corresponden al sistema desarrollado por Pasquill-Gifford, y para la categoría de estabilidad atmosférica G, se emplearon las siguientes relaciones⁴.

$$\sigma_z (G) = \frac{3}{5} \sigma_z (F) \text{ y } \sigma_y (G) = \frac{2}{3} \sigma_y (F)$$

Los valores de σ_y y σ_z correspondientes a las clases de estabilidad atmosférica de la A a la F se generaron ajustando a las curvas que presenta Turner, ecuaciones de la forma siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= ax^b \\ \sigma_y &= cx^d\end{aligned}\quad (2.2)$$

en donde los coeficientes a y c y los exponentes b y d son función de la estabilidad atmosférica y también de la distancia x. Estos coeficientes y exponentes están presentados en la tabla (2.1). Es importante hacer notar, que cuando se consideran las categorías de estabilidad atmosférica más inestables y distancias relativamente alejadas de la fuente, en virtud de que el parámetro de dispersión en la dirección vertical σ_z , toma valores excesivamente grandes que provocan que una parte de la "pluma" se sitúe sobre la tropósfera, en el presente trabajo, en las situaciones en las que no se establece la existencia de una altura de capa de mezcla finita, se limita el valor máximo de dicho parámetro a 3,000 metros.

En la ecuación (2.1), la altura efectiva de la fuente H, está definida por la siguiente ecuación:

$$H = h_f + h_a - h_t ; H \geq 0$$

en donde:

- h_f = altura física de la fuente, en metros
- h_a = altura del ascenso del efluente a partir de h_f , en metros
- h_t = altura máxima del terreno entre la fuente y el receptor, en metros

La altura del ascenso del efluente h_a , es función del ímpetu inicial de los gases de escape así como de la diferencia de densidades entre éstos y la atmósfera. En el caso de efluentes con bajo contenido de energía térmica como los que caracterizan a las plantas nucleoelectricas, el ascenso de la emisión está dominado principalmente por el efecto del ímpetu inicial de los gases de salida, por lo cual, h_a , debe calcularse empleando fórmulas que involucren esta característica de la emisión. De las numerosas fórmulas que aparecen en la literatura con

Tabla 2.1

COEFICIENTES PARA GENERAR VALORES DE LAS DESVIACIONES ESTANDARD (M)

$$\sigma_z = ax^b \quad \sigma_y = cx^d$$

Categoría de Estabilidad Atmosférica	a			b			c		d	
	x<500M	500≤x<5000	x≥5000	x<500	500≤x<5000	x≥5000	x<10000	x≥10000	x<10000	x≥10000
A	0.0383	0.000254	0.000254	1.281	2.089	2.089	0.495	0.606	0.873	0.851
B	0.1393	0.0494	0.0494	0.9467	1.114	1.114	0.310	0.523	0.897	0.840
C	0.112	0.101	0.115	0.910	0.926	0.911	0.197	0.285	0.908	0.867
D	0.0856	0.259	0.737	0.865	0.687	0.564	0.122	0.193	0.916	0.865
E	0.1094	0.2452	0.9204	0.7657	0.6358	0.4805	0.0934	0.141	0.912	0.868
F	0.05645	0.1930	1.505	0.805	0.6072	0.3662	0.0625	0.0923	0.911	0.869

Nota: Los valores de σ_z han sido limitados a 3,000 metros.

esta propiedad, las que más soporte han recibido tanto teórico como experimental son las ecuaciones de Briggs, razón por la cual fueron las utilizadas en el presente estudio. Estas ecuaciones y la forma de efectuar los cálculos se indican a continuación⁵.

Si las condiciones de estabilidad atmosférica corresponden a las categorías inestables y neutral (de la A a la D):

$$h_a = 1.44 (V_o/u)^{2/3} (x/d)^{1/3} d-C \quad (2.4)$$

y

$$h_a = 3 (V_o/u) d \quad (2.5)$$

en donde: $C = 0$ si $V_o/u \geq 1.5$ y $C = 3(1.5-V_o/u) d$, en caso contrario.

En estas ecuaciones:

V_o = velocidad de escape de los gases, en m/s

d = diámetro del orificio por donde escapan los gases, en metros

u = velocidad del viento a la altura de la fuente, en metros

La ecuación (2.4) representa la distancia vertical a la que se eleva el efluente desde la altura h_f cuando éste todavía no ha alcanzado su último ascenso; mientras que la expresión (2.5) permite estimar su máxima elevación. Como la primera fórmula predice un incremento ilimitado de h_a a medida que el material descargado a la atmósfera se aleja de la fuente, esta ecuación solamente debe emplearse para distancias viento abajo de manera que no se rebase la altura de ascenso que se obtiene de la ecuación (2.5); una vez que se alcanza dicha altura, los calculos deberán efectuarse utilizando esta última ecuación.

Por otra parte, cuando las condiciones de estabilidad atmosférica son

estables (categorías E, F y G), en virtud de la naturaleza tentativa de las ecuaciones que han sido propuestas para considerar esta situación, y con objeto de no sobreestimar el ascenso de los efluentes, se selecciona el valor más conservador entre el resultado obtenido de las ecuaciones (2.4) y (2.5) y las dos siguientes expresiones:

$$h_a = 4 \left[\frac{V_o^2 (d/2)^2}{S} \right]^{1/4} \quad (2.6)$$

y

$$h_a = 1.5 \left[\frac{V_o^2 (d/2)^2}{u} \right]^{1/3} S^{-1/6} \quad (2.7)$$

El parámetro de estabilidad atmosférica S que aparece en las fórmulas (2.6) y (2.7) está definido como sigue:

$$S = \frac{g}{T} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.8)$$

en donde:

g	aceleración de la gravedad, en m/seg^2
T	temperatura ambiente, en $^{\circ}\text{k}$
$\frac{\partial \theta}{\partial z}$	gradiente vertical de la temperatura potencial, en $^{\circ}\text{k/m}$

En este estudio se emplearon los valores de S que se muestran a continuación:

	Estabilidad atmosférica		
	E	F	G
$S (\text{seg}^{-2})$	6.58×10^{-4}	1.15×10^{-3}	1.97×10^{-3}

los cuales se obtuvieron empleando una temperatura ambiente media de 25°C , y los siguientes valores del gradiente de temperatura potencial: 0.02°k/m , 0.035°k/m , 0.06°k/m para las estabilidades E, F y G, respectivamente.

Debe hacerse notar que la velocidad del viento que interviene tanto en las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.7) así como en la ecuación (2.1), se refiere a la que estaría presente a la altura del punto de liberación del efluente; sin embargo, generalmente esta velocidad se mide a una altura de referencia distinta de h_f , por lo que es necesario hacer una estimación de la velocidad del viento a la altura a la que se encuentra la fuente; ésto, puede hacerse mediante la siguiente expresión, la cual se utiliza ampliamente para describir la distribución de la velocidad del viento dentro de la capa atmosférica planetaria:

$$u = u_o (h_f/h_o)^p \quad (2.9)$$

en donde u_0 es la velocidad del viento medida a la altura de referencia h_0 y p un exponente función de la estabilidad atmosférica y la rugosidad del terreno. En este estudio se utilizaron los valores del exponente p que se muestran a continuación, los cuales son tipos de terrenos con rugosidad moderada⁶.

categoría de								
estabilidad atmosférica	A	B	C	D	E	F	G	
p	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30	0.50	

Un aspecto muy importante que debe tenerse presente en lo que se refiere a la aplicabilidad de la ecuación (2.1), es que en ésta no se considera la existencia en la atmósfera de estructuras térmicas llamadas, "inversiones térmicas elevadas". Se dice que existe una inversión térmica cuando el gradiente de temperatura en la atmósfera adquiere un valor positivo; si dicha inversión está presente a partir de cierta altura sobre la superficie del suelo, ésta recibe el nombre de "inversión térmica elevada". Ahora bien, la capa de la atmósfera comprendida entre la base de la inversión elevada y la superficie del suelo, la cual se caracteriza por ser más inestable que la porción dentro de la inversión, tiene un espesor L denominado "altura de la capa de mezcla"; ésta representa la distancia vertical hasta donde el aire se mezcla vigorosamente y varía en función de la hora del día y la época del año.

Para simular la dispersión de contaminantes que se emiten a la atmósfera en presencia de alturas de capa de mezcla finitas, se hace la consideración de que la base de la "inversión elevada" constituye, de manera análoga a la superficie del suelo, una barrera al transporte vertical de los contaminan-

tes, lo cual origina que éstos sufran múltiples reflexiones entre el suelo y la base de la inversión. Bajo éstas circunstancias, la distribución de la concentración a nivel del piso que origina una fuente puntual cuando se emite continuamente material a la atmósfera, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\chi(x,y,o)/Q = \frac{A(x)}{2\pi\sigma_y \sigma_z u} \exp \left\{ - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (2.10)$$

siendo:

$$A(x) = \sum_{N=-\infty}^{\infty} \left[\exp \left\{ - \frac{(2NL + H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} + \exp \left\{ - \frac{(2NL - H)^2}{2\sigma_z^2} \right\} \right]$$

en donde L representa la altura de la capa de mezcla y los términos restantes tienen el mismo significado que los que aparecen en la ecuación (2.1).

El término A(x) de esta ecuación, el cual involucra el efecto de las reflexiones múltiples ya mencionadas, converge rápidamente, por lo que en general N se puede tomar en el intervalo de -5 a 5. Asimismo, si $L \rightarrow \infty$ esta fórmula se simplifica como sigue:

$$\chi(x,y,o)/Q = \frac{1}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \exp \left\{ - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right\}$$

ecuación que es idéntica a la expresión (2.1).

Como la capa de la atmósfera comprendida entre la superficie del suelo y la base de la inversión elevada es en general inestable, la ecuación (2.10)

solamente deberá aplicarse cuando se presentan las categorías de estabilidad atmosférica A, B, C, y D; en cambio, cuando la atmósfera es estable, se aplica la ecuación (2.1), porque no se define para esta situación dicha altura.

Ahora bien, el efecto de las múltiples reflexiones que describe la ecuación (2.10) continuará viento abajo de la fuente de emisión hasta que se alcance una concentración homogénea en el eje vertical, lo cual aproximadamente sucede cuando $\sigma_z > 1.6 L$. Bajo estas circunstancias, la distribución de la concentración χ/Q , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\chi(x,y,o)/Q = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y Lu} \exp\left\{-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2}\right\} \quad (2.11)$$

ecuación válida si estan presentes las categorías de estabilidad atmosférica A, B, C y D; categorías con las que puede presentarse el mezclado uniforme en la vertical.

2.1 Cálculo de Concentraciones de Material Liberado Accidentalmente

Para evaluar el impacto que tendría la emisión accidental a la atmósfera de material radiactivo en la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde (PNLV) es necesario, debido a la naturaleza probabilística del evento y a las condiciones meteorológicas que determinen el grado de dilución y de las trayectorias de material radiactivo que pudiera liberarse, enfocar el problema desde un punto de vista estocástico. Esto implica la necesidad de conocer en los alrededores del sitio de la PNLV la función de distribución de probabilidades de las

concentraciones de material, de manera que, mediante dicha distribución, se pueda determinar el nivel de riesgo asociado a una concentración esperada.

Cuando se aplica la ecuación (2.1) para el cálculo de concentraciones representativas de períodos de aproximadamente 1 hora, es conveniente suponer condiciones que originen niveles de contaminación máximos. Esto implica por una parte, suponer que el material se descarga siempre desde una altura efectiva nula ($H=0$) y por la otra, considerar únicamente las concentraciones esperadas sobre el eje x ($y=0$). De esta forma, la ecuación (2.1) se simplifica como sigue:

$$\chi(x,0,0)/Q = \frac{1}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (2.12)$$

Ahora bien, la forma de liberación del efluente que supone esta ecuación, cuando se considera el problema de un posible escape de material radiactivo a través de estructuras de dimensiones considerables como las que contienen los reactores, las cuales obstruyen el libre flujo del aire, no debe considerarse como si procediera de una fuente puntual, sino que, debido al efecto aerodinámico de las estructuras y al mezclado turbulento inicial que se efectúa en la zona de baja presión formada inmediatamente viento abajo de éstas, debe suponerse como una fuente volumétrica. Para tomar en cuenta esta situación la ecuación (2.12) se modifica en la forma siguiente⁵:

$$\chi/Q = \frac{1}{u (\pi \sigma_y \sigma_z + 0.5A)} \quad (2.13)$$

$$X/Q = \frac{1}{3 \pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (2.14)$$

en donde A representa el área vertical de la sección transversal del edificio del reactor en m².

La ecuación (2.14) representa el límite de dilución máximo permitido, y debe ser utilizada en el caso de que la concentración normalizada X/Q obtenida mediante la ecuación (2.13) resulte de mayor magnitud que ésta.

La determinación de los niveles de riesgo asociados a las concentraciones calculadas utilizando las ecuaciones (2.13) y (2.14), se efectuó siguiendo el procedimiento indicado en la Guía Reguladora 1.XXX⁴. Dicho procedimiento consiste en obtener las frecuencias relativas acumuladas de las concentraciones, a partir de la función de distribución conjunta de los vientos y las estabilidades atmosféricas en cada una de las 16 direcciones de la rosa de los vientos, y en forma conjunta para todas las direcciones, de manera que, tomando los logaritmos de las X/Q y transformando sus respectivas frecuencias acumuladas a escala probabilística*, se lleva a cabo un análisis de regresión mediante el cual se establece una envolvente superior para la distribución acumulativa de los valores X/Q y posteriormente,

* La escala probabilística, x_p , también llamada "Probit", se define como el número de desviaciones estándar que corresponden a un valor dado del área $F(x)$ bajo la curva de Gauss, es decir

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x_p} e^{-t^2/2} dt = F(t = x_p)$$

Por ejemplo, a una frecuencia relativa acumulada $F(t) = 0.8413$, le corresponde el probit $x_p = 1$, como puede verificarse en una tabla de áreas bajo la curva de Gauss.

de cada una de las 16 curvas de probabilidad resultantes y de la originada tomando el conjunto de todas las direcciones, se seleccionan, respectivamente, los valores χ/Q que se hayan excedido 0.5% y 5.0% de las veces. Estos valores constituyen los máximos esperados en periodos de 1 hora.

Finalmente, para estimar valores de χ/Q representativos de regímenes meteorológicos apropiados, como los que ocurren en periodos de 8 horas 16 horas, 3 días y 26 días, se supone, primeramente, que los valores de χ/Q de una hora son aproximadamente iguales a los que les corresponden en 2 horas y, posteriormente, se efectúa una interpolación logarítmica entre estos últimos y los promedios anuales (8760 horas) correspondientes, los cuales se obtienen de las ecuaciones que se exponen en la parte 2.2 de este capítulo.

Es interesante hacer notar que el procedimiento arriba indicado es consistente con el llamado "Modelo de Larsen"⁸ en el cual se establece, que las concentraciones de contaminantes atmosféricos se distribuyen de acuerdo con la distribución Log-Normal, independientemente del tiempo de muestreo, y que las concentraciones máximas esperadas durante lapsos diferentes, son inversamente proporcionales al tiempo de muestreo τ , elevado a un exponente q , es decir:

$$\chi = r\tau^{-q} \quad (2.15)$$

de donde, tomando los logaritmos en ambos miembros de esta ecuación se obtiene:

$$\ln\chi = \ln r - q\ln\tau \quad (2.16)$$

ecuación con la cual se efectúa la interpolación logarítmica para distintos períodos de muestreo que se mencionan en la Guía Reguladora ya citada.

En el presente estudio, para construir la envolvente superior de la distribución acumulativa de los valores de χ/Q a dos horas, se llevó a cabo un ajuste lineal por el método de los mínimos cuadrados, entre los "Probits" y los logaritmos de las χ/Q , y posteriormente, se calcularon límites superiores de confianza para estos últimos utilizando la siguiente ecuación⁹:

$$Y(x_o)_{\text{sup}} = Y(x_o) + St_p \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_o - \sum x_i/n)^2}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

siendo t_p el valor percentil de la distribución t de Student^{*} y S, el error estándar de la recta de regresión, el cual se define como sigue:

$$S = \left[\sum_i (Y_i - a - bx_i)^2 / n - 2 \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

en donde:

$Y(x_o)_{\text{sup}}$ límite superior de confianza del valor esperado de $\text{Ln}\chi/Q$ correspondiente al valor del probit x_o

* En este trabajo se empleó un valor percentil de 2.4 ($t_{.99} = 2.4$ con 60 grados de libertad), de manera de poder establecer a un nivel de confianza no menor de 99%, que los valores esperados de $\text{Ln}\chi/Q$ están contenidas dentro de la envolvente superior calculada.

$Y(x_0)$	valor esperado del $\text{Ln}X/Q$
a, b	coeficientes de la recta de regresión
x_i	probit asociado a la frecuencia acumulada F_i
Y_i	valor observado del $\text{Ln}X/Q$ correspondiente a la frecuencia acumulada F_i
n	número de parejas (x_i, Y_i)

2.2 Cálculo de las Concentraciones Promedio Anual

Las ecuaciones hasta ahora expuestas para el cálculo de concentraciones de material radiactivo son representativas de intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños de manera de poder garantizar que los parámetros meteorológicos que intervienen en dichas ecuaciones permanezcan constantes. Para períodos grandes, en virtud de que las condiciones meteorológicas varían considerablemente, es necesario modificar estas ecuaciones en forma tal que sea posible determinar la concentración promedio que resulte de los valores que hayan tomado la estabilidad atmosférica, la velocidad del viento y su dirección durante el lapso en cuestión.

Una forma de modificar las ecuaciones (2.1), (2.10) y (2.11) y poderlas emplear para períodos considerablemente mayores a una hora, como por ejemplo un año, consiste en considerar que en este lapso, la dirección del viento

se distribuya aleatoriamente dentro de aquellos sectores de la rosa de los vientos en los que el viento haya soplado, de manera que en cada sector con una abertura angular de 22.5° y a una distancia radial x de la fuente, la distribución de la concentración pueda suponerse uniforme. Si además de lo anterior, se hace la consideración de que la dispersión lateral que sufre el material σ_y , es muy pequeña comparada con la distancia x ; ésto es, $x/\sigma_y \gg 1$, se tiene que la concentración promedio normalizada $\bar{\chi}(x)/Q$ a la distancia radial x en un arco de círculo dentro de un sector con origen en la fuente, está dada aproximadamente por la siguiente integral:

$$\bar{\chi}(x)/Q = \frac{1}{2\pi x/16} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi(x,y,0)}{Q} dy \quad (2.19)$$

en donde el término $\chi(x,y,0)/Q$ se encuentra definido por cualquiera de las expresiones (2.1), (2.10) y (2.11) según se requiera calcular la concentración. Por ejemplo, si se supone una altura de capa de mezcla infinita, el integrando de la ecuación (2.19) queda definido por la ecuación (2.1), la cual si se sustituye en la expresión (2.19), da como resultado la siguiente expresión:

$$\bar{\chi}(x)/Q = \frac{2.032}{u_x \sigma_z} \exp \{-H^2/2\sigma_z^2\} \quad (2.20)$$

Conviene señalar que en la ecuación (2.19) no se han considerado las fluctuaciones de la velocidad del viento ni de la estabilidad atmosférica ocurridas durante el período en el que el viento sopló en una dirección dada; por consiguiente, para obtener la concentración resultante de todos los valores de la velocidad del viento y estabilidad atmosférica que se hayan presentado cuando el viento so

pló en esa dirección, se requiere pesar la ecuación (2.19) por la frecuencia relativa conjunta con que los parámetros meteorológicos arriba mencionados persistieron durante el lapso en cuestión, y obtener el promedio ponderado de la concentración en la forma siguiente:

$$\overline{\chi(kx)/Q} = \sum_{\ell} \sum_{m} F_{k\ell m} \bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q \quad (2.21)$$

en donde:

$\overline{\chi(kx)/Q}$ concentración normalizada promedio anual en el sector de dirección k , $k = 1 \dots 16$ y a la distancia radial x .

$F_{k\ell m}$ función de frecuencias relativas conjuntas de la k ésima dirección del viento, la ℓ ésima clase de velocidad del viento y la m ésima categoría de estabilidad atmosférica.

$\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q$ concentración normalizada media en un arco de círculo (ecuación (2.19)) con la ℓ ésima velocidad del viento y la m ésima categoría de estabilidad atmosférica a la distancia x .

La ecuación (2.21) es la expresión fundamental del modelo de dispersión utilizando en este estudio para determinar las concentraciones promedio anual de material radiactivo en la atmósfera. En esta ecuación, la cantidad $\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q$ se obtiene de la expresión (2.19), la cual, como se vió anteriormente, cuando se considera un espesor de la capa de mezcla infinito se reduce a la

ecuación (2.20). Asimismo, en el caso en el que la altura de la capa de mezcla adquiriera un valor finito, se deben sustituir las ecuaciones (2.10) y (2.11) en la expresión (2.19) y seguir el mismo procedimiento expuesto en la primera parte del presente capítulo, lo cual da lugar a las siguientes expresiones de $\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q$.

- a) Si la atmósfera es inestable o neutral, y si no se ha alcanzado una concentración uniforme en la vertical, es decir, si $\sigma_{z_m} \leq 1.6L$ se tiene que:

$$\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q = \frac{2.032}{2x u_{\ell m} \sigma_{z_m}} \sum_{N=-5}^5 \left[\exp\left\{-\frac{(2NL + H_{\ell m})^2}{2\sigma_{z_m}^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(2NL - H_{\ell m})^2}{2\sigma_{z_m}^2}\right\} \right] \quad (2.22)$$

- b) Si la atmósfera es inestable o neutral, y si en el eje vertical la concentración es uniforme; esto es, si $\sigma_{z_m} > 1.6L$ entonces:

$$\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q = \frac{2.032 \sqrt{\pi/2}}{x u_{\ell m} L} \quad (2.23)$$

y

- c) Si la atmósfera es estable, o si la altura de la capa de mezcla se considera infinita, $\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q$ se estima como sigue:

$$\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q = \frac{2.032}{x u_{\ell m} \sigma_{z_m}} \exp\left\{-H^2_{\ell m}/2\sigma_{z_m}^2\right\} \quad (2.24)$$

En estas tres ecuaciones, los términos en los que aparecen los subíndices ℓ y m representan los diferentes valores que éstos toman al variar las categorías de

velocidad del viento y estabilidad atmosférica, respectivamente. Nótese que como los valores de la velocidad del viento se refieren a la altura del punto de liberación de los gases, también estos dependen de la estabilidad atmosférica (vease la ecuación (2.9)).

Un aspecto muy importante que debe considerarse en relación a los modelos de dispersión como el que aquí se discute, es el que se refiere a la altura de la descarga del efluente. Si éste se descarga a una altura mayor de dos veces la correspondiente a la de las estructuras sólidas adyacentes a la fuente, se puede suponer que dichas estructuras no perturban apreciablemente el ascenso del efluente, y por consiguiente, éste puede considerarse como si procediera de una "fuente elevada" con una altura efectiva H , la cual se estima con la ecuación (2.3).

Por otra parte, cuando la descarga se efectúa desde sitios ubicados a alturas menores a la de las estructuras sólidas adyacentes a la fuente, es necesario incluir el efecto aerodinámico que dichas estructuras ejercen en la dispersión inicial del efluente, y proceder, tal como se hizo en la parte 2.1, como si la emisión de material se originara desde una fuente situada a nivel del piso con una altura efectiva nula. A fin de tomar en consideración la dispersión inicial del efluente que ocurre inmediatamente viento abajo de los edificios, la desviación estandar vertical σ_{z_m} , que aparece en el denominador de las ecuaciones (2.22) y (2.24), se sustituye por el valor más pequeño de las dos expresiones siguientes:

$$\beta_{z_m} = \sqrt{\sigma_{z_m}^2 + 0.5D_z^2/\pi}$$

y

$$\beta_{z_m} = \sqrt{3} \sigma_{z_m}$$

en donde D_z es la altura del edificio adyacente a la fuente. La segunda de estas expresiones representa el límite máximo de la dilución inicial del efluente.

Por último, cuando el efluente se descarga desde una altura mayor o igual a la de las estructuras sólidas adyacentes a la fuente, pero menor a dos veces éstas, como es el caso de efluentes descargados mediante sistemas de ventilación, se ha podido verificar experimentalmente que el efluente se comporta, según sea la relación que guarde la velocidad de salida de los gases V_o , a la del viento, ya sea, como si se hubiese originado en una fuente situada a nivel de piso, o en una "fuente elevada", o en ambas, simultáneamente. La fracción del tiempo E_t , que la descarga de los gases se considera a nivel de piso ($H=0$) se calcula como sigue¹⁰:

$$E_t = 1 \quad \text{si} \quad \frac{V_o}{u} \leq 1$$

$$E_t = 2.58 - 1.58 (V_o/u) \quad \text{si} \quad 1 < \frac{V_o}{u} \leq 1.5$$

$$E_t = 0.3 - 0.06 (V_o/u) \quad \text{si} \quad 1.5 < \frac{V_o}{u} \leq 5.0$$

$$E_t = 0 \quad \text{si} \quad \frac{V_o}{u} > 5$$

y la fracción del tiempo que la descarga se considera elevada, está dada por $1-E_t$.

Para proceder al cálculo de las concentraciones promedio anual originadas por la situación anterior, la cual se denomina "descarga mixta", se pesan las concentraciones que resulten de la porción del efluente situado en $H=0$ por el factor E_t , y las que se originen de la "fuente elevada", por $1-E_t$; y así, la ecuación (2.21) queda expresada en la forma siguiente:

$$\overline{\chi(kx)/Q} = \sum_{\ell} \sum_m F_{k\ell m} \{ E_t [\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q]_{H=0} + (1-E_t) [\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q]_H \} \quad (2.25)$$

en donde el primer término del lado derecho de esta ecuación representa las concentraciones originadas por la porción del efluente que se considera situado a nivel de piso, y el segundo, las correspondientes a la porción del efluente situado a la altura efectiva H .

2.2.1 Mecanismos de Remoción del Material Radiactivo

Existen diversos procesos que actúan para abatir las concentraciones de material de efluentes radiactivos descargados a la atmósfera, entre los cuales sobresalen, el decaimiento radiactivo y la deposición del material en la superficie del suelo tanto por procesos de sorpción que tienen lugar en ésta, así como por la precipitación pluvial.

El decaimiento radiactivo es un proceso bien conocido, el cual es

función de la vida media y el tiempo de recorrido del material radiactivo en la atmósfera, y se evalúa mediante la ecuación de decaimiento radiactivo:

$$b(x) = \exp\{ - 0.693x/86400uT \} \quad (2.26)$$

en donde:

$b(x)$ fracción del material radiactivo que no ha sufrido transformaciones

T vida media del material radiactivo, en días

u velocidad del viento a la altura de la descarga de los gases, en m/seg

x distancia de recorrido, en metros

Por otra parte, la deposición del material por procesos de sorpción que tienen lugar en la superficie del suelo es un proceso bastante complejo que solo ha sido estudiado parcialmente; sin embargo se sabe, que el proceso es sumamente lento en lo que respecta a los gases nobles, tritio, carbono-14 y compuestos de yodo radiactivo, siendo de consideración en el caso de los isótopos de yodo y otras partículas radiactivas.

Los procesos de sorpción que ocurren en la superficie del suelo promueven que las concentraciones de material radiactivo en la atmósfera se aba-

tan. Las fracciones del material que permanecen en la atmósfera al actuar dichos procesos, se han evaluado en forma semiempírica mediante mediciones de la rapidez con que el material se deposita en la superficie del suelo y utilizando la ecuación de depósito-dispersión. Los resultados de estas evaluaciones, las cuales se presentan en la Guía Reguladora 1.111 de la USNRC¹⁰ en términos de dos conjuntos de curvas; uno correspondiente a las fracciones de material no depositado $a(x)$, y el otro, a los de rapidez de deposición relativa $D(x)/Q$, muestran que estas cantidades son función, de la altura a la que se efectúa la descarga de los efluentes, la distancia de recorrido del material y la estabilidad atmosférica.

Con objeto de disponer de expresiones analíticas referentes a los factores $a(x)$ y $D(x)/Q$ arriba mencionados, de manera que estos puedan incorporarse al modelo de dispersión que aquí se discute, se ajustaron, a las curvas asociadas a el factor $a(x)$ y que se refieren a alturas de liberación de efluentes 0, 30 y 100 metros*, así como a la de 60 metros pero con las categorías de estabilidad atmosférica A, B, y C, polinomios de la forma:

$$a(x) = \sum_{i=0}^4 r_i (\ln x)^i$$

y para las curvas correspondientes a efluentes liberados a 60 metros y estab*ili*dades D, E, F y G:

* Las curvas correspondientes a efluentes liberados a alturas de 0, 30 y 60 m que se presentan en la Guía Reguladora 1.111, fueron utilizadas para efluentes con alturas efectivas de menos de 15, 45 y 80 m, respectivamente, y las de 100 m. se emplearon para fuentes con alturas efectivas de más de 80 m.

$$a(x) = \exp \left\{ \sum_{i=0}^4 r_i (\ln x)^i \right\}$$

por otra parte, las expresiones analíticas correspondientes a los factores de ra pidez de deposición relativa se obtuvieron mediante polinomios de la forma:

$$D(x)/Q = \exp \left\{ \sum_{i=0}^5 s_i (\ln x)^i \right\}$$

en las tablas 2.2 y 2.3 se exponen los valores de los coeficientes r_i y s_i , respectivamente, para diversas distancias viento abajo de la fuente, en función de la altura de ésta y de la estabilidad atmosférica. La forma de estos polinomios se seleccionó tomando en consideración las ecuaciones de mejor ajuste a las curvas que presenta la Guía Reguladora ya citada.

Finalmente, para modelar el efecto que ejercen el decaimiento radiactivo y la sorpción del material en la superficie del suelo sobre las concentraciones promedio anual, se multiplican los términos $\bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q$ definidos por las ecuaciones (2.22), (2.23) y (2.24), por las fracciones $b_{\ell m}(x)$ y $a_{\ell m}(x)$ correspondientes a las ℓ categorías de velocidad del viento y las m clases de estabilidad atmosférica. Por ejemplo, si se desean incluir los procesos arriba mencionados en la expresión (2.25), la cual considera el efecto de la "descarga mixta" ya discutido, esta ecuación se modifica como sigue:

$$\overline{\chi(kx)}/Q = \sum_{\ell} \sum_m F_{\ell m} \left\{ E_t \left[a_m(x) b_{\ell}(x) \bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q \right]_{H=0} + (1-E_t) \left[a_{\ell m}(x) b_{\ell m}(x) \bar{\chi}_{\ell m}(x)/Q \right]_H \right\} \quad (2.27)$$

Nótese que en el término correspondiente al "efluente elevado", (segundo término del lado derecho), la fracción del material no depositado $a_{\ell m}(x)$, se ha hecho de pender de la velocidad del viento. Esto se debe a que la altura efectiva del efluente H , de la cual es función dicha fracción, depende también de los valores que toma la velocidad del viento.

Por otro lado, para estimar el flujo medio anual de material radiactivo depositado en la superficie del suelo (Ci/seg-M^2), por unidad de material des cargado a la atmósfera (Ci/seg), se procede en forma similar al método seguido para derivar la expresión para la concentración promedio anual (ecuación 2.21), con lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$\overline{D(kx)/Q} = \frac{\sum_{\ell} \sum_m F_{\ell m} D_{\ell m}(x)/Q}{2 \pi x/16} \quad (2.28)$$

en donde $\overline{D(kx)/Q}$ representa el flujo medio anual de material depositado en la superficie del suelo por unidad de material liberado a la atmósfera, en el sector de dirección k y a la distancia x de la fuente, en metros⁻².

Asimismo, la expresión para el cálculo del flujo promedio anual de material depositado, análoga a la ecuación (2.25) es la siguiente:

$$\overline{D(kx)/Q} = \frac{\sum_{\ell} \sum_m F_{\ell m} \{E_t [D_m(x)/Q]_{H=0} + (1-E_t) [D_{\ell m}(x)/Q]_H\}}{2 \pi x/16} \quad (2.29)$$

Es importante hacer notar que los valores del factor de rapidez de deposición relativa $D(x)/Q$ que presenta la Guía Reguladora 1.111 ya mencionada, están basados en la suposición de una concentración uniforme en un arco de círculo de un sector de la rosa de los vientos, y que dichos factores representan la rapidez del material depositado por unidad de distancia viento abajo (Ci/seg-M), dividido por la intensidad de la fuente (Ci/seg). El flujo promedio $\bar{D}(x)$ de material que se deposita sobre la superficie del suelo dentro de un arco de círculo de 22.5° es:

$$\bar{D}(x) = \frac{D(x)}{2\pi x/16} \quad (2.31)$$

y la relación entre éste y la concentración promedio de material que permanece en la atmósfera está dada por la expresión:

$$\bar{D}(x) = v_d \bar{\chi}_r(x) \quad (2.32)$$

en donde $\bar{\chi}_r(x)$ representa la concentración remanente en el aire a nivel de piso y v_d es una constante de proporcionalidad, la cual por tener unidades de velocidad recibe el nombre de velocidad de deposición. Este parámetro, el cual se evalúa efectuando mediciones del flujo del material que deposita y su concentración en el aire, es función de la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica, el tipo y las condiciones de la superficie del terreno y el material radiactivo del que se trate

Una forma de estimar la concentración remanente que aparece en la relación (2.32), consiste en sustituir a la cantidad Q de la ecuación (2.20),

por un término llamado de fuente residual $Q(x)$, el cual se vá reduciendo gradualmente como consecuencia de la eliminación paulatina del material de la atmósfera al depositarse éste en la superficie del suelo, de manera que la expresión para dicha concentración es:

$$\bar{\chi}_r(x) = 2.032 \frac{Q(x)}{u x \sigma_z} \exp\{-H^2/2\sigma_z^2\} \quad (2.33)$$

De acuerdo con Van der Hoven¹, el término de fuente residual se obtiene como sigue:

$$Q(x) = Q \exp\left\{-\sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_d}{u} \int_0^x \exp(-H^2/2\sigma_z^2) \frac{dx}{\sigma_z}\right\} \quad (2.34)$$

en el cual la integral se evalúa numéricamente. El cociente $Q(x)/Q$ representa la fracción del material que permanece en la atmósfera y como puede apreciarse, depende de la altura efectiva de la fuente, la velocidad del viento, la estabilidad atmosférica y la velocidad de deposición.

Es importante señalar que la expresión (2.32) no está basada en un conocimiento de los procesos que intervienen en el fenómeno de deposición seca, y que su planteamiento obedece a la necesidad de contar con una expresión que permita cuantificar el flujo de material que se deposita en la superficie del suelo a partir de un sistema práctico que genere valores de parámetros en base a información accesible, aún cuando no se tenga una explicación satisfactoria de los procesos involucrados.

TABLA 2.2.a

COEFICIENTES PARA GENERAR VALORES DE LA FRACCION DEL MATERIAL RADIOACTIVO NO DEPOSITADO

$$a(x) = \sum_{i=0}^4 r_i (\ln X)^i$$

Categoría de Estabilidad Atmosférica	Altura del Efluente H (M.)	Distancia X (M.)	i = 0	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4
A,B,C,D,E,F,G	0	0 < X ≤ 200000	+0.814948	+0.082896	-0.010218	0	0
A,B,C	30	100 < X ≤ 10000	+0.916287	+0.049159	-0.006783	0	0
A,B,C	30	10000 < X ≤ 50000	-2.160196	+0.699687	-0.041149	0	0
A,B,C	30	50000 < X ≤ 200000	-0.427901	+0.428530	-0.030859	0	0
D	30	X ≤ 210	+1.00	0	0	0	0
D	30	X > 210	+0.909107	+0.063662	-0.008093	0	0
E,F,G	30	X ≤ 5000	+1.00	0	0	0	0
E,F,G	30	5000 < X ≤ 30000	-3.443254	+1.041456	-0.061026	0	0
E,F,G	30	X > 30000	+0.509482	+0.264499	-0.023126	0	0
A,B,C	60	X ≤ 200	+1.00	0	0	0	0
A,B,C	60	200 < X ≤ 400	+1.10444	-0.01972	0	0	0
A,B,C	60	400 < X ≤ 5000	+0.778538	+0.089986	-0.009056	0	0
A,B,C	60	5000 < X ≤ 80000	-0.985347	+0.487382	-0.031399	0	0
A,B,C	100	X ≤ 500	+1.00	0	0	0	0
A,B,C	100	500 < X ≤ 10000	+0.813689	+0.083542	-0.008618	0	0
A,B,C	100	10000 < X ≤ 100000	-3.329431	+0.958941	-0.054824	0	0
D	100	X ≤ 1200	+1.00	0	0	0	0
D	100	X > 1200	+0.182118	+0.232491	-0.016638	0	0

TABLA 2.2.b

COEFICIENTES PARA GENERAR VALORES DE LA FRACCION DEL MATERIAL RADIOACTIVO NO DEPOSITADO

$$a(x) = \text{EXP} \left\{ \sum_{i=0}^4 r_i (\text{Ln}X)^i \right\}$$

CATEGORIA DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA	ALTURA DEL EFLUENTE H (M.)	DISTANCIA X (M.)	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4
D	60	$X \leq 1000$	+1.00	0	0	0	0
D	60	$1000 < X \leq 80000$	+1.081420	-0.398108	+0.053222	-0.002642	0
E, F, G	60	$X \leq 43000$	+1.00	0	0	0	0
E, F, G	60	$X > 43000$	-468.77906	+168.66928	-22.78067	+1.369045	-0.030895

TABLA 2.3

COEFICIENTES PARA GENERAR VALORES DEL FACTOR DE DEPOSICION RELATIVA (M^{-1})

$$D(x)/Q = \text{EXP} \left\{ \sum_{i=0}^5 S_i (\text{Ln} X)^i \right\}$$

Categoría de Estabilidad Atmosférica	Altura del Efluente H (M.)	Distancia X (M.)	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
A,B,C,D, E,F,G	0	100<X<200000	-7.36038	-0.16104	-0.03087	0	0	0
A,B,C	30	100<X<300	+53.394514	-23.538388	0	0	0	0
A,B,C	30	300<X<500	+9.325146	-5.395105	+0.382101	0	0	0
A,B,C	30	500<X<14000	-1.251441	-1.687555	+0.059368		0	0
A,B,C	30	X>14000	-39.936272	+5.385075	-0.262641	0	0	0
D	30	100<X<200	-23.307848	+0.629716	+0.280015	0	0	0
D	30	200<X<360	-27.378298	+2.881582	0	0	0	0
D	30	360<X<1100	-113.49869	+31.304927	-2.351503	0	0	0
D	30	1100<X<1610	-5.954716	-0.571941	0	0	0	0
D	30	X>1610	-2.687215	-1.177816	+0.021209	0	0	0
E,F,G	30	X<3000	0	0	0	0	0	0
E,F,G	30	3000<X<6600	-125.60107	+22.527624	-1.103994	0	0	0
E,F,G	30	6600<X<40000	-104.52648	+18.662168	-0.935341	0	0	0
E,F,G	30	X>40000	-15.364818	+1.658743	-0.125666	0	0	0
A,B,C	60	100<X<1100	-39.654990	+9.323257	-0.731659	0	0	0
A,B,C	60	X>1100	-939.08956	+463.31448	-91.095117	+8.827191	-0.422003	+0.007961

TABLA 2.3 (Continuación)

COEFICIENTES PARA GENERAR VALORES DEL FACTOR DE DEPOSICION RELATIVA (M^{-1})

Categoría de Estabilidad Atmosférica	Altura del Efluente H (M.)	Distancia X (M.)	i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
D	60	150<X≤330	+9361.4934	-15840.981	+8454.6846	-2033.1343	+230.4334	-10.05452
D	60	330<X≤610	-25.23725	+2.106615	0	0	0	0
D	60	610<X≤4500	-164.53863	+57.1732	-7.04283	+0.281756	0	0
D	60	X>4500	-4.86868	-9.742174	+0.000027	0	0	0
D	60	X≤150	0	0	0	0	0	0
E,F,G	60	X<30000	0	0	0	0	0	0
E,F,G	60	30000<X≤47600	+763.5852	-154.726	+7.655481	0	0	0
E,F,G	60	47600<X≤82600	-29.02646	+1.314453	0	0	0	0
E,F,G	60	X>82600	-26.90129	+1.128858	0	0	0	0
A,B,C	100	100<X≤375	-55.27343	+12.95181	-0.920032	0	0	0
A,B,C	100	375<X≤1250	-38.44656	+8.165509	-0.593258	0	0	0
A,B,C	100	1250<X≤12000	-1.06960	-1.754813	+0.065078	0	0	0
A,B,C	100	12000<X≤62600	-8.976805	-0.309361	0	0	0	0
A,B,C	100	X>62600	-55.93806	+8.174736	-0.383481	0	0	0
D	100	X<250	0	0	0	0	0	0
D	100	250<X≤950	-38.55144	+3.732253	0	0	0	0
D	100	950<X≤5110	-72.8785	+14.97017	-0.9094130	0	0	0
D	100	5110<X≤27600	-5.72047	-0.654879	0	0	0	0
D	100	X>27600	-3195.8471	+880.42722	-81.03329	+2.48165	0	0
E,F,G	100	100<X≤200000	0	0	0	0	0	0

CAPITULO 3

APLICACION DE LOS MODELOS DE DISPERSION

Los modelos de dispersión expuestos en el capítulo 2 no constituyen herramientas de simulación universales; es decir, su aplicabilidad a regiones y fuentes emisoras específicas está sujeta a que éstas posean características consiguientes con las hipótesis en las cuales se fundamentan dichos modelos.

Entre las características de la zona de Laguna Verde que, desde el punto de vista de la aplicabilidad de los métodos de simulación presentados en el capítulo anterior, conviene considerar, sobresalen la alta rugosidad que caracteriza a la superficie de los terrenos ubicados hacia las direcciones tierra adentro, las diferencias de rugosidad entre las superficies del suelo y el mar, lo accidentado de la topografía de la zona, así como otras características peculiares de los sitios costeros, como por ejemplo, la existencia de masas de aire sobre la tierra firme y el mar, con propiedades aerodinámicas y termodinámicas diferentes.

De entre estas características, es importante destacar las que se refieren a las diferencias de rugosidad entre la superficie del mar y la de los sitios relativamente planos ubicados hacia el SSE y S de la PNLV, así como las que caracterizan a la región montañosa en donde la rugosidad se incrementa notable-

mente. Como el proceso de dispersión turbulenta depende de la rugosidad de las superficies sobre las que fluye el aire, de manera que el proceso es más intenso cuando las superficies son más rugosas debido a que éstas contribuyen a incrementar la turbulencia de origen mecánico, se tiene, por consiguiente, que las propiedades de dispersión atmosférica que prevalecen en la zona, no son isotrópicas ni uniformes, condiciones que no han sido tomadas en cuenta en el presente trabajo. Más aún, de lo anterior se deduce, que al aplicar directamente los valores de los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z que aparecen en la tabla 2.1, los cuales son características de superficies poco rugosas, se tiende a sobreestimar las concentraciones sobre la región montañosa adyacente a la costa.

Con respecto a las características topográficas de la zona de estudio, conviene hacer notar que el modelo de dispersión comunmente denominado "gausiano", en el cual se basan los métodos de simulación presentados en este trabajo, es aplicable a regiones planas no confinadas en las cuales, la distribución de las concentraciones con respecto a las direcciones transversales a la dirección del viento se aproximan a curvas de Gauss. Aceptar esta hipótesis en el caso de terrenos accidentados como los que caracterizan a la zona de estudio, posiblemente requiera de correcciones adicionales. Asimismo, es importante señalar la posibilidad de que, al soplar vientos francos del Este ocurran fenómenos de recirculación de las corrientes de aire en la región montañosa adyacente a la costa con lo cual, además de invalidarse la hipótesis referente a la uniformidad del flujo, en el modelo "gausiano", podrían también originarse concentraciones de material radiactivo mayores a las que se predicen con los modelos de dispersión aquí presentados. Lo anteriormente expuesto hace patente la necesidad de llevar a cabo en la zona de estudio experimentos de dispersión atmosférica que

permitan determinar la confiabilidad de dichos métodos de simulación, cuando éstos se aplican a la región de Laguna Verde.

Por último, conviene aclarar que la inclusión de la altura del terreno en la ecuación para estimar la altura efectiva de la fuente (ecuación (2.3)), no tiene por objeto simular los fenómenos arriba señalados, sino que constituye un intento de modelar la aproximación de los efluentes a la superficie sinuosa del terreno.

Como se explicó en el capítulo 2, los modelos de dispersión operan en función de los siguientes cuatro parámetros meteorológicos: velocidad del viento, dirección del viento, estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla; los tres primeros se incorporaron a los modelos mediante la función de frecuencias conjuntas F_{klm} , la cual aparece en la tabla 3.1 en término del número de eventos correspondientes a cada combinación de dirección del viento, velocidad del viento y estabilidad atmosférica durante el período nov. 1977 - oct. 1979. La función F_{klm} , se obtuvo dividiendo los elementos de dicha tabla entre el total de eventos registrados en Laguna Verde, durante el período mencionado. Por otro lado, las horas de calma se asignaron en forma proporcional a las 16 direcciones de la rosa de los vientos, de acuerdo a la frecuencia de los vientos con velocidades en el intervalo de 0.5 a 1.0 m/s, para cada categoría de estabilidad atmosférica.

En lo que respecta a la altura de la capa de mezcla, debido a que para la zona de Laguna Verde no existen datos de esta índole, se recurrió a la información recabada en la ciudad de Veracruz, la cual fué proporcionada por la CFE. Sin embargo, en virtud de que no se conoce el comportamiento de dicho pará

metro meteorológico en combinación con la función de distribución de frecuencias conjuntas de los vientos y estabilidad atmosférica, se consideró conveniente caracterizarlo mediante un único valor promedio. Este valor, el cual se alimentó del modelo de dispersión utilizado para estimar las concentraciones medias anuales, fué de 825 m y corresponde al valor medio de la altura de capa de mezcla máxima registrada durante el período de 1972 a 1974. Resulta interesante notar, que en la ciudad de Brownsville, Texas, la cual se encuentra situada muy proxima a la costa del Golfo de México a más de 500 km. al norte del puerto de Veracruz, la altura de la capa de mezcla máxima media anual alcanza los 1,284 m., lo cual no hace suponer que en Laguna Verde el valor de dicha altura sea muy diferente al de 825 m. que caracteriza al puerto de Veracruz.

3.1 Resultados

Los resultados obtenidos del modelo de dispersión descrito en la parte 2.2 del presente trabajo, con el cual se estimaron las concentraciones normalizadas medias anuales dentro de una zona que abarca un rádio de 70 km de la PNLV, están presentados en los anexos 1 y 2. En el anexo 2 se han incluido además, los valores de deposición relativa media anual.

Las concentraciones normalizadas medias anuales que se muestran en el anexo 1 han sido sobreestimadas, ya que por una parte, se ha supuesto que la emisión del material radiactivo se efectúa a nivel del piso, y por la otra, no se han considerado los procesos de decaimiento radiactivo y sorpción del material en la superficie del suelo. Estos resultados también están presentados en la fig. 3.1 y 3.2 en forma de líneas de isoconcentración, en las cuales, se abarca una zona de 20 y 70 km de radio, respectivamente, a partir de la PNLV. Por otro lado, y aunque no se puede apreciar en estas figuras, las concentraciones

medias anuales máximas se obtuvieron hacia el NE y NNE de la planta, direcciones que sitúan dichas concentraciones mar adentro. Asimismo, es interesante notar, que las concentraciones decrecen más rápidamente tierra adentro que en la dirección paralela a la costa.

Por otra parte, los valores medios anuales de deposición relativa y de las concentraciones normalizadas que están presentadas en el anexo 2 se obtuvieron suponiendo una descarga del tipo "mixto", es decir, se ha considerado que el efluente se libera desde una altura mayor a la altura de las estructuras sólidas adyacentes a la fuente, pero menor a dos veces éstas. La simulación se hizo tomando en cuenta las alturas del terreno que caracterizan a la región, y los procesos de decaimiento radiactivo y sorpción del material en la superficie del suelo típicos de los radioyodos, para los cuales ambos procesos son de consideración. Los datos alimentados al modelo fueron los siguientes:

altura del edificio del reactor	70 m
altura de la fuente	75
velocidad de escape de los gases	13.46 m/s
diámetro del orificio de escape de los gases.	2.5 m
vida media del material ¹⁰ (radioyodos)	8 días

La información referente a las alturas máximas del terreno se muestra en la tabla 3.2; en ella, se puede observar que la máxima altura considerada fué de 500 m. Lo anterior se debió a que valores mayores a éste no tienen influencia alguna en la determinación de las concentraciones cuando se utilizan los datos referentes a las características del efluente arriba expuestos en virtud de la restricción relativa a la altura efectiva de la fuente (véase la ecuación (2.3)),

la cual limita dicha altura a valores positivos. Por otro lado, las alturas del terreno correspondientes a lugares comprendidos entre los sitios que aparecen en la tabla 3.2, se obtuvieron mediante interpolación lineal, para cada dirección de la rosa de los vientos.

En el anexo 3 se encuentran tabulados los resultados de la simulación llevada a cabo con objeto de estimar los niveles de probabilidad y sus respectivas concentraciones en el caso de ocurrir una emisión accidental de material radiactivo. La simulación se hizo considerando una superficie de $2\,997\text{ m}^2$ para el área vertical de la sección transversal de la estructura que contiene a uno de los reactores. Los resultados mostrados en este anexo corresponden al límite de la zona de exclusión (680 m) y al límite de la zona de baja población (15 km). Asimismo, los valores de las concentraciones normalizadas que se exceden 0.5% del tiempo en cada una de las 16 direcciones de la rosa de los vientos y los que se exceden 5% tomando todas las direcciones en conjunto, se presentan en las figuras 3.3 y 3.4, respectivamente, para períodos de 2, 8 y 16 horas como de 3 y 26 días en función de la distancia viento abajo y dentro de un radio de 15 km a partir de la PNLV. A fin de identificar las direcciones en las cuales ocurren las concentraciones normalizadas máximas correspondientes a el valor de 99.5 percentil, se trazaron las curvas que aparecen en las figuras 3.5 y 3.6; en ellas se puede observar que las concentraciones máximas características de períodos de 2, 8 y 16 horas se presentan en la dirección E, mientras que las correspondientes a 3 y 26 días, en la dirección NE.

TABLA 3.1

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

Período: Nov. 77-Oct.79

Categoría de Estabilidad A

Nivel: 10 Mts.

Rango de Velocidad m/s	0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18
Dirección										
S	2	4	9	7	11	14	15	17	4	1
SSW	2	8	21	25	12	6	0	1	0	0
SW	1	13	17	0	0	0	0	0	0	0
WSW	2	13	15	4	0	0	0	0	0	0
W	1	13	19	15	6	5	2	0	0	0
WNW	3	20	51	39	25	14	11	1	0	0
NW	0	10	35	43	20	24	30	5	4	0
NNW	0	3	13	13	10	8	14	1	0	0
N	1	1	3	4	3	4	2	1	0	0
NNE	0	2	2	2	0	1	0	0	0	0
NE	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
ENE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ESE	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
SE	0	0	1	0	0	0	0	2	3	17
SSE	2	0	2	3	1	7	11	5	22	33

No. de Calmas=3

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

		Categoría de Estabilidad <u>B</u>									
Rango de Velocidad m/s		0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección											
S		2	5	12	9	5	10	10	6	6	1
SSW		2	18	16	13	3	1	1	0	0	0
SW		6	18	19	8	0	0	0	0	0	0
WSW		3	15	23	2	0	0	0	0	0	0
W		3	21	25	7	1	2	2	0	0	0
WNW		6	39	43	22	2	4	2	2	0	0
NW		4	20	34	17	4	9	8	0	0	0
NNW		0	12	10	6	3	4	3	3	0	0
N		1	4	7	1	5	1	1	0	0	0
NNE		5	7	1	1	0	0	0	0	0	0
NE		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ENE		2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
E		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESE		0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
SE		0	2	0	2	1	1	5	4	11	30
SSE		0	3	1	3	8	3	16	14	29	25

No. de Calmas= 15

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

		Categoría de Estabilidad <u>C</u>									
Rango de Velocidad m/s		0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección											
S		1	4	20	16	13	11	26	13	2	7
SSW		1	9	29	21	7	2	5	5	6	1
SW		4	9	23	11	2	2	0	0	0	0
WSW		0	5	19	8	0	0	0	0	0	0
W		1	8	21	9	4	1	4	0	0	0
WNW		0	12	37	25	20	19	17	0	0	0
NW		0	5	38	24	17	14	14	2	0	0
NNW		0	13	32	32	9	3	6	1	0	0
N		0	4	27	7	2	4	7	0	0	0
NNE		0	4	14	7	0	0	1	0	0	0
NE		0	3	6	2	0	0	0	0	0	0
ENE		0	4	3	0	0	0	0	0	0	0
E		0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
ESE		0	0	1	2	0	0	2	0	1	6
SE		0	0	1	1	4	8	10	5	9	32
SSE		1	4	7	16	9	14	30	24	26	14

No. de Calmas = 3

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

		Categoría de Estabilidad <u>D</u>								
Rango de Ve locidad										
m/s	0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección										
S	11	33	60	87	96	98	148	100	98	53
SSW	5	26	36	39	36	25	25	18	15	10
SW	5	14	18	23	18	2	5	0	0	0
WSW	6	20	15	8	3	2	4	0	0	0
W	7	27	24	20	15	13	5	0	0	0
WNW	3	42	41	51	41	46	35	4	0	0
NW	7	34	54	67	82	68	70	18	5	0
NNW	6	49	72	114	136	110	162	28	4	0
N	5	32	92	118	124	94	111	27	2	0
NNE	7	54	116	119	78	43	26	3	0	0
NE	5	58	34	42	36	13	3	1	0	0
ENE	4	10	5	14	11	0	0	0	0	0
E	5	5	3	1	1	0	0	1	3	1
ESE	4	17	21	21	26	23	37	23	34	79
SE	4	39	72	90	146	155	248	156	194	272
SSE	8	35	72	162	239	226	408	325	283	282

No. de Calmas = 78

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

		Categoría de Estabilidad <u>E</u>									
Rango de Velocidad m/s		0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección											
S		5	20	35	42	24	17	13	8	9	4
SSW		4	11	14	23	8	2	3	4	2	4
SW		4	14	22	16	0	1	0	0	0	3
WSW		4	16	20	6	2	0	0	0	0	0
W		1	18	13	12	1	1	0	0	0	0
WNW		3	12	19	11	5	3	6	3	0	0
NW		0	21	31	32	18	26	16	6	4	0
NNW		3	29	67	48	50	50	61	25	0	0
N		4	45	134	106	103	85	74	20	1	0
NNE		8	101	305	189	67	30	13	0	0	0
NE		13	126	152	79	18	4	4	0	0	0
ENE		2	30	16	5	0	2	1	0	0	0
E		10	16	18	7	2	0	2	0	0	0
ESE		12	52	38	19	12	8	13	2	3	10
SE		4	53	94	62	44	43	37	36	19	32
SSE		2	27	63	59	72	76	99	73	60	78

No. de Calmas = 73

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

Categoría de Estabilidad F

Rango de Velocidad m/s	0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección										
S	0	5	5	6	6	2	2	0	3	0
SSW	1	6	4	0	0	0	0	0	0	0
SW	1	7	4	0	0	0	0	0	0	0
WSW	0	1	4	1	0	0	0	0	0	0
W	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0
WNW	0	1	2	2	0	2	2	0	0	0
NW	0	0	5	2	2	3	1	1	0	0
NNW	1	6	9	8	7	4	6	7	4	0
N	1	24	55	22	15	11	7	2	0	0
NNE	2	72	219	78	28	10	2	0	0	0
NE	0	114	205	132	16	6	1	0	0	0
ENE	2	31	10	2	1	0	0	0	0	0
E	1	11	2	1	0	0	0	0	0	0
ESE	3	16	4	0	0	0	1	0	0	0
SE	2	11	6	4	1	3	0	2	0	0
SSE	0	10	6	3	7	11	6	4	3	2

No. de Calmas = 19

TABLA 3.1 (Continuación)

DISTRIBUCION DE FRECUENCIA CONJUNTA DE VIENTOS Y CATEGORIAS DE ESTABILIDAD ATMOSFERICA

		Categoría de Estabilidad <u>G</u>									
Rango de Ve locidad m/s		0.55-1.0	1.1-2.0	2.1-3.0	3.1-4.0	4.1-5.0	5.1-6.0	6.1-8.0	8.1-10.0	10.1-13.0	13.1-18.0
Dirección											
S	7	8	4	1	0	0	0	0	0	0	0
SSW	7	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
SW	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WSW	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WNW	3	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
NW	7	4	0	1	1	1	2	0	0	0	0
NNW	4	14	1	2	1	0	1	0	0	0	0
N	6	19	3	12	5	0	0	0	0	0	0
NNE	11	65	17	30	4	1	0	0	0	0	0
NE	12	126	24	62	8	0	0	0	0	0	0
ENE	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
E	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESE	14	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SE	17	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SSSE	11	12	0	0	0	0	0	0	0	1	0

TABLA 3.2

ALTURAS DEL TERRENO, LAGUNA VERDE, VER.

Dirección	Distancia(M.)	Altura(M.)	Dirección	Distancia(M.)	Altura(M.)
SSE	29,000	0	WNW	400	0
	50,000	50		800	50
	52,000	100		2,200	100
	56,000	100		3,500	250
	57,000	100		4,000	500
S	3,000	0	NW	600	0
	4,500	50		2,200	100
	12,000	200		9,000	150
	14,000	250		12,500	250
	14,500	400		14,000	500
SSW	3,000	0	NNW	5,000m	0
	4,200	50		7,500m	50
	6,000	300		12,500m	100
	13,500	350		13,500m	150
	15,000	500		17,000m	150
SW	3,000	0	N		0
	5,000	100	NNE		0
	9,300	200	NE	Todas las	0
	10,800	400	ENE	distancias	0
	11,500	500	E		0
WSW	1,500	0	ESE		0
	2,300	50	SE		0
	7,200	250			
	13,500	300			
	17,000	500			
W	1,000	0			
	1,500	50			
	2,700	150			
	4,000	250			
	5,000	500			

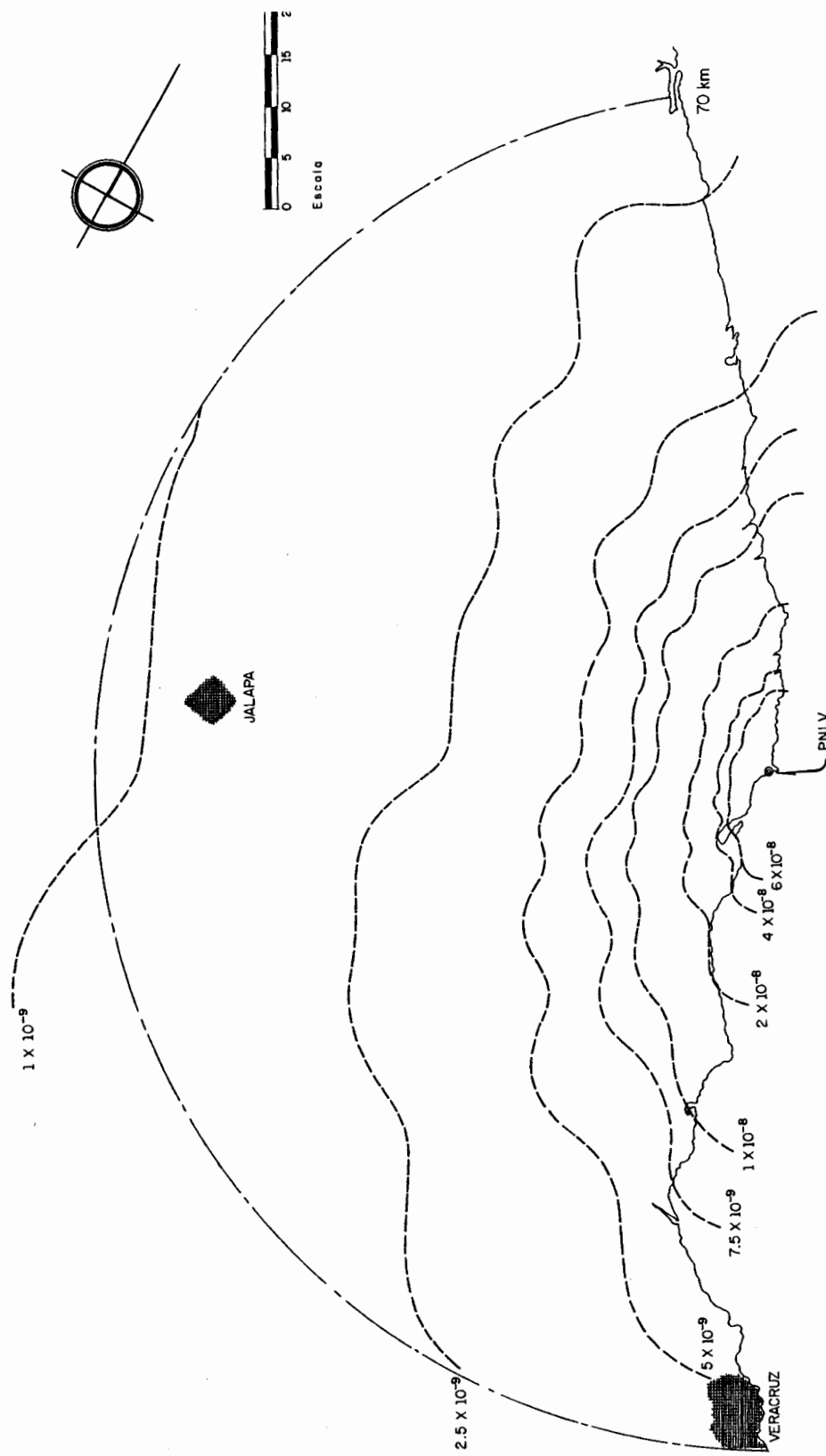


Fig 3.2 Líneas de isoconcentración normalizada promedio anual (seg/m^3). Laguna Verde, Veracruz

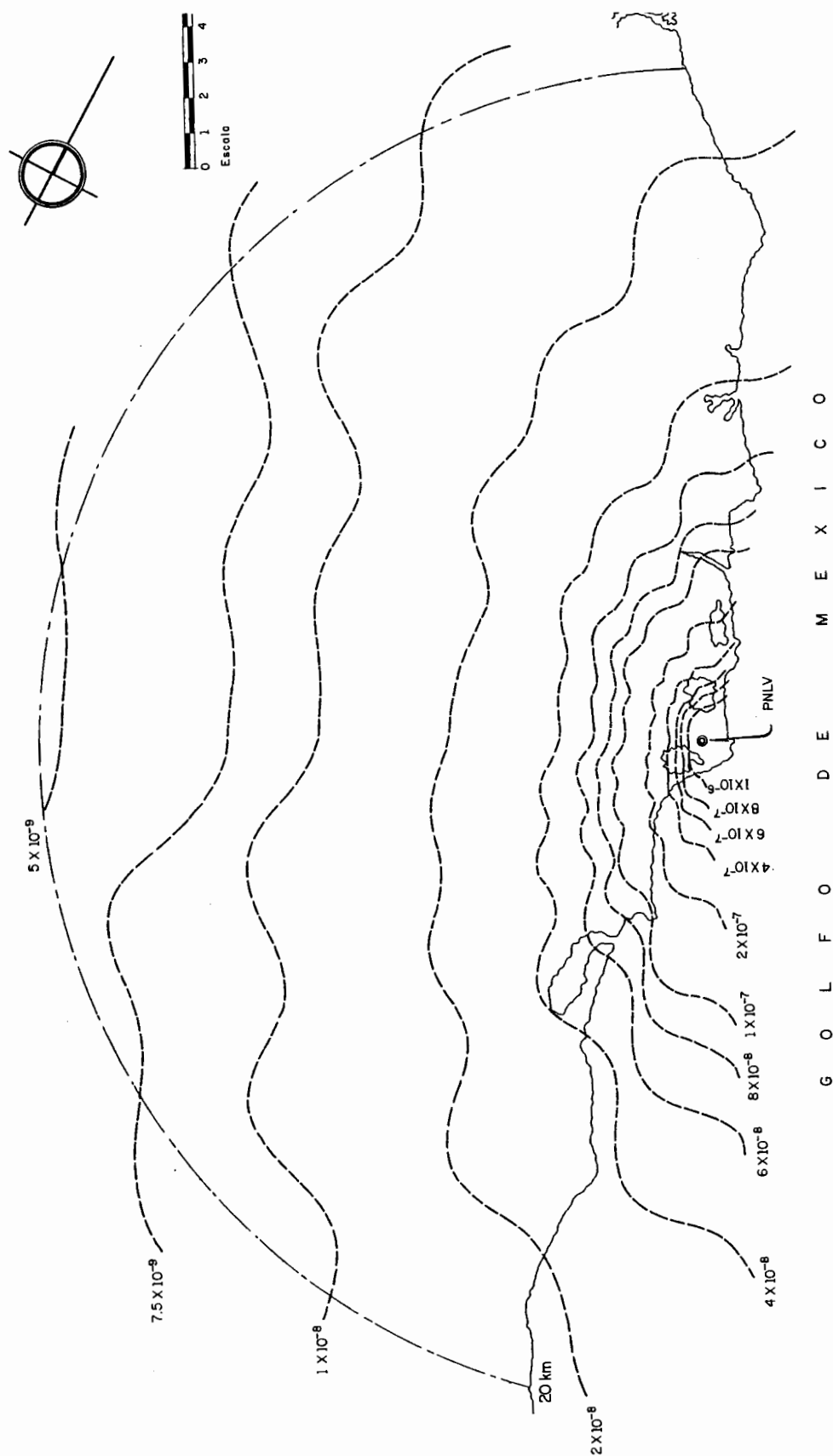
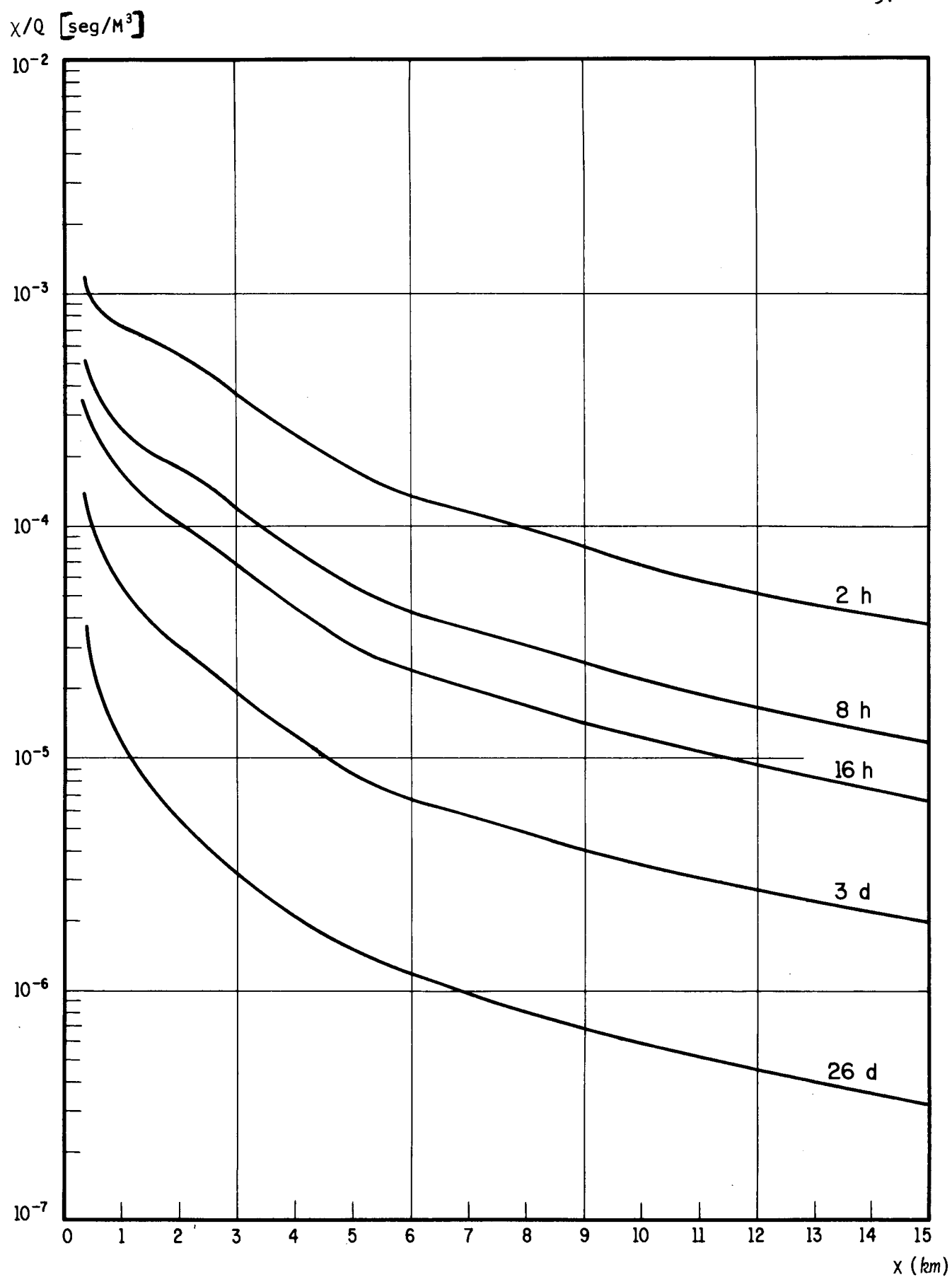


Fig 3.1 Líneas de isoconcentración normalizada promedio anual (seg/m^3). Laguna Verde, Veracruz

FIG 3.3.1 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. N

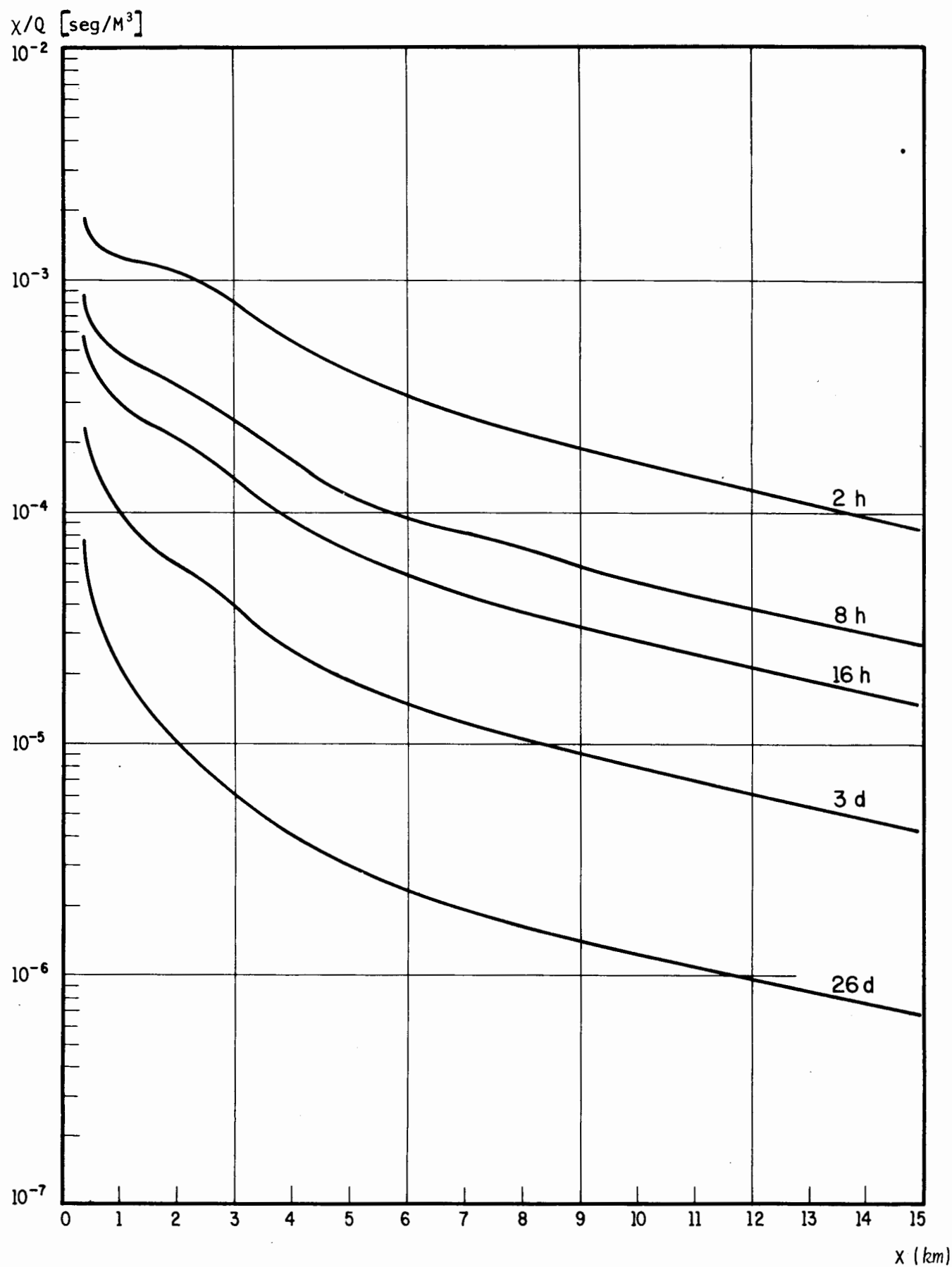


FIG 3.3.2. VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. NNE

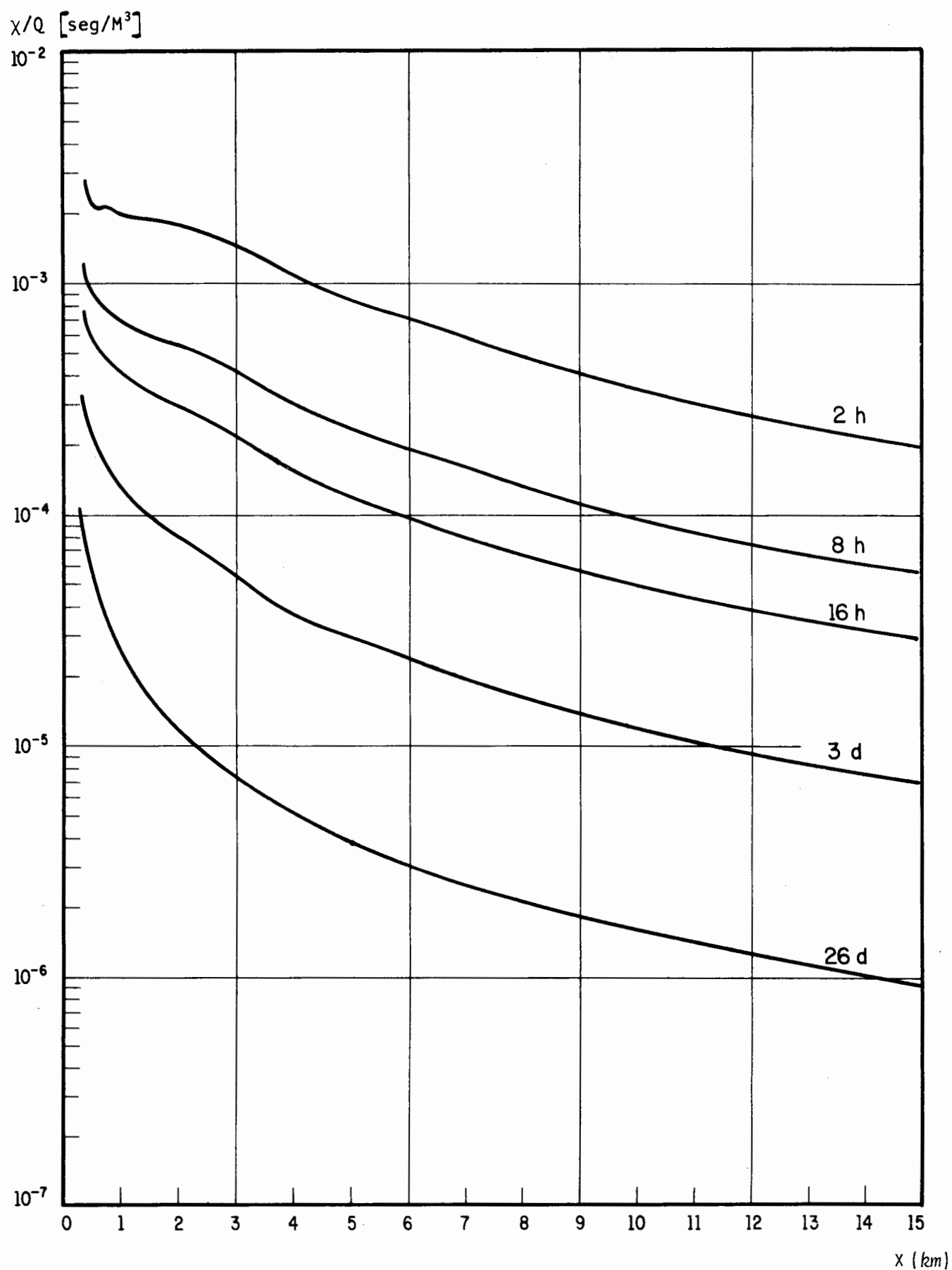


FIG 3.3.3 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. NE

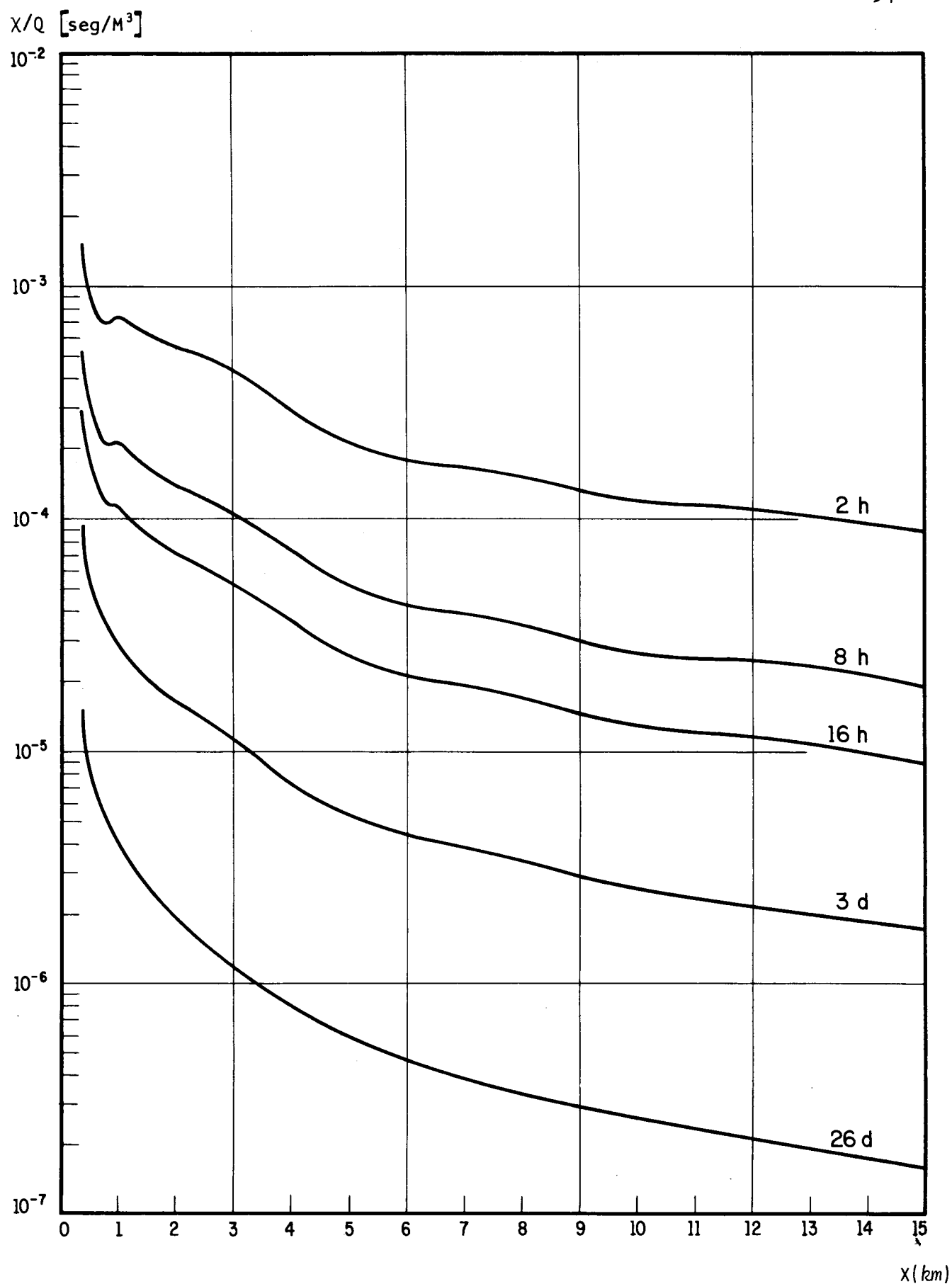
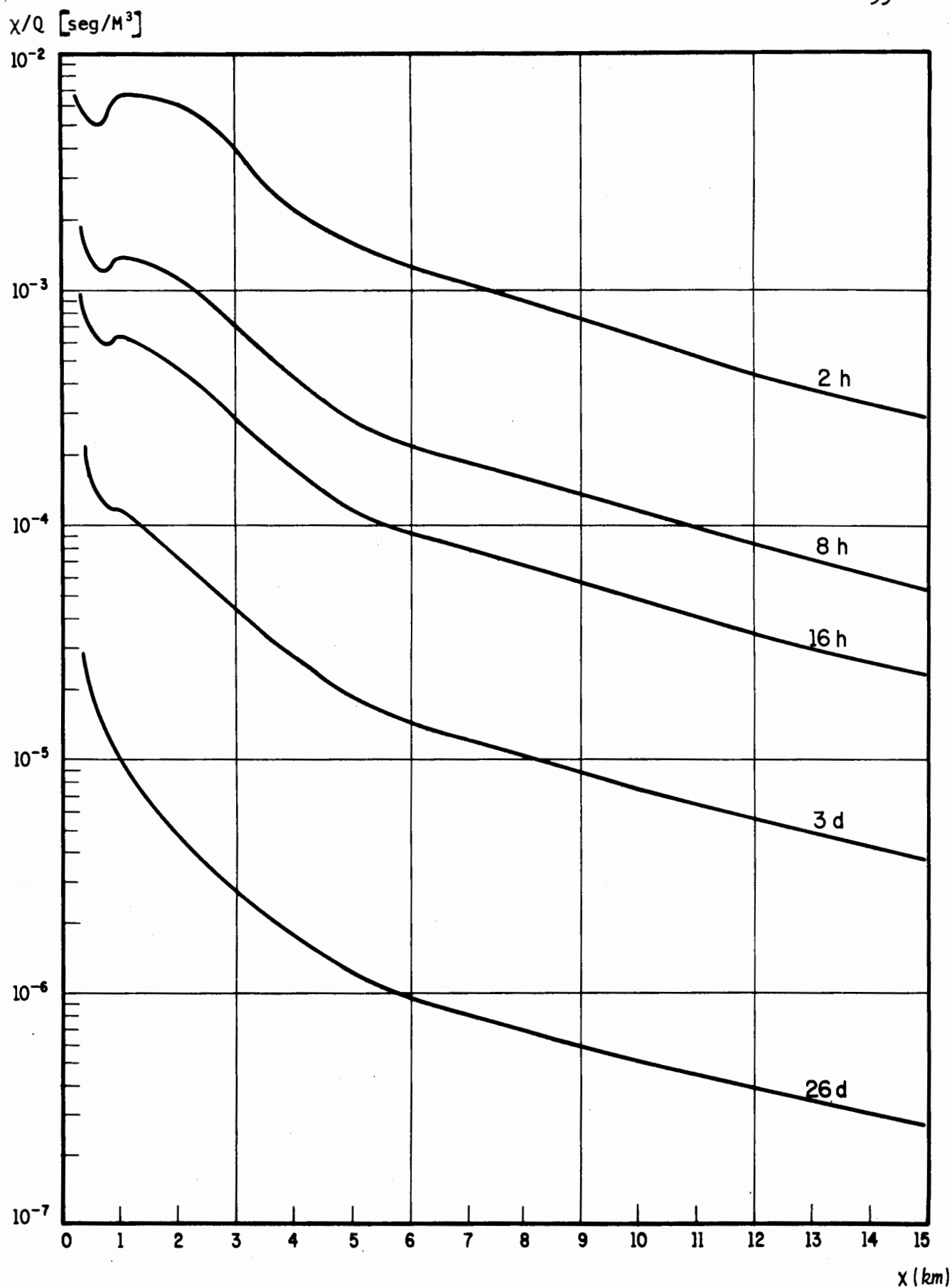
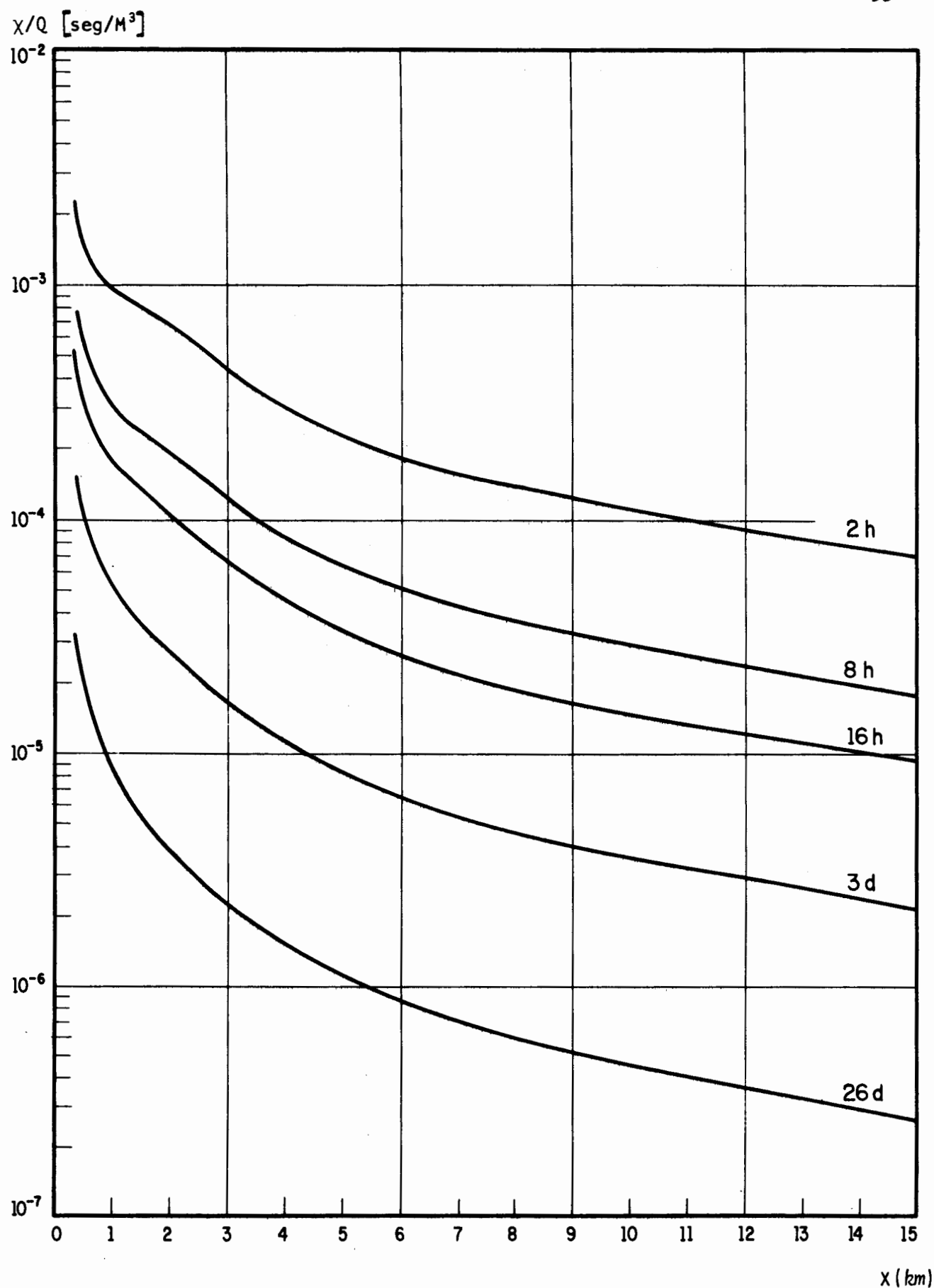
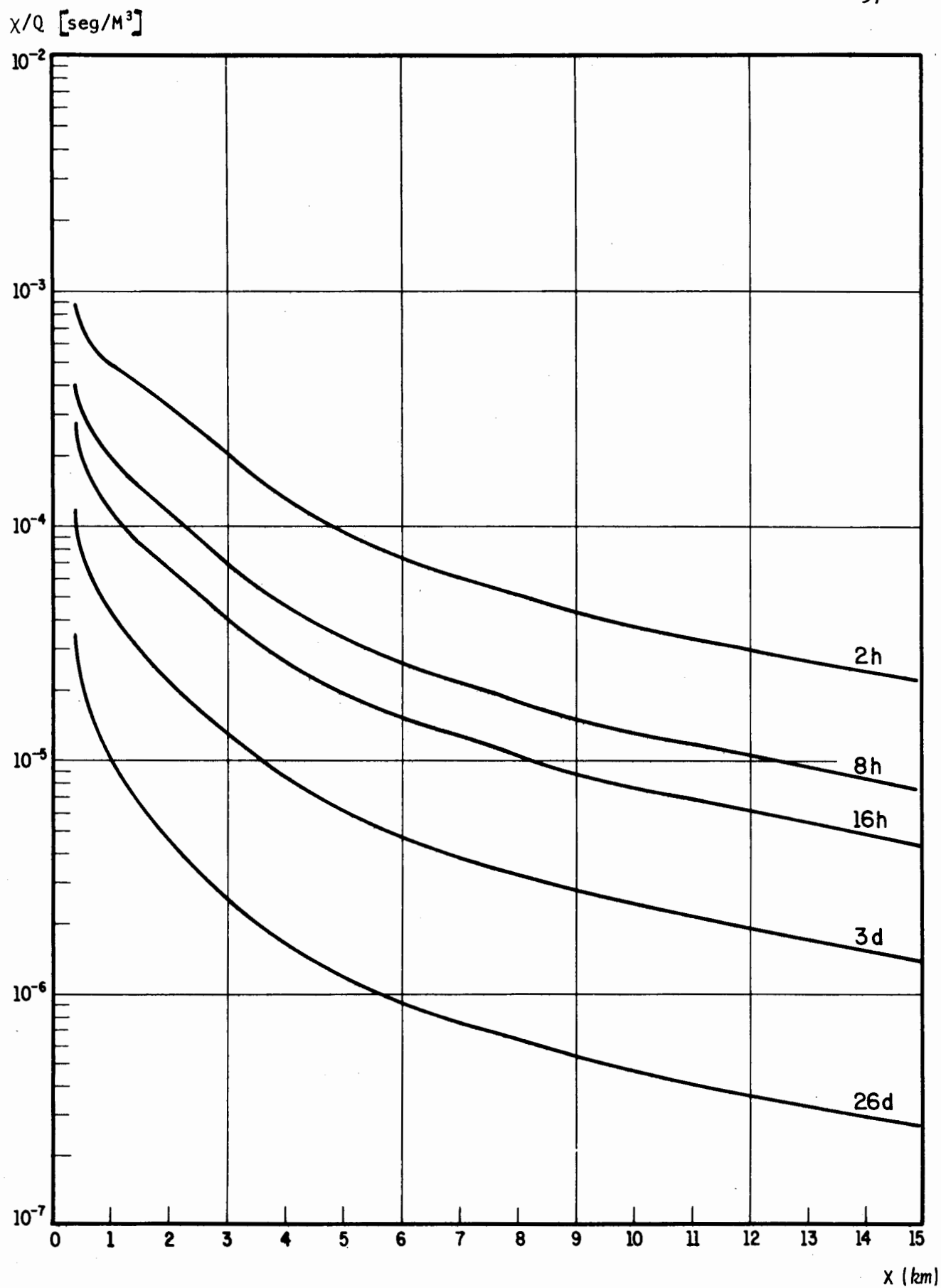
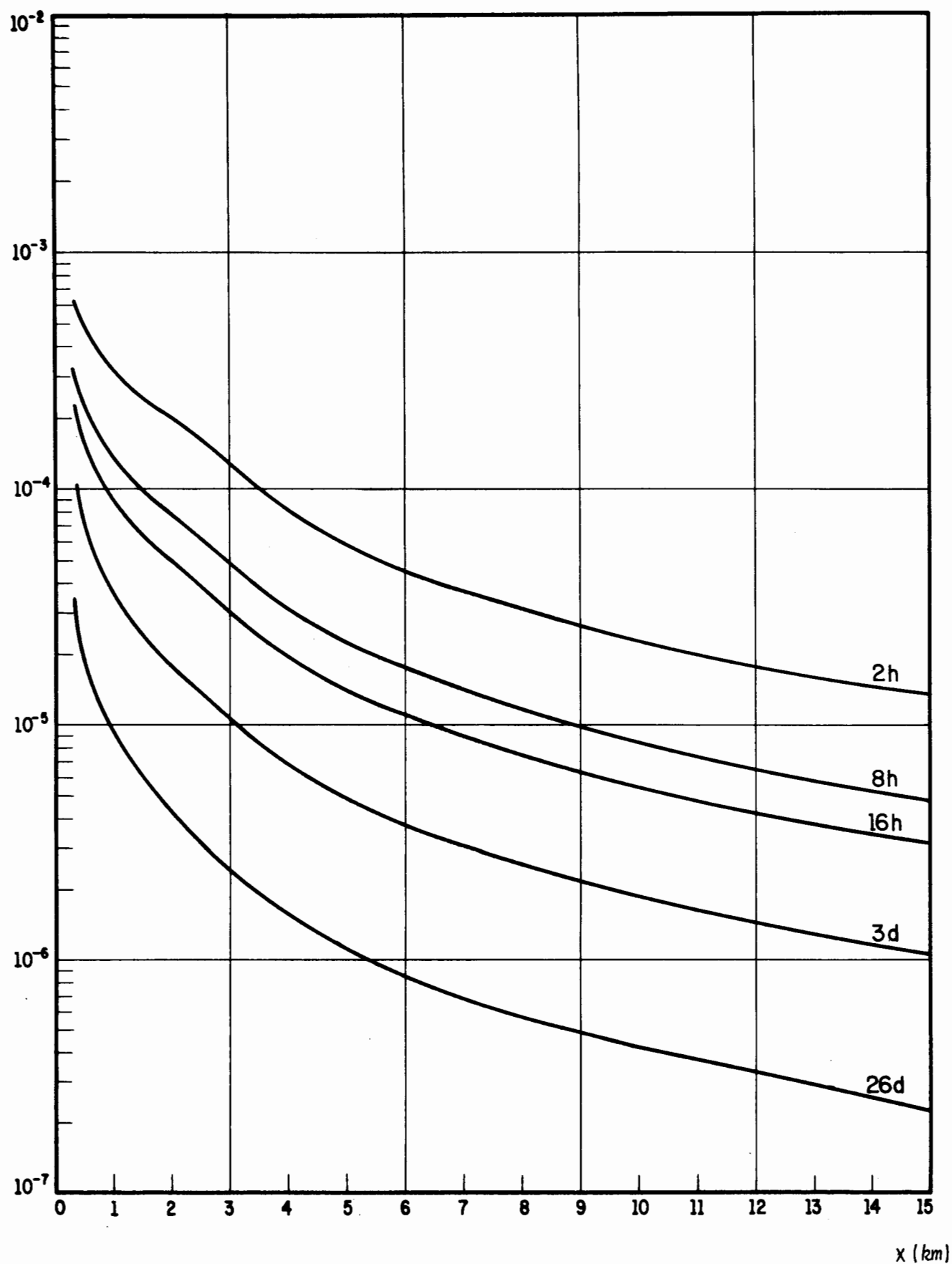


FIG 3.3.4 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. ENE

FIG 3.3.5 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. E

FIG 3.3.6 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. ESE

FIG 3.3.7 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. SE

χ/Q [seg/M³]FIG 3.3.8 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. SSE

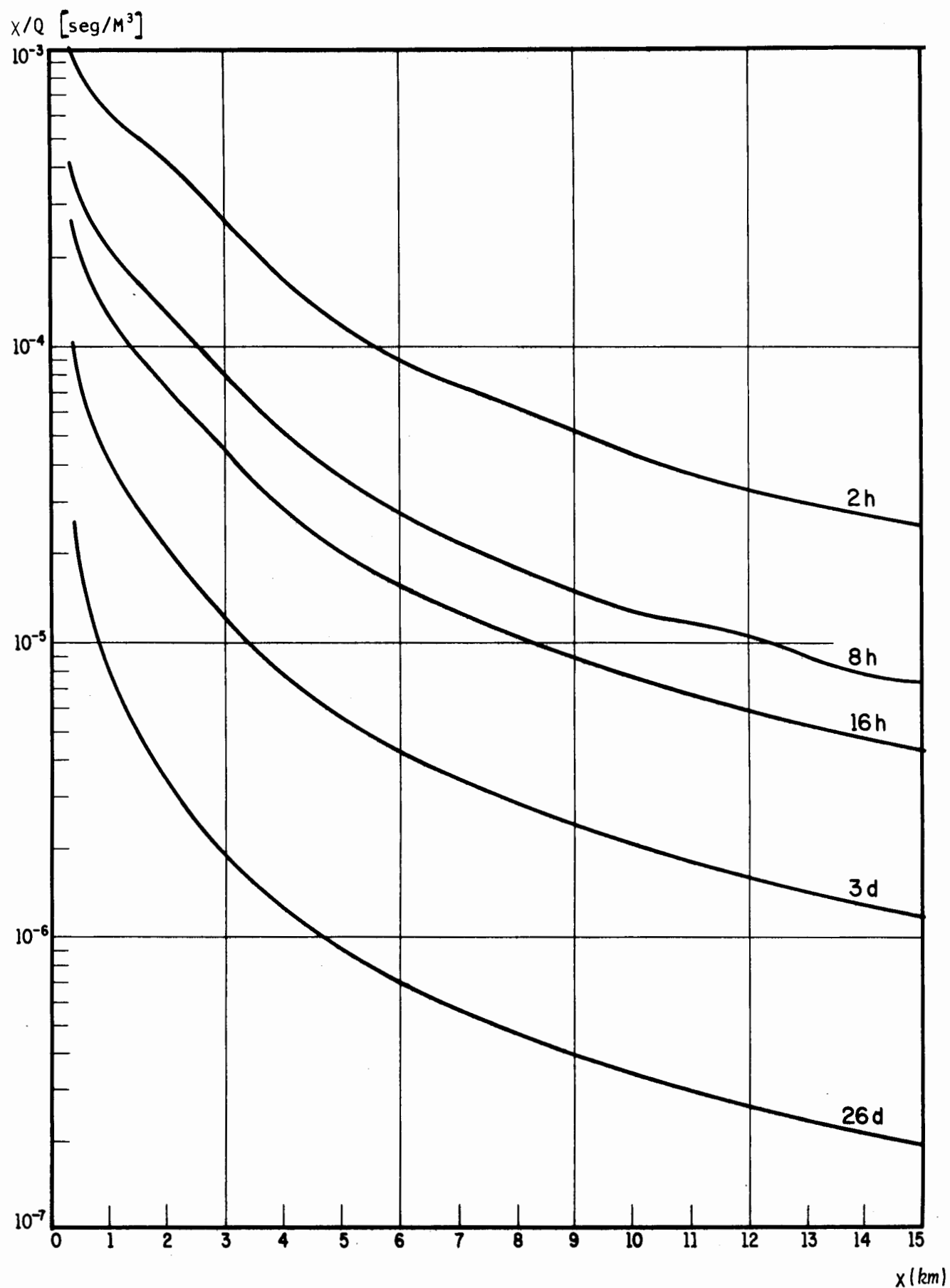
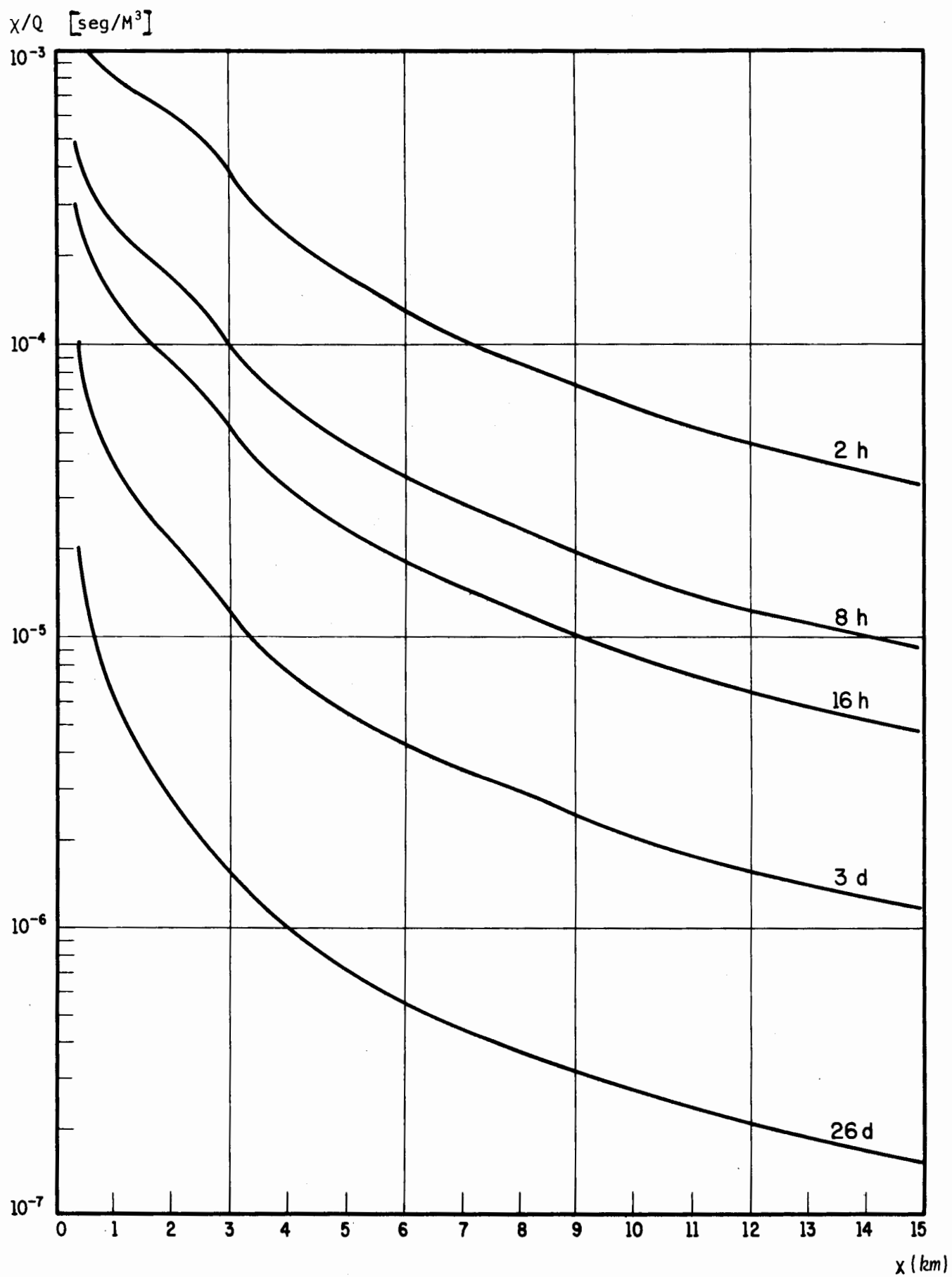


FIG 3.3.9 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. S

FIG 3.3.10 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. SSW

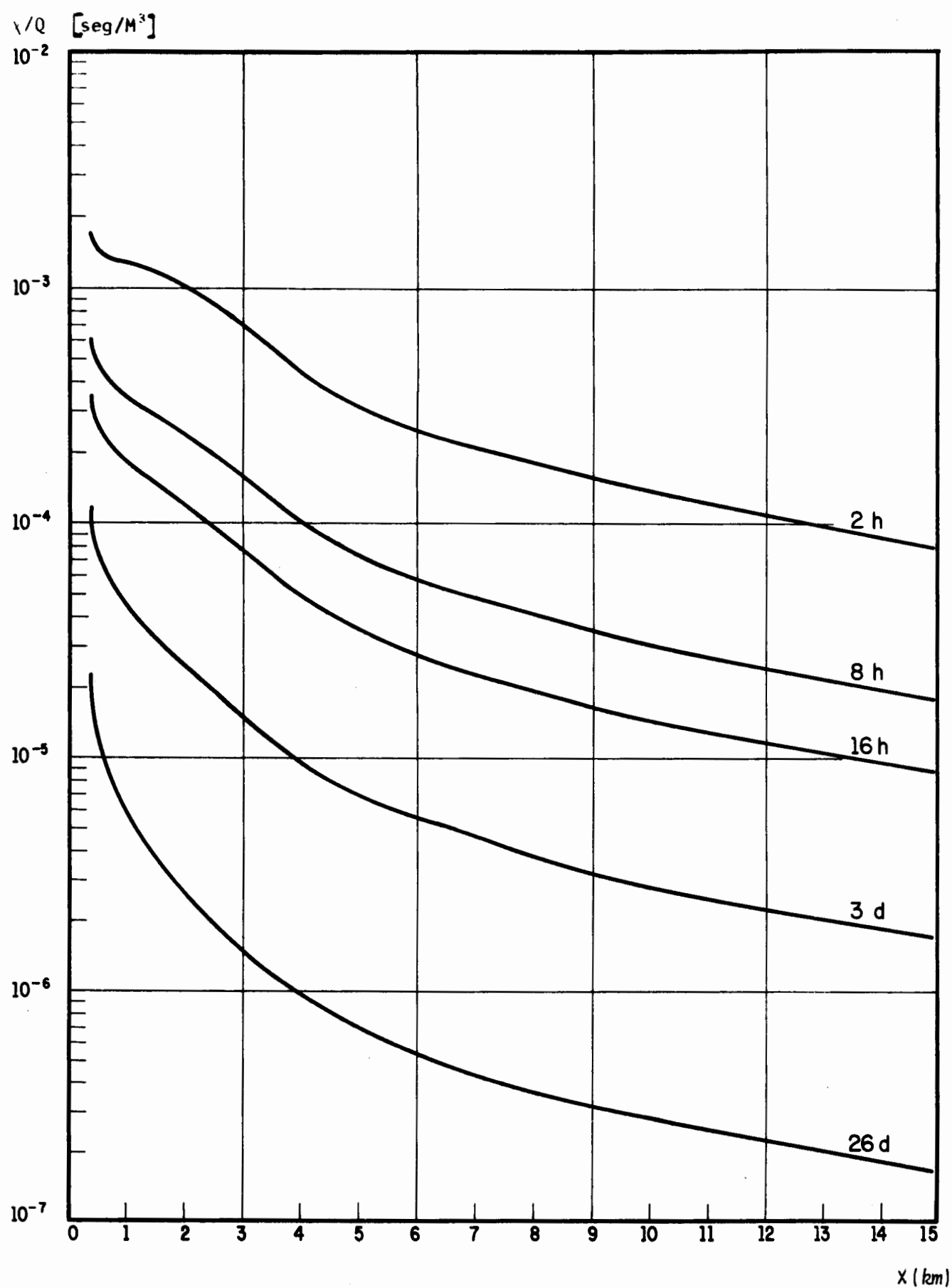


FIG 3.3.11 VALORES DE x/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. SW

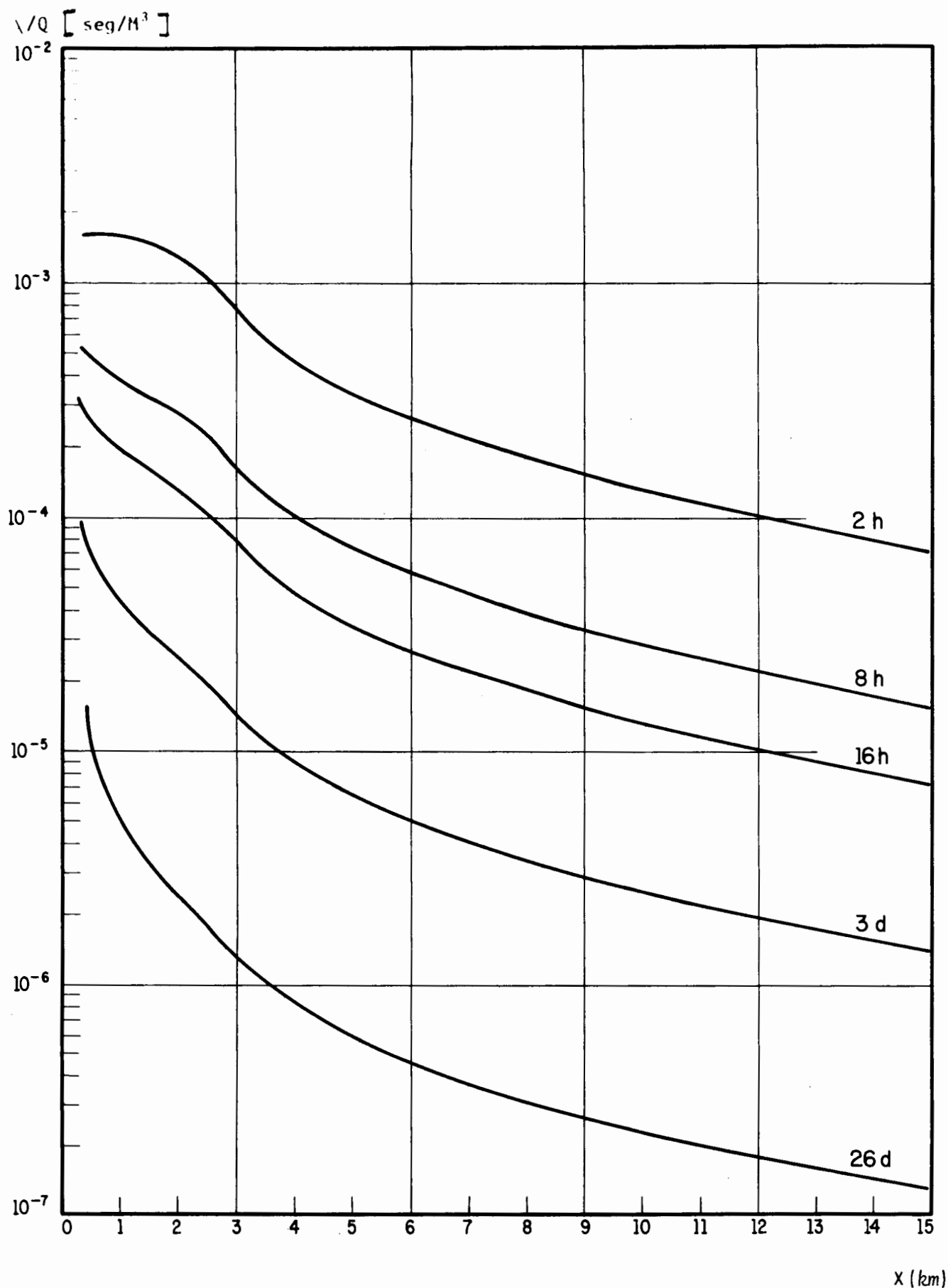


FIG 3.3.12 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. WSW

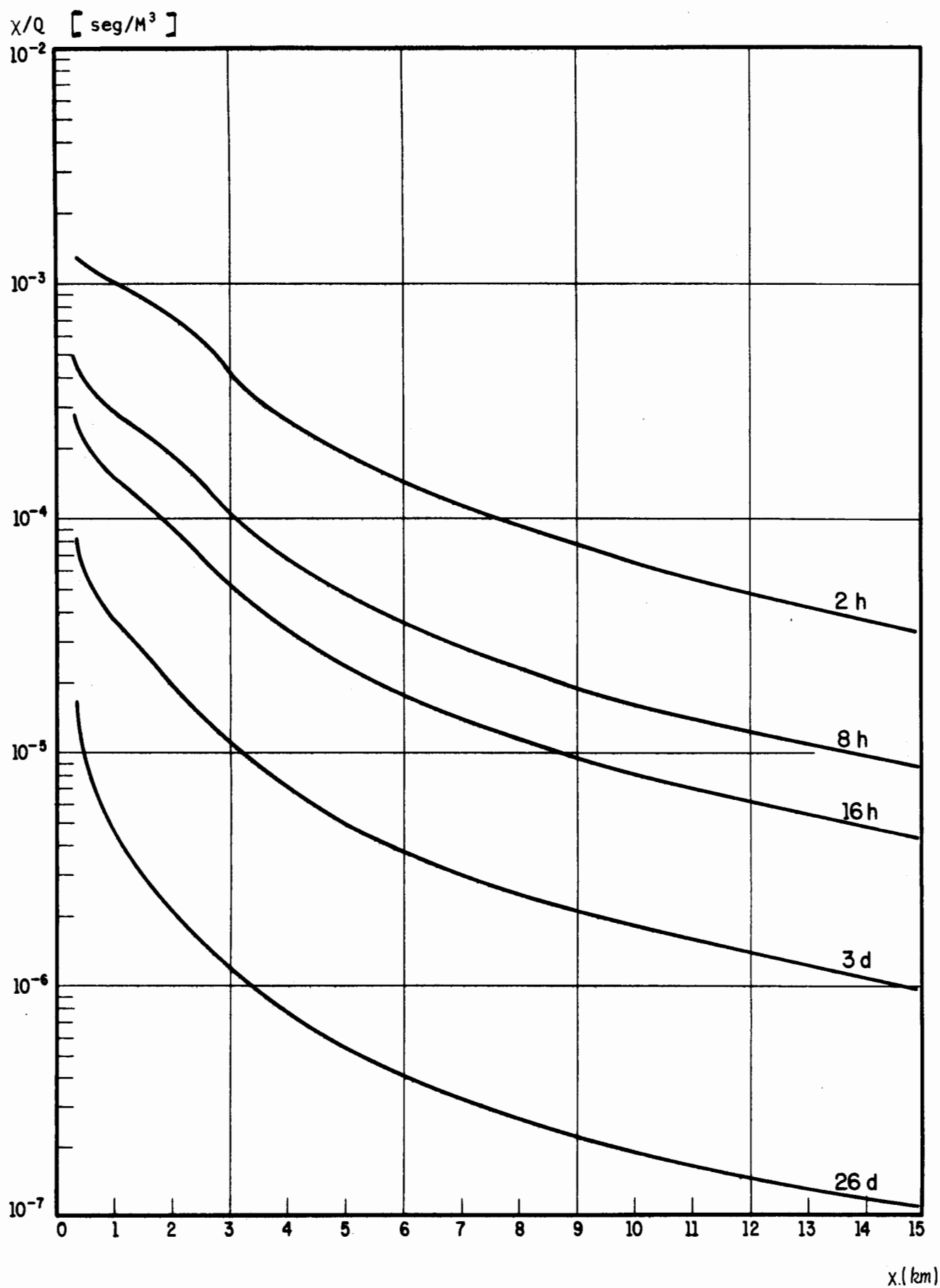
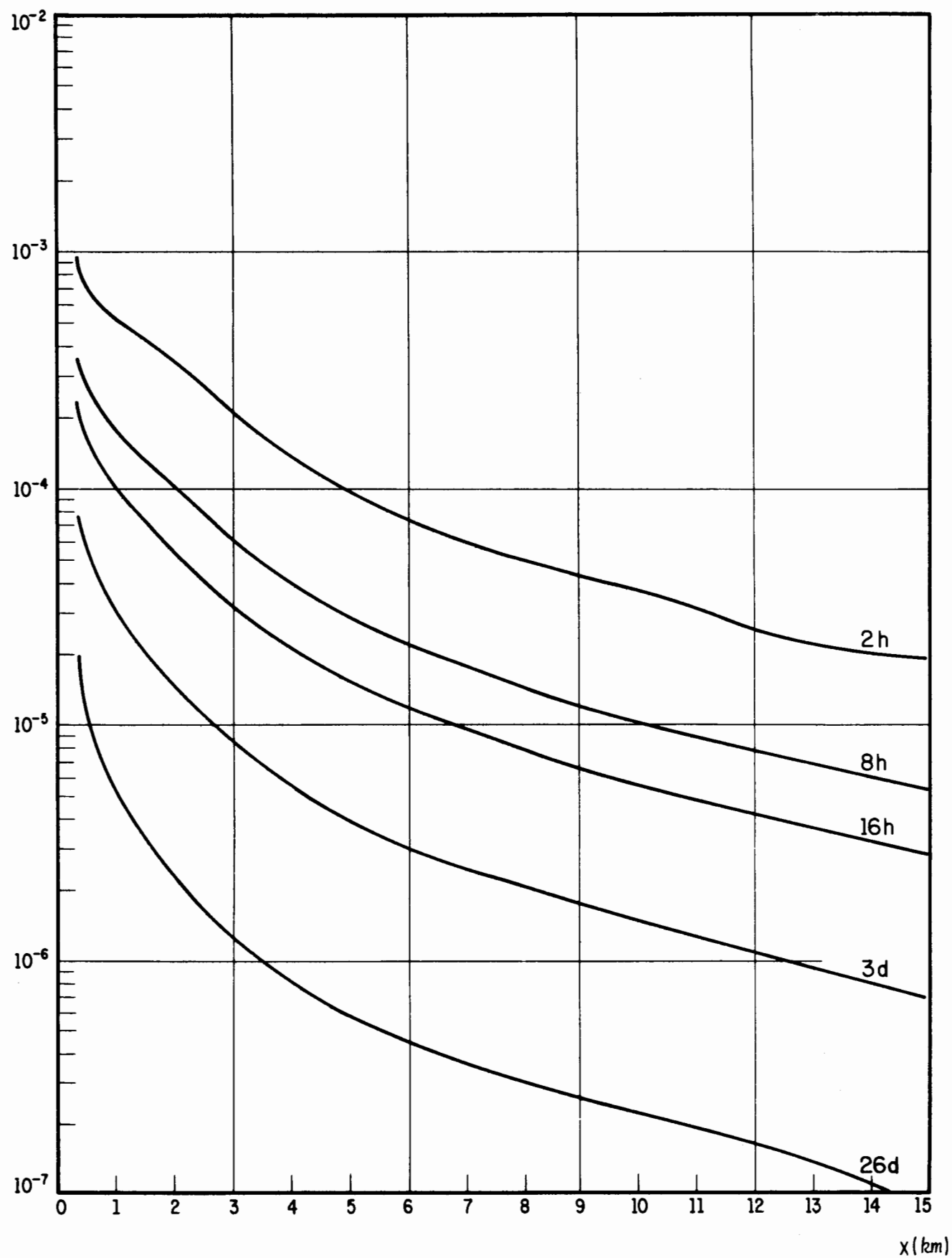


FIG 3.3.13 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. W

χ/Q [seg/M³]FIG 3.3.14 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. WNW

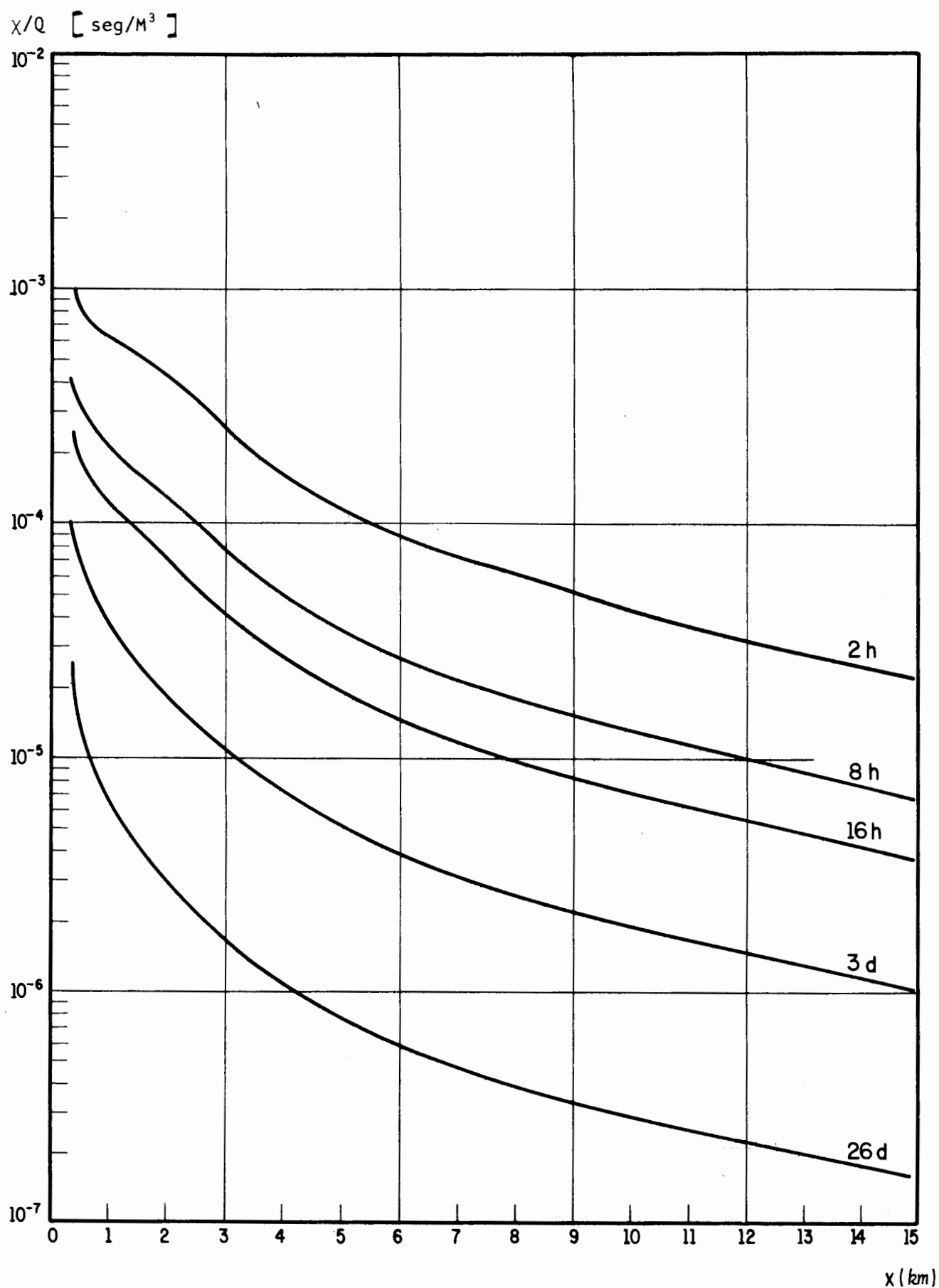


FIG 3.3.15 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. NW

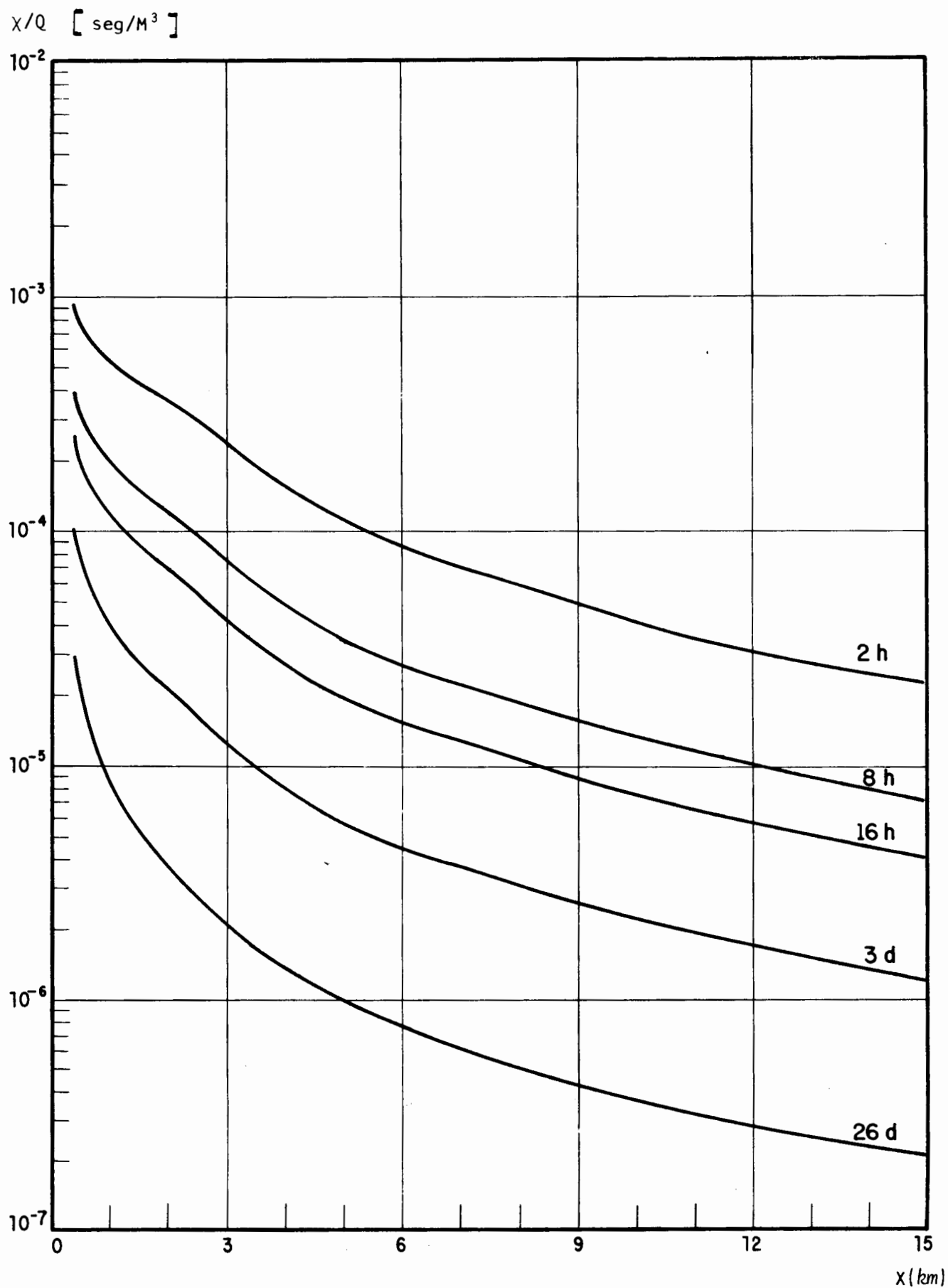


FIG 3.3.16 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO. NNW

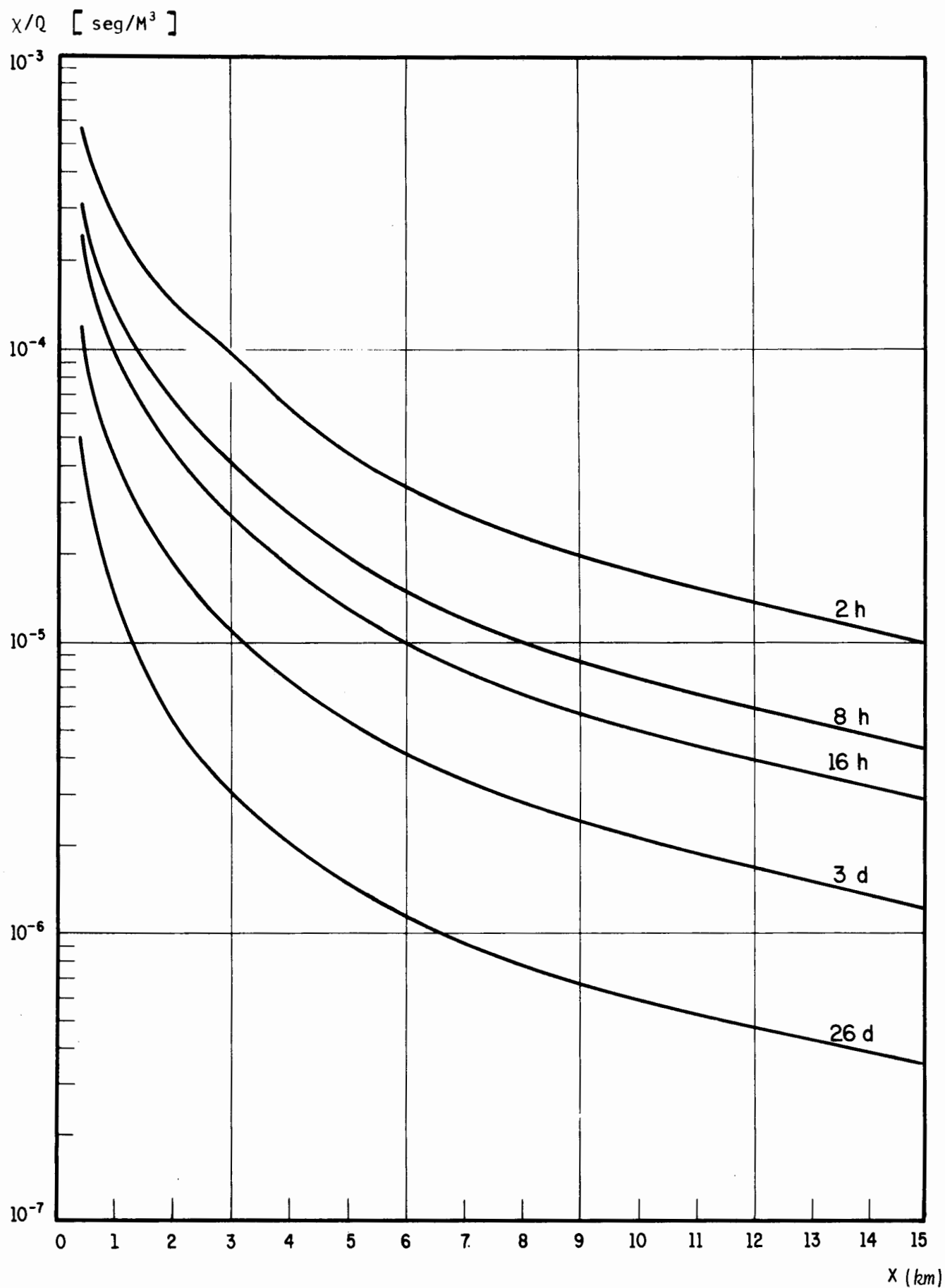


FIG 3.4 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 5% DEL TIEMPO CONSIDERANDO
TODAS LAS DIRECCIONES EN CONJUNTO

χ/Q [seg/M³]

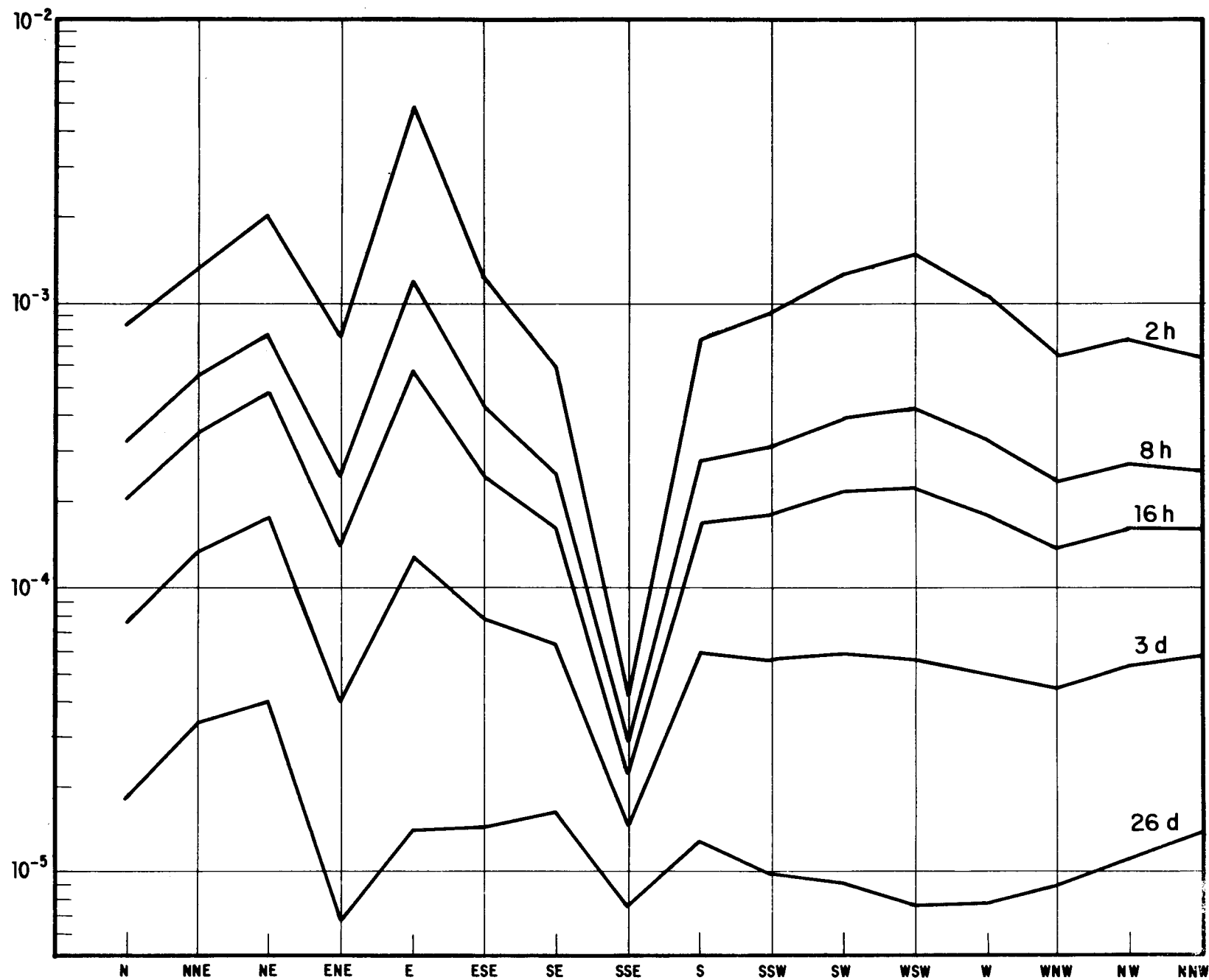


FIG 3.5 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO EN EL LIMITE DE LA ZONA DE EXCLUSION (680 m)

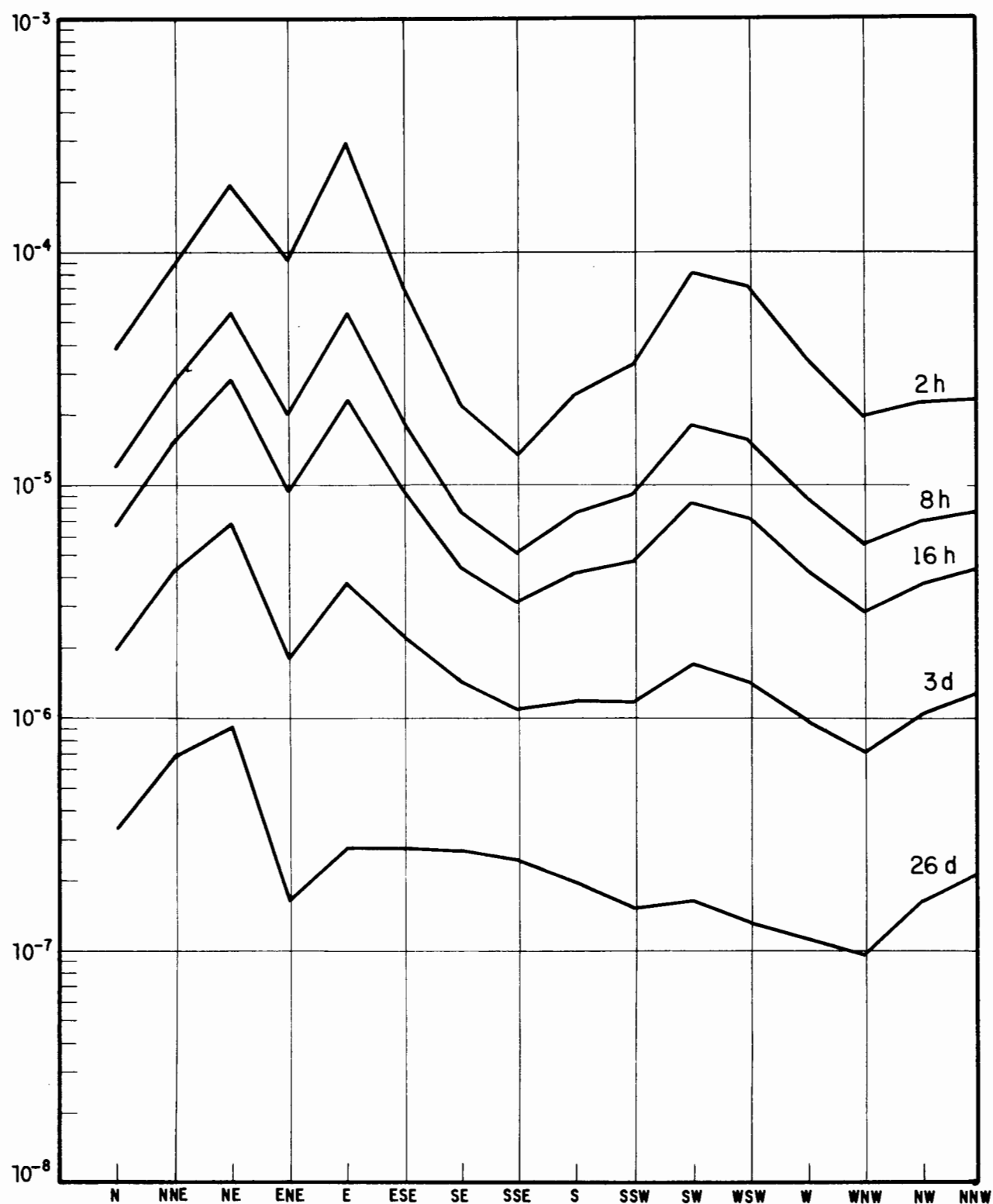
χ/Q [seg/M³]

FIG 3.6 VALORES DE χ/Q QUE SE EXCEDEN 0.5% DEL TIEMPO EN EL LIMITE DE LA ZONA DE BAJA POBLACION (15,000 m)

CAPITULO 4

ENSAYOS PRELIMINARES DE DISPERSION EN LA ATMOSFERA DE LA REGION

En virtud de que el área de Laguna Verde, Ver. tiene características muy peculiares, tanto en lo referente a la topografía del lugar como a los regímenes meteorológicos que prevalecen, y tomando en consideración la posibilidad de que dichas características originen condiciones de dispersión en la atmósfera de la región diferentes de las que han servido de base para desarrollar las herramientas de simulación aplicadas en el presente trabajo, es conveniente efectuar, en la zona de estudio, una serie de experimentos consistentes en liberar a la atmósfera un gas trazador desde un sitio cercano a la PNLV y tomar muestras de dicho gas en un conjunto de puntos situados viento abajo del sitio de emisión.

La experiencia internacional que se tiene en este tipo de experimentos ha demostrado que es factible determinar, cuantitativamente, el grado de dilución y las trayectorias de contaminantes atmosféricos liberados sobre terrenos costeros accidentados como los que caracterizan a la región de Laguna Verde. Los resultados de varios de estos experimentos sugieren que, los modelos de dispersión del tipo "gausiano", como los aplicados en este estudio, pueden utilizarse con un buen grado de aproximación en sitios con las características arriba señaladas, siempre y cuando se usen valores apropiados de los parámetros de dispersión

σ_y y σ_z^{11} ¹². La aplicabilidad de los gases trazadores como el hexafluoruro de azufre (SF_6) para determinar las propiedades de dispersión atmosférica que prevalecen en sitios costeros con terrenos accidentados fué demostrada por Drivas y Shair en la zona urbana cercana a la ciudad de los Angeles, Cal.¹³. Estos investigadores lograron detectar, mediante la técnica conocida como "captura de electrones y cromatografía de gases", concentraciones de SF_6 de hasta 1ppb (10^{-12} partes de SF_6 por una parte de aire) a distancias de 124 km del sitio de emisión, después de haberse liberado 33.5 Kg. de dicho compuesto en un período de 45 minutos. Debido a las propiedades de SF_6 en lo referente a que es prácticamente inocuo hasta fracciones volumétricas de 80% si se inhala aproximadamente durante 24 horas, químicamente inerte y fotoquímicamente estable, así como relativamente barato y de fácil detección, ha sido considerado como el trazador ideal para efectuar este tipo de experimentos.

4.1 Características topográficas y meteorológicas

Laguna Verde se encuentra en una zona costera ubicada a aproximadamente 70 km. al NNW del puerto de Veracruz y a 60 km. hacia el ENE de la ciudad de Jalapa sobre los 19°30' de latitud Norte. Hacia el Oeste del sitio se extiende una derivación de la Sierra Madre Oriental formada por cañadas sinuosas y cerros de 200 a 600 metros de altura que prácticamente rodean el sitio desde el SSW hasta el NW.

Por otra parte, la circulación regional de los vientos en la zona, está asociada tanto a las invasiones del aire polar durante los meses de noviembre a

abril, los cuales originan vientos fuertes del NNW y N que se mantienen durante uno o más días, como a la corriente de los aliseos húmedos que persisten en la época de lluvias de mayo a octubre. En ausencia de estas perturbaciones la meteorología de la zona se encuentra dominada por dos regímenes de vientos característicos de los sitios costeros; la "brisa" y el "terral". El primero, es un viento que sopla desde el mar durante las horas de máxima insolación solar; es decir, desde el mediodía hasta el anochecer, mientras que el segundo, es un viento que proviene de tierra y que se establece durante la noche. Estos vientos son ocasionados por las diferencias de temperatura que se originan, tanto en el día como en la noche, entre las capas de aire en contacto con las superficies del mar y el suelo. En el sitio, la "brisa" tiene una dirección ESE y SE e intensidades de viento de 2 a 3 m/seg. al principio del período (aproximadamente a las 10:00 A.M.), rotando después, hacia el SSE e incrementando su intensidad a 4 ó 5 m/seg. pasado el mediodía y hasta aproximadamente las 18 horas. A partir de esta hora y como consecuencia del enfriamiento más rápido de las capas de aire en contacto con la superficie del suelo en comparación con las que se encuentran sobre la superficie del mar, se genera un gradiente térmico positivo en la dirección tierra-mar, que da origen al viento llamado "terral", el cual en el sitio queda establecido a partir de las 8 ó 9 de la noche con una dirección SSW e intensidades de 1 a 3 m/seg.

4.2 Procedimiento experimental

Los días 7 y 9 de mayo de 1980 y 23 de enero de 1981 se efectuaron tres pruebas de dispersión en las cercanías de la PNLV de la CFE durante las cuales se liberaron a la atmósfera entre 2 y 5 gr/seg. de gas SF_6 en periodos de alrededor

de 4 h desde una chimenea de aproximadamente 2.5 m de altura ubicada sobre un pequeño montículo localizado a 100 m al Oeste de la estación meteorológica que opera la CFE. La cantidad de SF_6 liberado a la atmósfera se determinó, previo a la realización del experimento, tomando en consideración por un lado, el umbral de detección de dicho compuesto (aproximadamente 1 ppb), y por el otro, la conveniencia de que el contenido de SF_6 en un solo cilindro fuera suficiente para que no se hiciera necesario cambiar de cilindro durante el período de liberación del gas. Por otra parte, a fin de controlar el flujo de SF_6 se colocó el cilindro sobre una báscula mediante la cual fué posible verificar periódicamente, por diferencias de peso, que dicho flujo permaneció constante mientras se efectuó la emisión.

Durante las pruebas se tomaron muestras de aire en los sitios mostrados en la figura 4.1 utilizando jeringas de plástico de 20 y 30 cm³ de capacidad. Estas muestras fueron tomadas en 10 segundos cada 10 minutos y enviadas para su análisis químico al Instituto Tecnológico de California. En varios de los sitios de muestreo las muestras se tomaron por duplicado en forma simultánea a fin de poder detectar cualquier anomalía tanto en el manejo de las muestras, como en el proceso de detección del SF_6 . Asimismo, con objeto de conocer el efecto que tendrían diferentes períodos de muestreo en la magnitud de las concentraciones detectadas, se tomaron varias muestras de 1 hora de duración, utilizando bolsas de plástico y bombas de flujo intermitentes operadas mediante baterías. Los puntos de muestreo se alinearon en la dirección paralela a la costa; hacia el norte del sitio, sobre la carretera a Nautla hasta un punto denominado Barra de Palma cercano a esta población, y hacia el S. Se situaron sobre la carretera al Puerto de

Veracruz hasta una distancia aproximadamente 40 km. Es importante mencionar, que con objeto de determinar tanto la ubicación del eje central de la "pluma", como los valores de los parámetros de dispersión σ_y y σ_z característicos de las condiciones de dispersión que prevalecieron durante la realización de los experimentos, era necesario ubicar puntos de muestreo en la dirección perpendicular a la del viento; sin embargo, debido a la dificultad de acceso a sitios alejados de la carretera, se decidió que sería necesario efectuar dichos muestreos empleando una avioneta que volara a baja altura. No obstante que no fué posible disponer de dicha avioneta y debido a la poca experiencia que se tiene con este tipo de pruebas, se tomó la resolución de llevar a cabo el experimento y considerarlo como un ensayo preeliminar.

4.3 Metodología para el cálculo de los parámetros de dispersión

Si se asume que la distribución de las concentraciones sobre un eje horizontal perpendicular a la dirección del viento sigue una curva de Gauss, entonces, las concentraciones $\chi(y)$ de muestras tomadas a distancias y , sobre dicho eje, satisfacen la ecuación:

$$\chi(y) = \chi_0 \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{y - y_0}{\sigma_y}\right)^2\right\} \quad (4.1)$$

en donde χ_0 es la concentración en el centro de la "pluma", y_0 de la distancia a dicho centro y σ_y la desviación estandar de la distribución de las concentraciones sobre el eje y .

Ahora bien, tomando logaritmos de ambos miembros de la ecuación (4.1) y desarrollando el binomio que aparece dentro de la exponencial, esta ecuación se puede expresar en la forma siguiente:

$$Z = \alpha_0 + \alpha_1 y + \alpha_2 y^2 \quad (4.2)$$

en donde $Z = \ln \chi$, y los términos restantes están definidos como sigue:

$$\alpha_0 = \ln \chi_0 - \left(\frac{y_0}{\sqrt{2}\sigma_y} \right)^2 \quad (4.3)$$

$$\alpha_1 = \frac{y_0}{\sigma_y^2} \quad (4.4)$$

$$\alpha_2 = - \frac{1}{2 \sigma_y^2} \quad (4.5)$$

Como puede notarse, la expresión (4.2) es la ecuación de una parábola cuyos coeficientes α_0 , α_1 y α_2 pueden estimarse ajustando a esta ecuación los datos $(\ln \chi, y)$, por el método de los mínimos cuadrados. Una vez estimados dichos coeficientes, las ecuaciones (4.5), (4.4) y (4.3) permiten determinar los valores, primeramente de σ_y , y posteriormente de y_0 y χ_0 , respectivamente. Conviene hacer notar que es este método para estimar la desviación estándar horizontal resulta mucho más sencillo y práctico de aplicar que el método utilizado por Lamb y Shair¹⁴.

Aplicando un procedimiento similar al anteriormente expuesto, es posible determinar el valor de la desviación estándar vertical σ_z ; sin embargo, esto

requeriría de un muestreo en el plano vertical el cual resultaría difícil de efectuar adecuadamente. Una forma indirecta de estimar este parámetro de dispersión, a partir de las mismas parejas de datos que se emplean para determinar la desviación estándar horizontal σ_y , consiste en suponer que la ecuación del modelo gaussiano (ecuación (2.10)) describe adecuadamente los resultados del muestreo en el plano horizontal, y que la pérdida del gas trazador, tanto en la superficie del suelo, como en la base de una inversión elevada que pudiera estar presente es despreciable, de manera que, el área bajo la curva S, de los datos experimentales (χ, y) , debe ser aproximadamente igual a la siguiente integral:

$$\int_{y=-\infty}^{y=\infty} \chi(x, y, 0) dy = \int_{y=-\infty}^{y=\infty} \frac{Q A(x)}{2\sigma_y \sigma_z u} \exp\{-y^2/2\sigma_y^2\} dy$$

de donde se obtiene el siguiente resultado:

$$S = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} u \sigma_z} \sum_{N=-5}^{N=5} \left[\exp\left\{-\frac{(2NL+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(2NL-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \quad (4.6)$$

El área S bajo la curva χ vs. y , puede obtenerse mediante un método de integración numérica, como por ejemplo, el método de Simpson; mientras que para obtener el valor correspondiente de σ_z que satisface la expresión (4.6) se puede utilizar un método numérico iterativo tal como el método de Newton.

Es evidente que los valores de las desviaciones estándar σ_y y σ_z obtenidos mediante los procedimientos arriba expuestos corresponden a una distancia específica viento abajo de la fuente emisora. Para generar un conjunto de valores

de σ_y y σ_z es necesario realizar muestreos transversales a la dirección del viento a diversas distancias viento abajo a partir del sitio de emisión, y aplicar los procedimientos aquí expuestos para cada conjunto de parejas (x, y) , correspondientes a las distancias viento abajo seleccionadas. Una vez generado dicho conjunto de valores de las desviaciones estándar, se puede buscar una relación funcional entre éstas y la distancia x, como por ejemplo, una de la forma de las expresiones (2.2), efectuando un ajuste de los datos a estas ecuaciones por el método de los mínimos cuadrados.

4.4 Resultados

El día 7 de mayo predominaron vientos del SE con intensidades entre 8 y 4 m/seg. durante aproximadamente una hora y media a partir del inicio del experimento. Posteriormente dominaron vientos del Sur con intensidades entre 2 y 3 m/seg. El régimen de vientos que se estableció ese día, fué originado por la presencia de una zona de alta presión que se ubicó al NE del Golfo de México sobre la Florida. Por otra parte, la altura máxima de la capa de mezcla, la cuál se estimó con base a los datos del radiosondeo efectuado en el Puerto de Veracruz y la temperatura superficial máxima registrada en Laguna Verde (28.1°C) fué de 550 m. La estabilidad atmosférica que predominó fué la clase "C". Respecto a las condiciones meteorológicas que prevalecieron el día 9 de mayo, en virtud de la llegada de un frente polar al sitio, el viento se mantuvo casi franco del NNW entre 10 y 12 m/seg. con muy poca variación tanto en su dirección como en su intensidad. Asimismo la estabilidad atmosférica se mantuvo prácticamente dentro de la categoría "C" y la altura máxima de la capa de mezcla fué de 182 m.

El método empleado para asignar las clases de estabilidad atmosférica que prevalecieron durante ambos ensayos fué el de radiación global medida; sin embargo, debe mencionarse, que de acuerdo a las mediciones del gradiente térmico vertical realizados en el sitio, prevalecieron categorías de estabilidad más estables que las registradas mediante dicho método, especialmente cuando el viento se mantuvo de direcciones mar adentro. Debido a que las categorías de estabilidad atmosférica registrados en base a las desviaciones estándar de la dirección del viento también tienden a desmentir los resultados obtenidos de las mediciones del gradiente térmico vertical, y tomando en cuenta la excesiva proximidad de la torre meteorológica a la costa, se hizo aparente que las determinaciones de categorías de estabilidad atmosférica basadas en mediciones del gradiente térmico posiblemente estaban influenciadas por la capa límite superficial costera que se establece al soplar el viento desde el mar, razón por lo cual dicha información no se tomó en cuenta.

Respecto a los resultados de los análisis químicos de las muestras tomadas en estos ensayos, no se pudo observar ningún comportamiento normal de las concentraciones detectadas, como por ejemplo, el que las concentraciones decrecieron al incrementarse la distancia entre la fuente y los puntos de muestreo, sino que se observó un comportamiento irregular. Debido a lo anterior y a la falta de repetibilidad de los resultados entre las muestras de aire tomados por duplicado, se hizo patente que las muestras estaban contaminadas por el propio SF_6 , lo cual pudo haber surgido durante la manipulación de las muestras, las cuales por contener concentraciones muy diluidas del gas trazador pudieron ser fácilmente afectadas por cantidades relativamente pequeñas de dicho gas que hayan quedado impregnadas en los sitios de almacenamiento de las muestras o en las ropas de las

personas involucradas en su manejo.



A pesar de que estos resultados no fueron satisfactorios, sirvieron de base para llevar a cabo un tercer ensayo, en el cual se tomaron todas las precauciones para evitar que surgieran nuevamente los problemas de contaminación mencionados. Durante este último ensayo, llevado a cabo el 23 de enero de 1981, se presentó otra vez una situación de Norte con velocidades entre 8 y 10 m/seg y prevalecieron las categorías de estabilidad atmosférica entre la A y la C. En esta ocasión se liberaron a la atmósfera 5 g/seg de gas SF_6 durante 2 horas. No obstante que los resultados del análisis mostraron una buena concordancia entre las muestras tomadas por duplicado (el valor promedio de las diferencias de las concentraciones expresadas éstas en ppb, fué de solo 5 ppb con una desviación estandar de 2.2 ppb), lo cual revela que se lograron superar los problemas que se presentaron en las primeras pruebas, únicamente se detectaron niveles significativos del gas SF_6 en algunas de las muestras tomadas en el Farallon y Chachalacas, distantes del sitio de emisión 9 y 35 km, respectivamente. Esto sugiere que solo se estuvo muestreando el borde poniente de la pluma, permaneciendo ésta la mayor parte del tiempo sobre el mar. Sin embargo es interesante mencionar que las concentraciones detectadas en la playa de Farallon son semejantes a las que se estiman con los métodos de simulación expuestos en este trabajo.

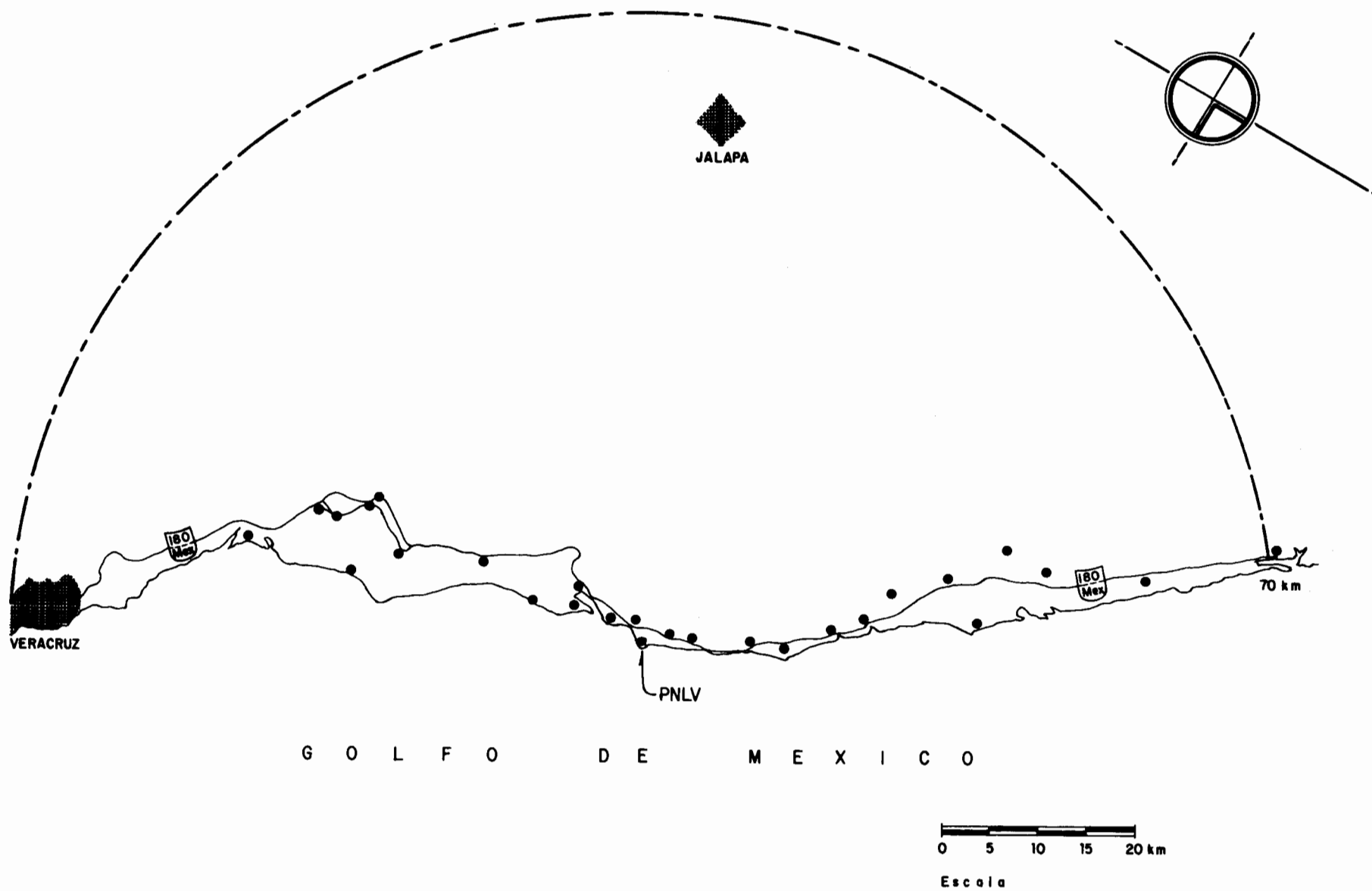


Fig 4.1 Localización de los puntos de muestreo

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- En este estudio se exponen y aplican dos métodos de simulación que permiten evaluar los factores de dilución y el comportamiento de efluentes radiactivos que se descarguen a la atmósfera, tanto en caso de accidente (capítulo 2.1), como en forma continua (capítulo 2.2). Las ventajas de estos métodos consisten en que son sencillos, de fácil adaptación y que requieren de relativamente poca información meteorológica para aplicarlos; sin embargo, debido a que la región de Laguna Verde, Ver. presenta diversas características muy peculiares que impiden hacer aseveraciones definitivas respecto al grado de precisión de dichos métodos de simulación, los resultados obtenidos constituyen una primera aproximación para evaluar los efectos ambientales que podrían generarse en la zona de estudio.
- 2.- Las consideraciones efectuadas para aplicar los modelos de dispersión en la región de Laguna Verde, como son las que se refieren a la forma de liberar los efluentes radiactivos y estimar sus alturas de ascenso, las concernientes a limitar el transporte de los materiales en la dirección vertical, y las relacionadas con la selección de los valores de los parámetros involucrados en los modelos, conducen a sobreestimar los niveles

de las concentraciones del material radiactivo, tanto del que continuamente estará descargándose a la atmósfera, como del que accidentalmente pudiera vertirse.

3.- Además de los métodos de simulación expuestos en este estudio existen otros que al mismo tiempo de ser más complejos aparentemente tienen capacidad para representar en forma más realista algunos de los procesos involucrados en el transporte y la dispersión en la atmósfera de los materiales radiactivos; sin embargo, la dificultad de generar la información que requieren estos modelos y la inexistencia de un sistema práctico que permita desarrollar valores apropiados para los parámetros que intervienen en ellos, impide aplicarlos en la vecindad de Laguna Verde; por lo cual se concluye que, los modelos aquí expuestos son en la actualidad los más convenientes de aplicar.

4.- En virtud de que los parámetros de dispersión utilizados son característicos de terrenos planos con elementos de rugosidad pequeños y tomando en consideración que la alta rugosidad que caracteriza la región montañosa colindante con el sitio de estudio contribuye a incrementar la turbulencia de origen mecánico, y con ello, la dispersión de materiales en la atmósfera, se concluye que, la aplicación de dichos parámetros tiende a sobreestimar las concentraciones de material radiactivo sobre la región montañosa adyacente a la costa.

5.- Los resultados a la simulación que se hizo con objeto de estimar las concentraciones de materiales radiactivos que accidentalmente pudieran vertirse a la atmósfera constituyen una base, tanto para evaluar la eficacia

de rutas de evacuación y planes de emergencia, como para rectificar los límites que definen las zonas de exclusión y de baja población.

6.- Con respecto a los resultados de la simulación realizada a fin de estimar las concentraciones promedio anual originadas por la emisión rutinaria de materiales radiactivos a la atmósfera, se concluye que existe una tendencia de las concentraciones a decrecer más rápidamente hacia las direcciones tierra adentro que hacia el mar.

7.- Se llevaron a cabo tres ensayos preliminares de dispersión en la atmósfera de la zona, los cuales fueron los primeros formalmente realizados en el país. Las dificultades que surgieron durante las dos primeras pruebas se superaron en un tercer ensayo, con el cual se lograron detectar concentraciones del gas trazador similares en orden de magnitud a las que se obtienen con los métodos de simulación presentados, aunque debido a que solo fué posible muestrear uno de los bordes de la pluma, la cantidad de información obtenida no fué suficiente para probar la bondad de los métodos de simulación. No obstante lo anterior, la experiencia adquirida en estas pruebas permitió capacitar al personal que se requiere y desarrollar métodos para efectuarlas adecuadamente.

8.- Es necesario realizar experimentos adicionales que permitan llegar a conclusiones definitivas respecto al grado de precisión de los métodos de simulación empleados. En estos experimentos se deberá poner especial cuidado en el manejo de las muestras con objeto de evitar el que éstas se contaminen. Para tal fin, las muestras y los dispositivos

de muestreo deberán almacenarse en lugares alejados de los cilindros que contengan al gas trazador, y deberá evitarse el contacto entre las personas involucradas en la toma y manejo de las muestras y los sitios de almacenamiento del gas trazador, así como con las personas encargadas de su manejo.

- 9.- Es necesario que en los próximos experimentos se efectuen muestreos transversales a la dirección del viento con objeto de determinar, tan to la ubicación del eje central de la pluma, como los valores de los parámetros de dispersión σ_y y σ_z característicos del sitio. Para és to, se recomienda efectuar vuelos a baja altura, y hacer recorridos en lancha sobre el mar.
- 10.- Sería conveniente contar con equipo de campo apropiado para seguir el rastro del gas trazador en forma instantánea; por ejemplo, sería ade cuado utilizar cromatógrafos de gases portátiles.
- 11.- Debido a discrepancias observadas entre las categorías de estabilidad atmosférica obtenidas mediante métodos de estimación diferentes duran te las pruebas de dispersión realizadas, y en virtud de que dichas di ferencias podrían explicarse debido a la excesiva proximidad de la to rre meteorológica a la costa, se recomienda evaluar las mediciones me teorológicas llevadas a cabo hasta la fecha, con objeto de determinar si el efecto mencionado es de consideración, y en caso afirmativo, precisar cuales determinaciones de categorías de estabilidad sería ne cesario ajustar, a fin de que fueran representativas de condiciones at mosféricas prevalecientes en sitios ubicados tierra adentro.

R E F E R E N C I A S

1. Slade, D.H., Meteorology and Atomic Energy, TID-24190 (1968).
2. Vogt, Kurt-Jurgen, Empirical Investigations of the Diffusion of Waste Air Plumes in the Atmosphere, Nuclear Technology, pp. 43-57, (junio 1977)
3. Turner, D.B., Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, U.S. Environmental Protection Agency, AP-26, (1967).
4. U.S., Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.XXX, Atmospheric Dispersion Models for Potencial Accident Consequence Assessments at Nuclear Power Plants, Washington, D.C., (sept. 1978).
5. Sagendorf, J.F., A Program for Evaluating Atmospheric Dispersion from a Nuclear Power Station, NOAA Technical Memorandum, ERL ARL-42 (1974).
6. Busse, A.D., Zimmerman, J.R., User's Guide for the Climatological Dispersion Model, U.S. E.P.A., EPA-R4-73-024, (1973).
7. Turner, D.B., Petersen, W.B., A Gaussian-Plume Algorithm for Point, Area and Line Sources, 6Th NATO/CCMS, International Technical Meeting on Air Pollution Modeling, Alemania, FR, (Sept. 1975).
8. Larsen, R.I., A Mathematical Model for Relating Air Quality Measurements to Air Quality Standards, U.S., E.P.A., AP-89 (1971).
9. Johnson, N.L., Leone, F.C., Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, Vol. I, John Wiley and Sons, Inc., New York (1964)
10. U.S., Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.111, Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors, Washington, D. C., (julio 1977).
11. Lamb B.K., Lorenzen A., A., Shair F.H., Atmospheric Dispersion and Transport Within Coastal regions: Part I, Tracer Study of Power Plant Emissions from the Oxnard Plain, Atmospheric Environment, Vol. 12, 2089-2100 (1978).
12. Lamb B.K., Shair F.H., Atmospheric Dispersion and Transport Within Coastal Regions: Part II, Tracer Study of Industrial Emissions in the California Delta Region, Atmospheric Environment, Vol. 12, 2101-2118 (1978).

13. Drivas P.J., Shair F.H., A Tracer Study of Pollutant Transport and Dispersion in the Los Angeles Area, Atmospheric Environment, Vol. 8, 1155-1163 (1974).
14. Lamb B.K., Shair F.H., Atmospheric Tracer Studies to Characterize the Transport and Dispersion of Pollutants in the California Delta Region. California Air Resources Board, Contract No. ARB-A5-065-87 (1977).

ANEXO 1

Concentraciones normalizadas medias anuales (seg/m^3) sin considerar decaimiento radiactivo y sorpción en la superficie del suelo (MATERIAL LIBERADO A NIVEL DEL PISO)

Distancia (m)				
	375	750	1,125	1,500
SSW	.541453344	.173057291	.594613307	.621409109
SSW	.343724033	.107797501	.426366902	.371402007
SSW	.259533160	.809491688	.316734426	.275214785
SSW	.192457030	.596970430	.316734426	.206750582
SSW	.222928805	.695060385	.570164309	.239247234
SSW	.355187885	.108473356	.748337915	.366639540
SSW	.444486223	.139476687	.110330430	.487359445
SSW	.633010955	.201154664	.153337978	.728561543
SSW	.899245758	.359335500	.283320535	.100155431
SSW	.117789334	.552522245	.344510047	.185553411
SSW	.200503350	.644444444	.434588013	.225980063
SSW	.268088417	.814939024	.862553340	.384602075
SSW	.510152276	.160334741	.150556399	.567582334
SSW	.895765563	.374418216	.170939156	.995488338
SSW	.956847728	.308276842		.113127029

Distancia (m)				
	2,250	3,000	3,750	4,500
SSW	.338357906	.218115333	.154283572	.115926110
SSW	.199836671	.128316629	.906333651	.680951323
SSW	.147717147	.951050607	.673242609	.506866104
SSW	.112208124	.722869467	.511610261	.385000511
SSW	.125830517	.821235566	.571821303	.433320866
SSW	.193252259	.124777642	.877184748	.633202866
SSW	.399977548	.259942958	.118845687	.891407294
SSW	.566194233	.369584519	.285320304	.138928724
SSW	.110030922	.677633322	.489358837	.320137668
SSW	.112466333	.881163344	.492172237	.375917207
SSW	.115584693	.103690016	.609549036	.468214936
SSW	.311199175	.203944058	.728004272	.555179973
SSW	.544685041	.354767366	.145811763	.189957622
SSW	.620504125	.401238308	.252204558	.189957622
SSW			.284226560	.213746438

ANEXO 2

Deposición relativa $\overline{D/Q}$ (m^{-2}) y concentraciones normalizadas medias anuales $\overline{X/Q}$ (seg/ m^3) considerando decaimiento radiactivo y sorpción en la superficie del suelo (MATERIAL LIBERADO EN FORMA MIXTA)

X = 375 m

DIR.	$\overline{X/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.997497130	.18644
SSW	.344233333	.06442
SSW	.144233333	.02148
SSW	.105599999	.01576
WNW	.149066666	.02576
WNW	.420666666	.07699
WNW	.122066666	.01611
WNW	.152266666	.01551
WNE	.183444444	.03872
WNE	.855108888	.05016
E	.466108888	.04423
E	.420666666	.02259
ESE	.193333333	.04207
ESE	.224444444	.06921

X = 1,125 m

DIR.	$\overline{X/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.196752366	.39787
SSW	.787333333	.17500
SSW	.421111111	.06000
SSW	.311207333	.10007
WNW	.461622599	.03347
WNW	.214115533	.03333
WNW	.181333333	.03333
WNW	.233333333	.03333
WNW	.333333333	.03333
WNE	.333333333	.03333
WNE	.333333333	.03333
WNE	.333333333	.03333
E	.827764322	.09687
E	.793747169	.15475
ESE	.365924788	.07333
ESE	.602272822	.13024

X = 750 m

DIR.	$\overline{X/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.339855849	.69566
SSW	.130661759	.28733
SSW	.044175933	.12955
SSW	.095527633	.09552
WNW	.255770862	.14551
WNW	.023333333	.03333
WNW	.023333333	.03333
WNW	.023333333	.03333
WNE	.023333333	.03333
WNE	.581708843	.33561
WNE	.547733333	.21334
E	.287871733	.24196
E	.148055691	.16333
ESE	.633333333	.14484
ESE	.106803333	.24015

X = 1,500 m

DIR.	$\overline{X/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.136255980	.21401
SSW	.560773959	.64725
SSW	.315327757	.16722
SSW	.223347383	.10336
WNW	.587619433	.07458
WNW	.178574128	.02464
WNW	.184233333	.02899
WNW	.164335295	.01933
WNW	.193314229	.01330
WNE	.216331549	.03302
WNE	.189223366	.01776
WNE	.125593171	.05893
E	.587251118	.76855
E	.544145791	.99575
ESE	.249740369	.50203
ESE	.415841222	.81370

A N E X O 2 (continuación)

X = 2,250 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.833369E144	.4327672288
SSW	.3351336677233	.33935332105
SSSW	.2001606688233	.11533320055
SW	.2884713389333	.25511110000
WSW	.6702987422	.70048810000
WWSW	.10426637199	.15339182222
WNW	.10295295555	.11714331112
NNW	.1197373244	.11601446666
NNNW	.1322000678	.81517433333
NNE	.10356091111	.45666629144
NNNE	.41215634040	.33753340114
NE	.33229576555	.55654622333
ENE	.1488288282	.27821822222
ESE	.2449884392	.44338222222
SE		
SSE		

X = 3,000 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.5971033117	.3511360000
SSW	.2552054634	.2760468777
SSSW	.1484199334	.1700668777
SW	.3594547336	.4466361555
WSW	.4000480322	.9833618222
WWSW	.6269522800	.1233766222
WNW	.8578517355	.8833618222
WNWN	.7492880099	.8071671233
NNW	.8770085644	.5823378444
NNNW	.9906119888	.4330055222
NNE	.7857550499	.2700555222
NNNE	.6829089766	.4330055222
NE	.3868483922	.2700555222
ENE	.2473357832	.1833004444
ESE	.1042277488	.293367
SE		
SSE		

X = 3,750 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.5275768444	.5922107400
SSW	.3139226322	.3502291616
SSSW	.1668000555	.1544003333
SW	.2668000555	.2270663333
WSW	.1906639788	.5500036666
WWSW	.2965165133	.6335343333
WNW	.4159280311	.4666222411
WNWN	.5369946322	.4555886666
NNW	.22923611	.3336229966
NNNW	.5297774933	.1840039966
NNE	.5531205000	.2658338222
NNNE	.3944956355	.1577229666
NE	.1725111266	.1990661133
ENE	.6331213256	.9822099555
ESE	.9808977866	.1570
SE		
SSE		

X = 4,500 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.5545434177	.7931473314
SSW	.2661386411	.3334393333
SSSW	.1667757144	.1360668777
SW	.2382716888	.2015662777
WSW	.2661792900	.3080996000
WWSW	.4134849733	.6788933166
WNW	.5760559422	.8590015144
WNWN	.5842265322	.6090015144
NNW	.6920925888	.5966447399
NNNW	.8064005099	.4368854388
NNE	.6027762723	.3438854388
NNNE	.6049333166	.3338854388
NE	.3921160644	.2043388888
ENE	.2019042366	.2644662222
ESE	.7918590077	.1308554422
SE	.1254233000	.2094254222
SSE		

X = 5,250 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.4827257455	.4547154545
SSW	.2336685431	.2822879879
SSSW	.1702947488	.1501044149
SW	.1276512336	.1751433111
WSW	.1449731477	.3859551777
WWSW	.2257057788	.4889280888
WNW	.3118261499	.3747086666
WNWN	.4082267474	.3627648666
NNW	.4825094666	.2699162222
NNNW	.5988685955	.2166225555
NNE	.4655510167	.1266555555
NNNE	.5009708888	.1266555555
NE	.3845283055	.7700996666
ENE	.1507822900	.1230
ESE	.5208864499	
SE	.7968824233	
SSE		

X = 6,000 m

	$\overline{x/Q}$	$\overline{D/Q}$
S	.3783738299	.4308975800
SSW	.1870894422	.2257251433
SSSW	.1406774515	.1258010555
SW	.1058520188	.1397002500
WSW	.1804740002	.3078554400
WWSW	.2549330326	.3904648000
WNW	.3813714949	.3371000000
WNWN	.4172642797	.2899774888
NNW	.5300136322	.2152243222
NNNW	.4118648177	.1173114555
NNE	.4666736333	.1010122147
NNNE	.3633613351	.1249192433
NE	.1333160433	.6156669388
ENE	.4411643799	.9827118822
ESE	.6673343611	
SE		
SSE		

A N E X O 2 (continuación)

X = 6,750 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.280512075	L	.077	.384690766	E	.099
SW	.153369530	L	.077	.184717286	E	.099
SW	.111327121	L	.088	.110147000	E	.099
SW	.083395512	L	.088	.078434340	E	.099
WN	.148220883	L	.077	.251956355	E	.099
WN	.209673814	L	.077	.331951267	E	.099
WN	.362938147	L	.077	.331951267	E	.099
WN	.366200149	L	.077	.223787344	E	.099
NE	.475503600	L	.077	.176674485	E	.099
NE	.375766619	L	.077	.060733333	E	.099
NE	.433014000	L	.088	.143022222	E	.111
NE	.342753377	L	.088	.833072222	E	.111
SE	.111900068	L	.077	.102023798	E	.099
SE	.386330476	L	.077	.504551111	E	.099
SE	.366416500	L	.077	.805222222	E	.099

X = 7,500 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.230738400	L	.077	.324459861	E	.099
SW	.128831738	L	.077	.154323491	E	.099
SW	.094246000	L	.088	.060971841	E	.099
SW	.700000000	L	.088	.655511111	E	.099
WN	.124284033	L	.077	.210473333	E	.099
WN	.173646195	L	.077	.267771655	E	.099
WN	.335909976	L	.077	.255551688	E	.099
WN	.322519551	L	.077	.199168888	E	.099
NE	.429700109	L	.077	.147996666	E	.099
NE	.342630492	L	.077	.804443333	E	.110
NE	.398448470	L	.088	.119288122	E	.110
SE	.322650907	L	.077	.696006666	E	.099
SE	.107357253	L	.077	.856640000	E	.110
SE	.332467659	L	.077	.421973333	E	.099
SE	.493692939	L	.077	.673411655	E	.099

X = 8,250 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.196926280	L	.077	.275773542	E	.099
SW	.109758072	L	.077	.131066464	E	.099
SW	.003075936	L	.088	.731966745	E	.111
SW	.600000000	L	.088	.556255833	E	.111
WN	.678202594	L	.077	.811117777	E	.099
WN	.105937639	L	.077	.178752222	E	.099
WN	.146910530	L	.077	.227376666	E	.099
WN	.309494322	L	.077	.228067777	E	.099
WN	.291599900	L	.077	.169553333	E	.099
NE	.391727270	L	.077	.126021111	E	.099
NE	.314738646	L	.078	.784883333	E	.111
NE	.370711990	L	.088	.101170000	E	.111
SE	.303688340	L	.088	.592292222	E	.111
SE	.975933631	L	.077	.728836666	E	.099
SE	.293999111	L	.077	.333333333	E	.099
SE	.433223237	L	.077	.572261000	E	.099

X = 10,000 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.138229990	L	.077	.192938234	E	.099
SW	.792222488	L	.088	.940912433	E	.110
SW	.581292338	L	.088	.530557811	E	.110
SW	.433333333	L	.088	.399933333	E	.110
WN	.489962132	L	.088	.558233333	E	.110
WN	.766620770	L	.088	.128233333	E	.099
WN	.105380773	L	.088	.183333333	E	.099
WN	.221310633	L	.077	.189905555	E	.099
WN	.232931980	L	.077	.122398822	E	.099
NE	.323333750	L	.077	.910667822	E	.110
NE	.264062216	L	.077	.494441000	E	.110
NE	.317840844	L	.088	.736997644	E	.111
SE	.264451410	L	.088	.428863333	E	.110
SE	.799996600	L	.077	.552466666	E	.099
SE	.228499981	L	.077	.258333666	E	.099
SE	.331685386	L	.077	.412222222	E	.099

X = 14,000 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.766173940	L	.088	.110806913	E	.099
SW	.446429510	L	.088	.524009999	E	.110
SW	.328766116	L	.088	.222224444	E	.110
SW	.274672800	L	.088	.322446666	E	.110
WN	.434080092	L	.088	.714780000	E	.110
WN	.594400000	L	.088	.910700000	E	.110
WN	.933355799	L	.088	.120309999	E	.099
WN	.155231225	L	.077	.747355555	E	.110
NE	.227648577	L	.077	.548383888	E	.110
NE	.191718233	L	.077	.388845555	E	.110
NE	.237073705	L	.088	.512201111	E	.111
SE	.199064095	L	.088	.263391111	E	.110
SE	.554327212	L	.088	.229833333	E	.110
SE	.145417775	L	.077	.146887777	E	.099
SE	.206024118	L	.077	.239916666	E	.099

X = 18,000 m

 $\overline{X/Q}$ $\overline{D/Q}$

S	.493225893	L	.088	.712866222	E	.110
SW	.228925555	L	.088	.338889999	E	.110
SW	.153867000	L	.088	.143331977	E	.110
SW	.117884222	L	.088	.208856000	E	.110
WN	.288332188	L	.088	.459959000	E	.110
WN	.384337166	L	.088	.577510266	E	.110
WN	.598992641	L	.088	.784102666	E	.110
WN	.111335873	L	.077	.489990000	E	.110
NE	.173319977	L	.077	.359985555	E	.110
NE	.148444337	L	.077	.185985555	E	.110
NE	.187013353	L	.088	.341358555	E	.111
SE	.156685296	L	.088	.173354222	E	.111
SE	.411591548	L	.088	.933412222	E	.110
SE	.140297922	L	.077	.155252222	E	.099
SE	.143474600	L	.077	.155252222	E	.099

$$X = 50,000 \text{ m}$$
[illegible]
$$X = 58,000 \text{ m}$$

S	5	1	0	3	0	6	8	3	3	9	8	9	1
S	3	2	9	9	3	5	0	6	5	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2	9	8	1	
S	2	4	8	5	5	3	4	4	7	9	8	1	
S	1	2	9	4	9	3	3	4	2				

$$X = 66,000 \text{ m}$$

S	4016363633	L	-	0	668994549	E	11
SW	2516363633	L	-	0	322222222	E	11
SW	1903666666	L	-	0	183703080	E	11
W	1388999999	L	-	0	199983080	E	11
W	1582255555	L	-	0	199983080	E	11
W	1661233333	L	-	0	456039622	E	11
W	2336666666	L	-	0	741332208	E	11
W	3886882222	L	-	0	741332208	E	11
W	4386882222	L	-	0	493552915	E	11
N	2066988888	L	-	0	821543422	E	11
N	2066988888	L	-	0	821543422	E	11
N	3769268888	L	-	0	821543422	E	11
N	3769268888	L	-	0	821543422	E	11
N	4457138888	L	-	0	821543422	E	11
N	4457138888	L	-	0	821543422	E	11
E	3822311543	L	-	0	821543422	E	11
E	3822311543	L	-	0	821543422	E	11
E	8569999999	L	-	0	821543422	E	11
E	8569999999	L	-	0	821543422	E	11
S	18111543	L	-	0	821543422	E	11
S	18111543	L	-	0	821543422	E	11

[illegible]

Frecuencia
Acumulada

[illegible]

§

[illegible]

SSW

[illegible]

SW

[illegible]

Frecuencia
Acumulada

[illegible]

WSW

0	1	7	C	4	9	5	5	E	-	7
1	3	3	0	4	8	0	1	2	-	7
2	5	4	8	4	9	2	5	6	-	7
3	6	1	2	8	8	1	6	9	-	8
4	7	1	0	5	4	9	8	4	-	8
5	1	1	3	1	0	5	0	4	-	8
6	1	2	2	4	1	8	5	C	-	8
7	2	8	4	0	5	7	0	C	-	8
8	3	6	1	3	7	5	8	C	-	8
9	5	7	6	1	8	6	6	5	-	8
0	1	0	1	3	6	6	6	8	-	8
1	1	9	1	8	2	2	6	8	-	5
2	2	7	5	5	4	6	5	7	-	5
3	4	3	5	2	7	2	8	4	-	5
4	1	0	5	2	1	6	5	7	-	4
5	1	2	5	2	4	4	8	C	-	4
6	1	6	4	8	4	1	6	5	-	4
7	2	3	5	7	5	1	3	2	-	4
8	4	1	6	9	9	6	3	7	-	4
9	4	7	3	5	5	1	6	2	-	4

W

[illegible]

WNW

[illegible]

F/DEPFI/MISC/0015



703329

F
DEPFI
MISC
0015

G(2): 3329