

Estudio de dispersión de contaminantes en montes de árboles.

Estudio de Impacto Ambiental de las plantaciones de Forestal Oriental S.A.

Primer Informe

Autor: José Cataldo

Fecha: 9 de junio de 2007.

RESUMEN

En base a registros meteorológicos obtenidos en una estación meteorológica cercana se dedujo para una zona de quintas de árboles, una velocidad media anual de viento de 3m/s con una dirección más frecuente del ESTESURESTE. La temperatura, principalmente, presenta valores entre 3°C y 30°C. En un 45% de los casos la atmósfera sería termodinámica neutra. La presencia de los árboles promueve la dispersión de contaminantes de forma que los coeficientes de dispersión no cambian significativamente con la altura en el seno de la plantación respecto al valor que presenta sobre la misma.

INDICE

1 – Introducción

2 – Características significativas de los flujos atmosféricos para la dispersión de contaminantes atmosféricos.

3 – Información meteorológica y caracterización de la estación meteorológica de Salto

4 – Caracterización del clima en la ciudad de Salto

5 – Caracterización del clima en el sitio de las plantaciones

6 – Conclusiones

7 – Bibliografía

1 – Introducción

La forma en la cual se dispersan los contaminantes atmosféricos que se emiten en el seno de quintas de árboles depende de las condiciones ambientales así como de las perturbaciones que los propios árboles introducen en el flujo atmosférico.

El transporte de los contaminantes depende de la dirección e intensidad del viento, en tanto que la dispersión depende del nivel de turbulencia. Estas características de la atmósfera son establecidas por forzantes de diferentes escalas. En particular cabe ser mencionados los estados sinópticos, como el asociado al anticiclón del Atlántico, los procesos de meso escala, como son las brisas marinas, y los procesos de micro escala meteorológica, como sería el efecto de edificaciones, árboles y otros obstáculos que se encuentran a nivel del suelo.

La dispersión de contaminantes en la micro escala meteorológica es fuertemente dependiente de la geometría de los obstáculos, por lo cual sería necesaria una descripción acabada de la misma. En el caso de las quintas de árboles esta descripción implica la caracterización de las dimensiones de los árboles, densidad del follaje, y separación entre árboles

La caracterización del clima generado por fenómenos de macro y meso escala meteorológica en un sitio dado sería posible efectuarla a partir de información meteorológica obtenida en estaciones cercanas al mismo. Se propuso entonces utilizar la información obtenida en la estación meteorológica ubicada en la ciudad de Salto.

El estudio de dispersión de contaminantes atmosféricos busca analizar la evolución de los diferentes parámetros que caracterizan la calidad aire. En particular, se pretende evaluar el nivel de concentración que se registraría para diferentes contaminantes, tales como gases y material particulado, emitidos por parte de los diferentes emisores, como ser maquinaria, camiones, animales, etc. Esta evaluación se realiza a través de parámetros que caracterizan dichos niveles de concentración en promedio durante diferentes períodos de tiempo que pueden ser un año, una estación, un mes, una semana o una hora.

Los valores antes definidos son utilizados a los efectos de evaluar la calidad del aire atmosférico. Tal evaluación, se realiza comparando estos valores con valores de referencia definidos para la situación analizada, en este caso un medio natural con baja intervención humana.

En el capítulo 2 se abunda sobre las características atmosféricas que resultan significativas para la dispersión de contaminantes en y por encima de plantaciones. En el capítulo 3 y 4 se presentan los datos atmosféricos que se utilizan para efectuar el análisis de dispersión de contaminantes. En el capítulo 5 se presentan los mismos datos deducidos en sitios donde existen plantaciones.

2 – Características significativas de los flujos atmosféricos para la dispersión de contaminantes atmosféricos.

La evolución que sufren los contaminantes en la atmósfera depende de las características físicas de la emisión y del estado termodinámico que presenta la atmósfera, lo cual se encuentra fuertemente vinculado al nivel de turbulencia que presenta el flujo atmosférico. En particular, a los efectos de describir el proceso de transporte y de dispersión de contaminantes en la atmósfera, debe ser caracterizado la dirección en la cual dicho contaminante será transportado y el nivel de turbulencia que presenta el flujo atmosférico. El transporte de contaminantes se vincula al flujo medio, en especial a la dirección que del viento, en tanto que la dispersión que sufren los contaminantes emitidos depende del nivel de turbulencia que presenta el flujo atmosférico.

En la determinación del clima en un sitio dado intervienen factores de diferente naturaleza, los cuales pueden ser clasificados en base a su dimensión espacial y a su duración.

Los fenómenos de mayor dimensión y duración se denominan factores de macro escala. En Uruguay estos factores son el anticiclón del Atlántico, los frentes polares o tropicales y el viento proveniente de la cordillera conocido como Pampero. Estos procesos tienen duración de días y se extienden sobre todo el territorio nacional.

Existen fenómenos de escala algo menor, que suelen durar algunas horas, los cuales se denominan factores de meso escala. Los factores de esta escala presentes en Uruguay son las brisas marinas. Este fenómeno es claramente presente sobre la costa del Río de la Plata y del Océano Atlántico, pero también suelen observarse en la riberas de grandes espejos de agua como ser los lagos de las centrales hidroeléctricas o de algunas lagunas.

La producción de turbulencia que se tiene debido a las características de la rugosidad del suelo y a las condiciones termodinámicas de la atmósfera. En la atmósfera, la turbulencia se produce básicamente según dos tipos de procesos. El primero es del tipo mecánico y está vinculado a la velocidad media del viento y al gradiente que presenta este parámetro en la altura y alrededor de los obstáculos que se encuentran apoyados sobre el suelo, tales como edificaciones y vegetación. Asimismo, por encima de los obstáculos, la distribución de velocidad media en altura presenta un gradiente que depende esencialmente de la rugosidad que presenta el suelo. En esa región también se produce turbulencia y vorticidad. El segundo proceso es de tipo termodinámico y está asociado al gradiente de la distribución de la temperatura en altura que presenta la atmósfera. La distribución de temperatura en altura que presenta la atmósfera es una consecuencia de los diferentes procesos de transmisión de calor que ocurren en la misma.

La producción de turbulencia, así como de vorticidad, que ocurre vinculada a una plantación merece ser analizada separando las regiones analizadas. Por un lado, se analiza el flujo en el seno de la plantación e inmediatamente por encima y, por otro lado, se analiza el flujo francamente por encima de la quinta. A los efectos prácticos, el nivel de producción mecánica de turbulencia en la región francamente por encima de la plantación, se caracteriza identificando el nivel de rugosidad que presenta el suelo.

Existe un número importante de referencias que permiten caracterizar la rugosidad como pueden ser las normativas de viento vigentes en el país, bibliografía vinculada a la Ingeniería del Viento como ser Simiu and Scanlan, 1986 y Holmes, 1990 o bien artículos disponibles en publicaciones científicas de autores entre los que se destaca Walmsley, et al., 1990 y Wang, et al., 1996.

Respecto al flujo que se desarrolla en el seno de la plantación e inmediatamente por encima de la misma existen diversas referencias que hacen un acercamiento a la estructura del flujo. Raupach, et al., 1996 y Boldes et al., 2003 presentan una excelente descripción del flujo en la región antes mencionada. Se destaca la existencia de estructuras coherentes en el flujo que se desarrolla en las plantaciones. Estas estructuras son vórtices de dimensión e intensidad similares, que se producen debido a las inestabilidades del flujo inmediatamente sobre las plantaciones con cierta regularidad y que evolucionan en la dirección del flujo medio. En particular se destaca la existencia de vórtices de tres escalas diferentes. En el seno de la plantación aparecerían vórtices de una escala del orden de un tercio de la altura de los árboles. Estos vórtices promoverían una dispersión de los contaminantes más intensa que la que se produciría en la atmósfera por encima de la quinta y por lo tanto llevaría a que, a una corta distancia de la fuente emisora, se tuviera una gran dilución de los mismos. En el seno de la plantación e inmediatamente por encima se identifican vórtices de una escala del orden de la altura de los árboles. Estos vórtices promueven el transporte de contaminantes desde la quinta donde se emiten hacia la región ubicada por encima. Desde esta región, los contaminantes son, principalmente, dispersados y transportados por el flujo que se desarrolla por encima de la plantación, aunque en parte son regresados al seno de la plantación por parte de estos vórtices de escala igual a la altura de los árboles. Finalmente, por encima de la plantación aparecen vórtices con una escala longitudinal del orden de diez veces la altura de los árboles. Estos vórtices asegurarían un incremento en la rapidez a la cual se dispersan los contaminantes.

Tal como se mencionó reiteradamente antes, el comportamiento del flujo atmosférico y en particular los procesos descritos en el párrafo anterior, se modifican debido a los diferentes estados termodinámicos de la atmósfera.

Existen diversas metodologías para caracterizar el estado termodinámico de la atmósfera. A tales efectos, los diferentes estados termodinámicos, se clasifican en tres clases dependiendo de la producción de turbulencia que ocurriría durante la ocurrencia de los mismos. Un primer estado se denomina estable. En este caso el estado termodinámico de la atmósfera promueve el amortiguamiento de cualquier perturbación que se produce en la atmósfera y por lo tanto turbulencia y la vorticidad que pudiera producirse por medios mecánicos es eliminada. Un segundo estado es el denominado neutro en cuyo caso el estado termodinámico no altera la turbulencia producida mecánicamente. Finalmente, un tercer estado es el denominado inestable en cuyo caso la turbulencia que se produce por medios mecánicos es amplificada. Las metodologías que se orientan a caracterizar el estado termodinámico de la atmósfera buscan identificar la ocurrencia de cada uno de estos estados. Una primera metodología consiste en determinar la denominada longitud de Monin-Obukhov que mide la altura hasta la cual sería significativa la producción mecánica frente a la producción térmica de turbulencia. Esta altura se calcula en la siguiente forma

$$L = -\frac{Tu^{*3}}{kgQ}$$

Siendo T la temperatura media del aire, u^* la velocidad de fricción del flujo y Q el calor se transmite al aire. Si $1/L$ es positivo, entonces la atmósfera resulta estable, si $1/L$ es negativo la atmósfera resulta inestable y si $1/L$ es cero la atmósfera es neutra. Una segunda metodología consiste en estimar el denominado número de Richardson que mide la relación entre la fuerza de flotación y la fuerza de inercia a la cual están sometidas las masas de aire.

$$Ri = \frac{\text{Empuje}}{\text{Inercia}} = \frac{g}{\theta} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2}$$

Siendo U la velocidad media del viento y θ la temperatura potencial. Si este número es positivo la atmósfera resulta estable, si es negativo resulta inestable y si es cero resulta neutra. Una tercera metodología para conocer el estado termodinámico de la atmósfera es a través de las denominadas categorías de Pasquill-Gifford, las cuales están caracterizadas en la tabla 2.1.

Categoría	Gradiente(°C/km)	Estado
A	<-19	Fuerte inestabilidad
B	-19 a -17	Moderada inestabilidad
C	-17 a -15	Ligera inestabilidad
D	-15 a -5	Neutra
E	-5 a 15	Ligera Estabilidad
F	15 a 40	Fuerte Estabilidad
G	> 40	Inversión

Tabla 2.1 – Clases de Estabilidad de Paquill-Gifford

Estas categorías de estabilidad fueron definidas a partir de la observación de la evolución que presentaban penachos emitidos desde chimeneas.

En estudios prácticos, en los cuales debe primar el sentido ingenieril, como el efectuado para conocer el efecto que sobre el medio aire tendrían las emisiones atmosféricas que se tendrían en el seno de plantaciones de árboles, suele utilizarse la última metodología de las antes presentadas a los efectos de conocer los estados termodinámicos de la atmósfera.

La información meteorológica requerida para conocer los estados termodinámicos de la atmósfera se compone básicamente por la velocidad del viento y por el nivel de nubosidad y por otro lado se requiere la hora del día solar. La magnitud básica que se busca caracterizar es la potencia térmica que se transmite al aire. Durante las horas del día habrá un aporte neto de potencia térmica desde el Sol al suelo y de este al aire, en tanto que durante la noche habrá un aporte neto de potencia térmica del aire al suelo y de este a la bóveda celeste. Entonces, durante el día es necesario conocer la dirección con la cual incide la radiación solar sobre el suelo y el nivel de nubosidad

existente. Dependiendo de dichos factores se definen diferentes grados de intensidad de insolación, es decir de aporte de potencia térmica al suelo. A los efectos de estimar la potencia térmica que pierde el suelo durante la noche alcanza con conocer el nivel de nubosidad. La tabla 2.2 ilustra la forma en al cual se estima la clase de estabilidad dependiendo de los parámetros antes mencionados.

Velocidad del viento a 10m (m/s)	Insolación Diurna			Nubosidad Nocturna	
	F	M	D	> 4/8	<3/8
< 2	A	A-B	B	F	G
2 a 3	A-B	B	C	E	F
3 a 5	B	B-C	C	D	E
5 a 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tabla 2.2 – Definición de las clases de estabilidad.

Un estudio de la naturaleza que se efectúa para conocer la forma en la cual se dispersará el contaminante que emitirá una industria a ser instalada en un sitio debe hacerse con el mayor rigor sin perder de vista que debe tener un sentido de Ingeniería Aplicada es decir que se deberá prestar atención al fenómeno físico manteniendo un margen de discrepancia aceptable y además se debe tener en cuenta que el estudio pretende abonar sobre resultados promedio obtenidos en diferentes períodos de tiempo.

Asociado a cada uno de los factores meteorológicos que se mencionaron antes, aparecen patrones de viento. Efectuando un análisis multivariado de una serie histórica de viento obtenido en un diverso número de estaciones meteorológicas es posible encontrar un importante número de patrones de viento, de los cuales sólo son significativos algunos de ellos, es decir los que se vinculan a alguno de los procesos físicos que determinan el clima de viento en el sitio, y por lo tanto alcanza con considerar sólo dichos patrones para caracterizar el clima de viento en la región que se busca estudiar. Esto quiere decir que es posible caracterizar el clima de viento con una información reducida respecto a la original, manteniendo los márgenes de discrepancia en niveles admisibles. En igual sentido, considerando series históricas muy largas podría suponerse, en principio, que se obtendrían resultados con menor margen de discrepancia respecto a los verdaderos valores a medida que se muestras. En el gráfico 2.1 se observa el espectro de la componente longitudinal del parámetro viento.

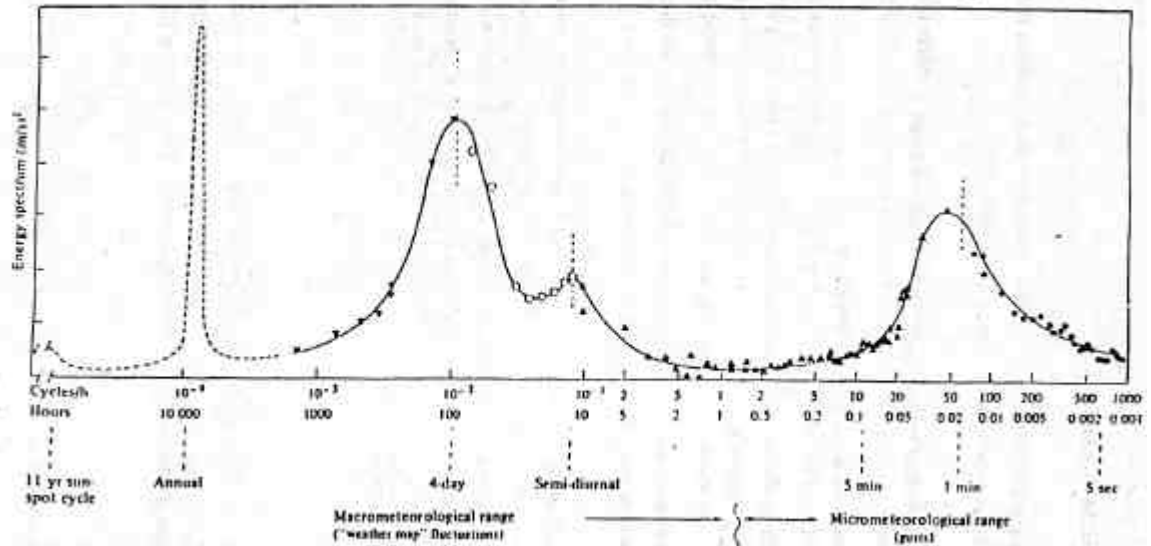


Figura 2.1 – Espectro de potencia del viento.

Obsérvese que en dicho espectro la energía aparece concentrada esencialmente en fluctuaciones con períodos menores a los cinco minutos y luego en el intervalo de 2 horas a 1000 horas. En este último período se destacan picos espectrales centrados en períodos de 12 horas (por ejemplo las brisas marinas) y en cuatro días (por ejemplo sistema anticiclónico atlántico). Finalmente, aparece un pico espectral correspondiente a período de un año, el cual se destaca presenta una energía (área bajo la curva) significativamente menor que los anteriores. Esto permite concluir que a los efectos de caracterizar el clima de vientos en un sitio se requeriría un período mínimo de un año. A medida que se agrega un año más a la serie histórica se incorpora más información de la señal correspondiente al período de un año. El análisis de señales estocásticas, tales como el viento atmosférico, implica la realización de un análisis de tipo experimental a los efectos de determinar el número de períodos de medición requeridos a los efectos de lograr un resultado representativo del proceso estocástico. Para el clima de viento que se tiene en Uruguay se considera, a modo de ejemplo, la matriz de probabilidad conjunta dirección – velocidad de viento obtenida para un período de tiempo del orden de los 10 años. Se construye ahora la misma matriz pero eliminando un período de un año completo. Se obtiene un error medio cuadrático promedio entre las matrices de 0.9%. Al remover dos períodos anuales de la serie histórica el error medio cuadrático promedio entre las matrices resulta de 1.2%. Si se extraen tres períodos anuales el error medio cuadrático promedio resulta de 2.2%. Si se extraen entre cuatro y nueve períodos anuales el error medio cuadrático promedio resulta de 3.3%. Es decir que para períodos entre 1 año y seis años no se aprecian diferencias significativas. Se entiende entonces que un período de tres años resulta un compromiso adecuado a los efectos de realizar un análisis de que implica caracterizar valores medios, tal como es el caso de este estudio, no visualizándose motivos para ampliar el período de estudio.

3 – Información meteorológica y caracterización de la estación meteorológica de Salto

En base a intercambios realizados con personal de la Dirección Nacional de Meteorología se decidió utilizar la información meteorológica obtenida durante los años 2004, 2005 y 2006. En este periodo de tiempo la medición se efectuaba en forma tri horaria, es decir un dato cada tres horas, a lo largo de todo el día.

Los datos que se solicitaron fueron velocidad y dirección de viento, temperatura de bulbo seco, nubosidad total y se discriminó entre nubosidad baja, media y alta.

La ubicación de la Estación Meteorológica de Salto, mientras se efectuaron las mediciones que se utilizan en este trabajo era 31°26.3' S, 57°58.9'W. Este sitio presenta para todas las direcciones una exposición correspondiente a un terreno tipo rural, tal como se observa en la figura 3.1.

A los efectos de utilizar los datos de viento que se obtienen en la estación meteorológica, para deducir el clima de vientos en otro sitio, resulta necesario identificar el tipo de terreno que corresponde al flujo donde se encuentra sumergido el anemómetro. Cuando el flujo de aire se desarrolla sobre un terreno homogéneo, como es el que rodea a la estación meteorológica, se conforma una región próxima al suelo con una estructura tipo capa límite. En esa región se identifica una zona más cercana al suelo en la cual la distribución de velocidad de viento en altura sigue una ley tipo logarítmica como la presentada en la ecuación (3.1).

$$U = \frac{u^*}{k} L \left(\frac{Z-d}{Z_0} \right) \quad (3.1)$$

En donde U es la velocidad media medida a la altura Z sobre el suelo, Z_0 la longitud de rugosidad, u^* la velocidad de fricción y k una constante universal denominada constante de von Karman cuyo valor es 0.41. Esta región, denominada sub capa logarítmica, suele presentar una profundidad de entre 100m y 120m. Por encima de esta zona se desarrolla la denominada región de la estela en donde la distribución de velocidad en altura sigue una ley tipo potencial como la presentada en la ecuación (3.2).

$$U = U_{ref} \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^n \quad (3.2)$$

Siendo U la velocidad media a la altura Z y n un coeficiente empírico vinculado al tipo de rugosidad del terreno sobre el cual se desarrolla el flujo. Esta sería la situación que se tendría en Colonia para las direcciones con exposición tipo mar.



Figura 3.1 – Ubicación de la Estación Meteorológica de Salto.

4 – Caracterización del clima en la ciudad de Salto

Se realizó un análisis de los datos registrados en la estación meteorológica de Salto. En el periodo considerado la velocidad media del viento fue de 3.7m/s, se registraron valores de velocidad media del viento inferiores a 2m/s durante un periodo de tiempo de algo más del 10.6%. La dirección más probable fue la ESTESURESTE.

En la figura 4.1 se presentan las curvas de densidad de probabilidad de velocidad de viento para cada uno de los años considerados. En cada gráfico se señalan la curva deducida a partir de los datos, así como la curva correspondiente a la distribución de Weibull que mejor se ajusta a los datos. Esta distribución presenta la ley consignada en la ecuación (4.1).

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c} \right)^k} \quad (4.1)$$

El parámetro de escala, k, adopta valores alrededor de 2, mientras que el factor de escala, c, es del orden de 0.8 la velocidad media en el sitio.

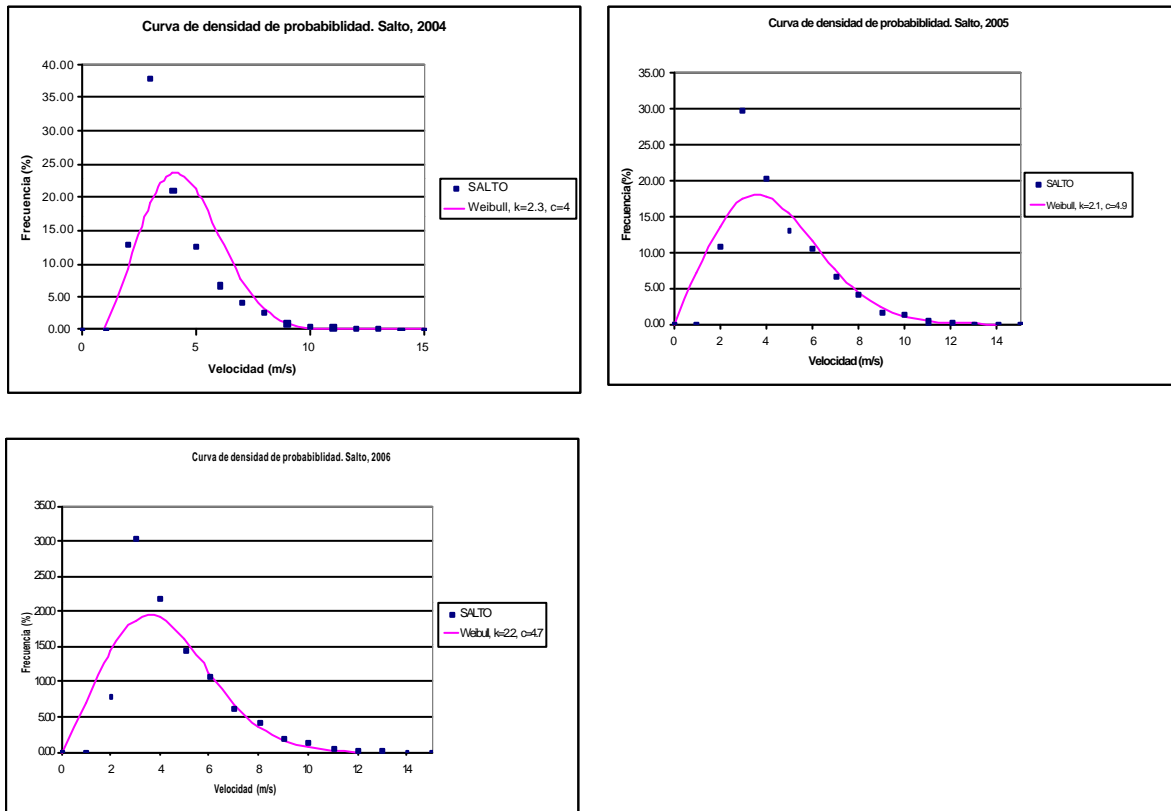


Figura 4.1 – Curvas de densidad de probabilidad de velocidad de viento en Salto, 2004 – 2006.

En la figura 4.2 se presenta, para cada año considerado, la rosa de vientos. En estos gráficos se observa la dirección más probable es alrededor del rumbo ESTESURESTE. Se destaca que para las direcciones correspondientes al cuadrante NOROESTE prácticamente no se registran eventos. En esas direcciones suelen darse los eventos extremos.

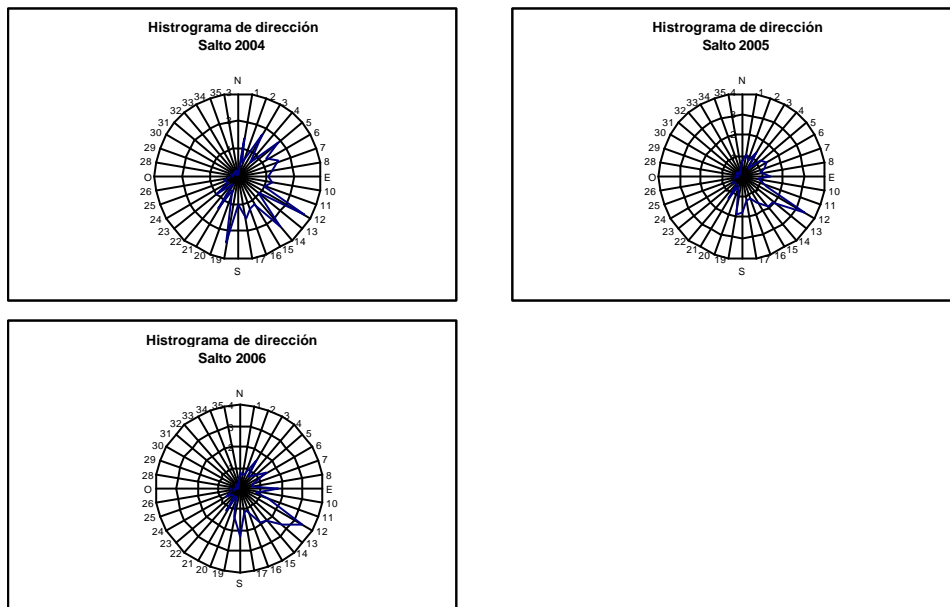


Figura 4.2 – Curva de densidad de probabilidad de dirección de viento en forma polar Salto, 2004 – 2006.

En la figura 4.3 se presentan los histogramas de temperatura de bulbo seco.

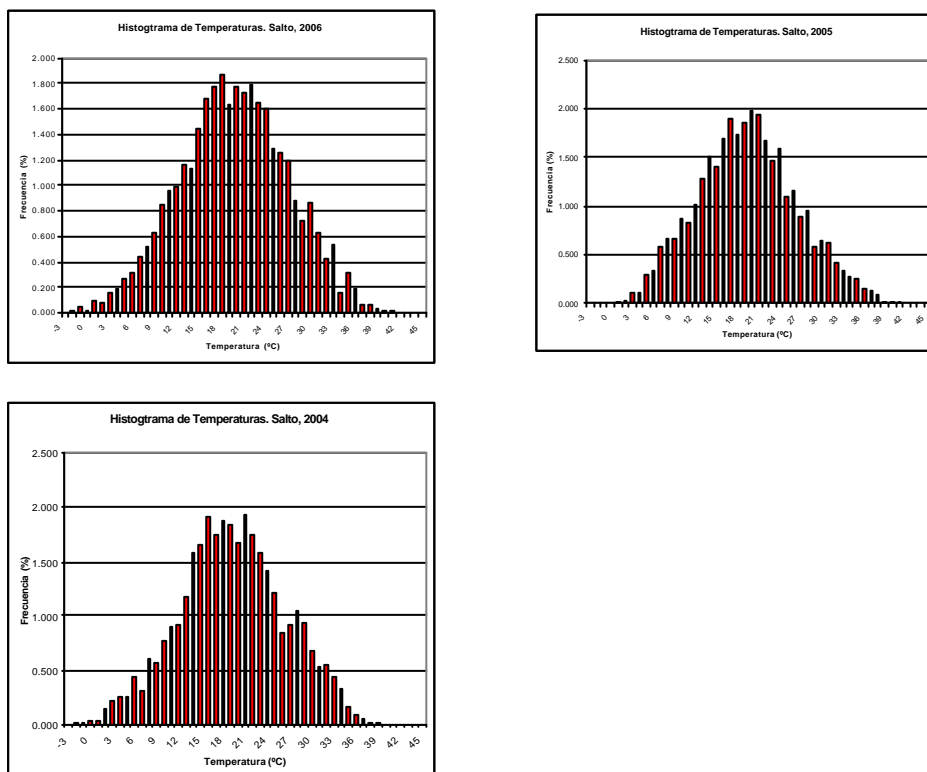


Figura 4.3 – Histograma de temperatura en Salto, 2004 – 2006.

Se observa que la temperatura se encuentra principalmente entre 3° C y 33° C.

A los efectos de evaluar el estado termodinámico de la atmósfera se siguieron dos metodologías. Una primera metodología consistió en determinar la longitud de Monin-Obhukov. Para ello se estimó la potencia térmica por unidad de superficie que recibe la tierra por radiación en el sitio. En esta estimación se tuvo en cuenta la época del año, la hora del día y el nivel de nubosidad total. También debió ser estimada la velocidad de fricción. Este parámetro se define como la raíz cuadrada del cociente entre la tensión rasante que impone el piso sobre el flujo y la densidad del aire. Este parámetro resulta una buena aproximación del nivel de turbulencia que se genera por procesos mecánicos. A los efectos de estimar este parámetro se supuso que la distribución en altura de la velocidad media era del tipo logarítmica como se consigan en la ecuación (3.1).

Una segunda metodología consistió en evaluar el denominado Índice de Radiación Relativo Neto. Este parámetro se define a lo que establece la tabla 4.1.

Altura solar a	Nubosidad		Índice relativo de radiación neta
	Cantidad	Tipo de nubes	
Tanto de día como de noche	8/8	Bajas	0
Durante la noche	£ 3/8	-----	-2
	> 3/8	-----	-1
0° < a £ 15°	-----	-----	1
15° < a £ 35°	£ 4/8	-----	1
	> 4/8	-----	2
35° < a £ 60°	£ 4/8	-----	1
	> 4/8	Bajas	2
		Medias	2
8/8	Medias o Altas	2	
a > 60°	£ 4/8	-----	4
	> 4/8	Bajas	2
		Medias	3
	8/8	Medias o Altas	3

Tabla 4.1 – Definición del Índice de Radiación Relativa Neto

En función de este índice y del valor de la velocidad del viento se establece la clase de estabilidad.

En la figura 44 se presenta para cada año el histograma de clases de estabilidad determinada por cada una de las metodologías antes descritas.

En ambos casos se observa que entre el 35% y el 45% del tiempo la clase de estabilidad es D, la cual corresponde a un estado termodinámico de la atmósfera tipo neutro, es decir que la producción de la turbulencia se hace por procesos mecánicos.

Los eventos de marcada estabilidad, identificados por las clases F y G, que se caracterizan por ambas metodologías cubren períodos de tiempo sensiblemente similares. La clase G se registra, en promedio, durante el 2% del tiempo mientras que la F se registra del orden del 9% del tiempo.

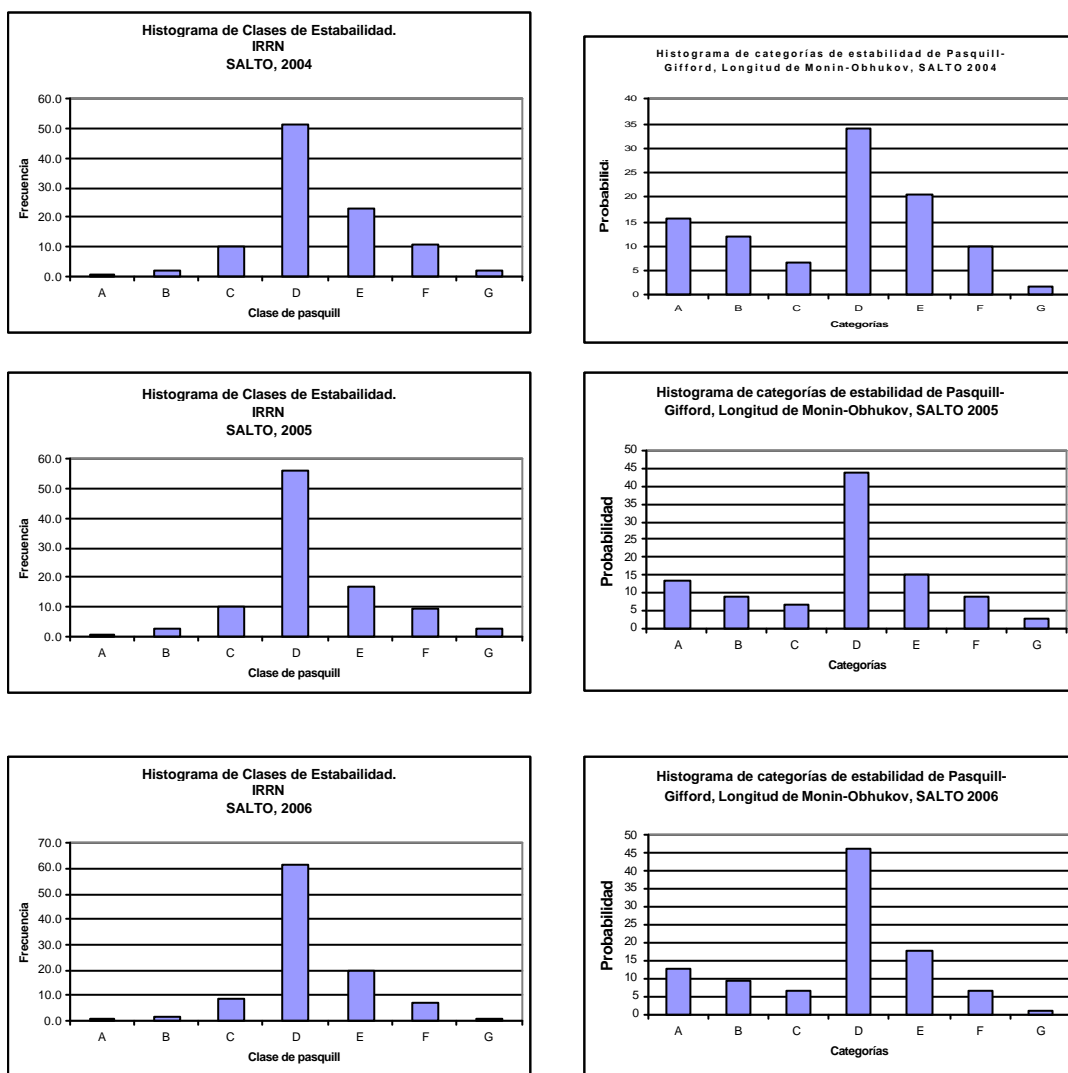


Figura 4.4 – Histograma de clases de estabilidad en Salto, 2004 – 2006.

La principal diferencia que se obtiene de la aplicación de ambas metodologías es la proporción de tiempo en que se registrarían eventos de elevada inestabilidad caracterizada por la clase A y estado neutro (clase D).

5 – Caracterización del clima en el sitio de implantación de la planta

Cuando el flujo atmosférico encuentra un cambio de rugosidad del suelo se comienza a desarrollar una región cercana al suelo, en la cual el flujo se encuentra en equilibrio con el suelo subyacente, que se denomina capa interna tal como se presenta en forma esquemática en la figura 5.1.

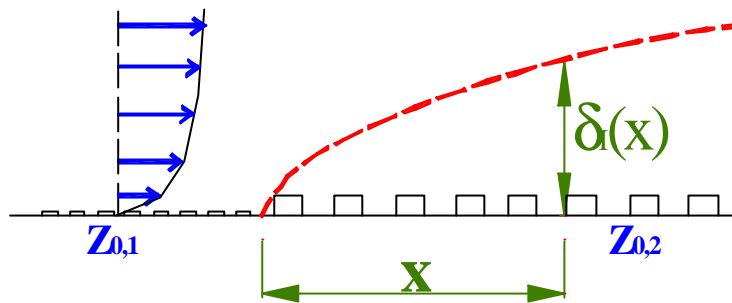


Figura 5.1 – Efecto del cambio de la rugosidad sobre el flujo atmosférico

El desarrollo de esta región depende del estado termodinámico de la atmósfera. Si la atmósfera es estable, esta capa adquiere menores alturas, mientras que si es inestable el crecimiento de la capa interna es muy importante en cortas distancias.

Este tipo de modificación se produciría cuando el flujo evoluciona sobre un monte de árboles desde una zona tipo rural. Esta modificación llevaría a que el flujo sobre el monte de árboles presentara las características asociadas al monte de árboles.



Figura 5.2 – Imagen de quintas

La velocidad del viento en un sitio se ubica una quinta de árboles por encima de los mismos se estima, suponiendo que ambos sitios se encuentran sumergidos en la subcapa logarítmica que sería la región de la capa límite atmosférica donde vale la distribución de velocidad media en altura dada por la ecuación (3.1). La velocidad del

viento en el sitio donde se ubican las plantaciones de árboles se estimaría a partir de la ecuación (5.1).

$$U_{quinta} = U_{Salto} \left(\frac{u_{quinta}^*}{u_{Salto}^*} \right) \frac{L \left(\frac{Z_{quinta} - d}{Z_{0,quinta}} \right)}{L \left(\frac{Z_{Salto}}{Z_{Salto}} \right)} \quad (5.1)$$

Mientras que en el sitio de implantación de la estación meteorológica de Salto el terreno es del tipo rural, presentando una longitud de rugosidad de 5cm, sobre un terreno tipo bosque de árboles de alturas de entre 22m y 31m y diámetros entre 18cm y 21cm, la longitud de rugosidad sería de 1m y la altura del plano de deslizamiento nulo sería de 23m. A partir de la expresión (5.1), la velocidad media del viento sobre una quinta de árboles, a 50m sobre el suelo es decir aproximadamente 20m por encima de las copas de los árboles, sería la expresada en la ecuación (5.2).

$$U_{quinta} = 0.768 U_{Salto} \quad (5.2)$$

Se supone que la temperatura en la zona de las quintas no resulta sensiblemente diferente de la registrada en la estación meteorológica de Salto debido a las características de la zona donde se ubica esta.

En la figura 5.3 se presenta la curva de densidad de probabilidad de velocidad del viento a 10m del suelo para todo el periodo considerado.

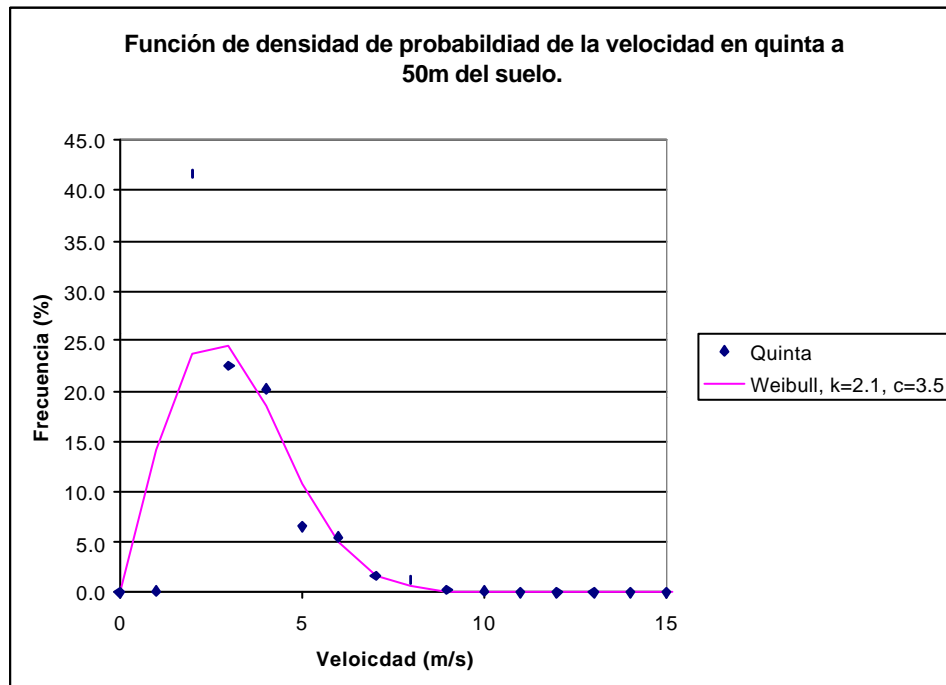


Figura 5.3 – Curva de densidad de probabilidad de velocidad del viento a 50m del suelo, quinta de árboles, 2004 – 2006.

Se observa que la ley de Weibull que mejor ajusta a los datos presenta parámetros distintos a los que presentaba en Colonia. En la figura 5.4 se presenta al rosa de viento para todo el periodo considerado.

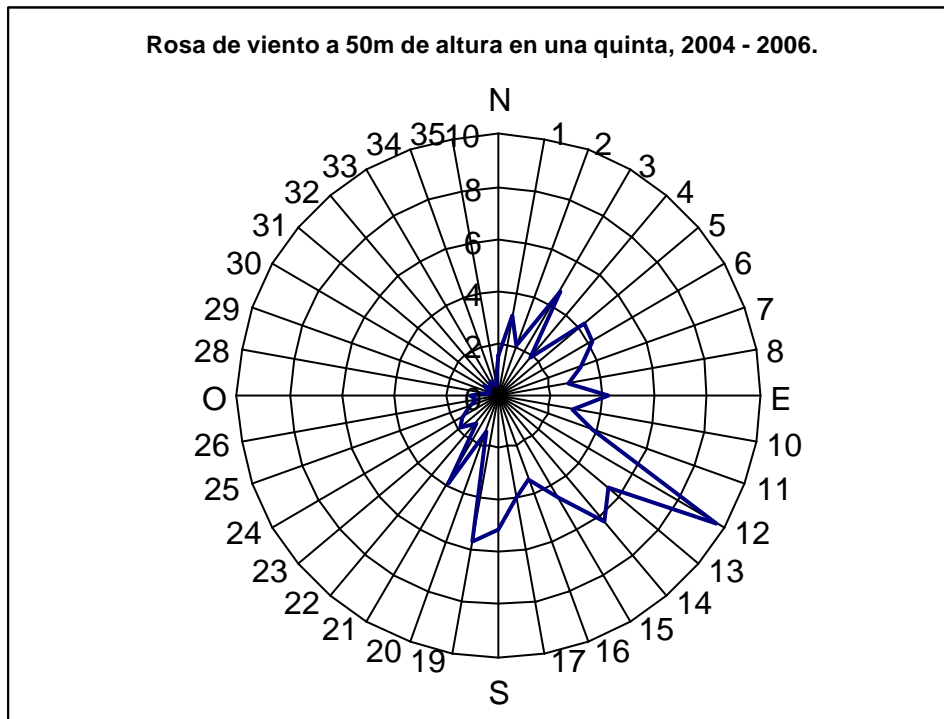


Figura 5.4 – Rosa de viento en quinta de árboles, 2004 – 2006

En la figura 5.5 se presenta el histograma de temperaturas, resultando la temperatura media del periodo de 17.4°C.

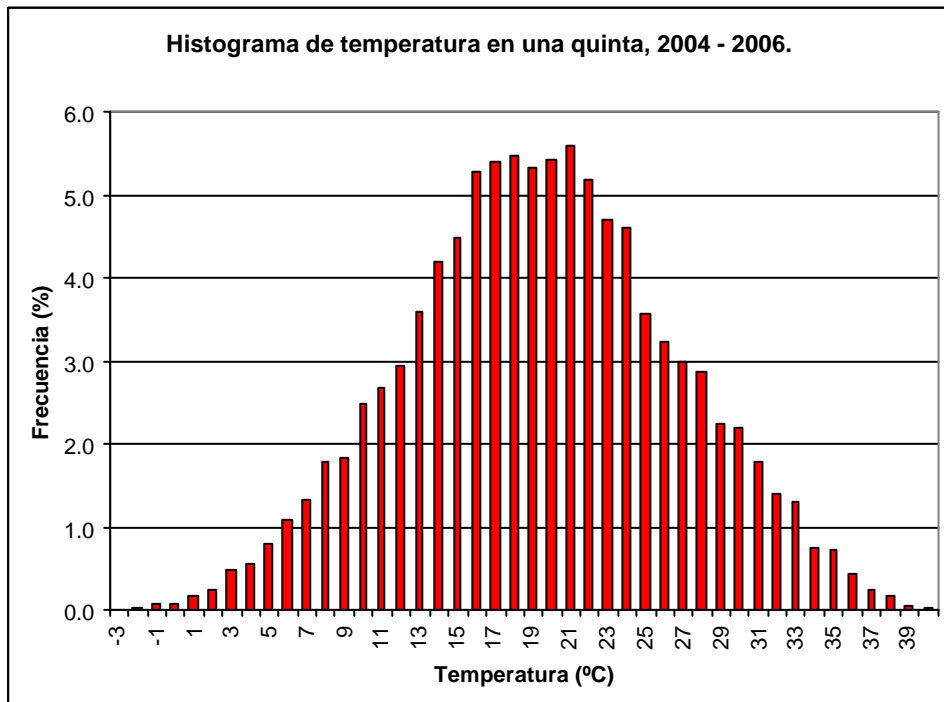


Figura 5.5 – Histograma de temperatura quinta de árboles, 2004 – 2006.

Finalmente, en la figura 5.6 se presenta el histograma de clases de estabilidad en el sitio donde se ubica en general una quinta de árboles para el periodo de tiempo considerado.

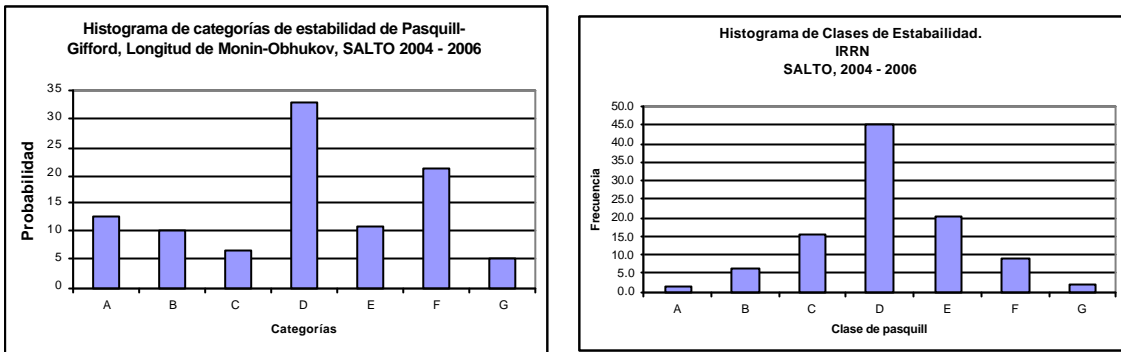


Figura 5.6 – Clases de estabilidad, Quinta de árboles, 2004 – 2006.

Se destaca que en la zona de las quintas de árboles, la cantidad de eventos con estados de la atmósfera correspondientes a fuerte estabilidad y fuerte inestabilidad crecen, haciéndose menor la condición de atmósfera neutra, aunque siempre prevaleciente.

A los efectos de tener una imagen más acabada de las condiciones atmosféricas que podrían tener vinculadas situaciones comprometidas del punto de vista de la dispersión de contaminantes se estimó la altura de la base de la capa de inversión. Esta altura sería indicaría al región de la atmósfera en al cual habría una mezcla debido a la turbulencia producida por acciones mecánicas, por encima de la cual los efectos térmicos hace que la atmósfera se comporte como estable. En caso que esta altura se ubique por encima de la fuente de emisión pero no más allá que una vez y media la misma daría lugar a una situación denominada fumigación, a la cual se asocian elevadas concentraciones de contaminantes. En la figura 5.7 se ilustra tal situación.

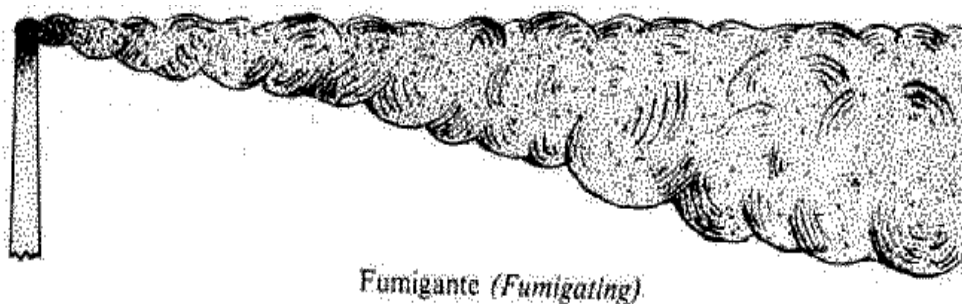


Figura 5.7 - Penacho fumigante

La estimación de la altura de la base de la inversión se realiza de acuerdo a lo presentado en Panofsky y Dutton, 1983 según la ecuación (5.3)

$$h_i = 0.4 \sqrt{\frac{u^* \cdot L}{f}} \quad (5.3)$$

Donde L es la longitud de Monin – Obhukov y f el parámetro de Coriolis. Se destaca que las evidencias experimentales presentan una cierta dispersión alrededor del valor determinado por la ecuación (5.3), en especial para velocidad bajas, debido a las dificultades en la medición. Para velocidades altas la ecuación (5.3) ha mostrado ser adecuada para predecir dicha altura.

En la figura 5.8 se presenta un histograma de valores de altura de base de inversión para el periodo de tiempo considerado.

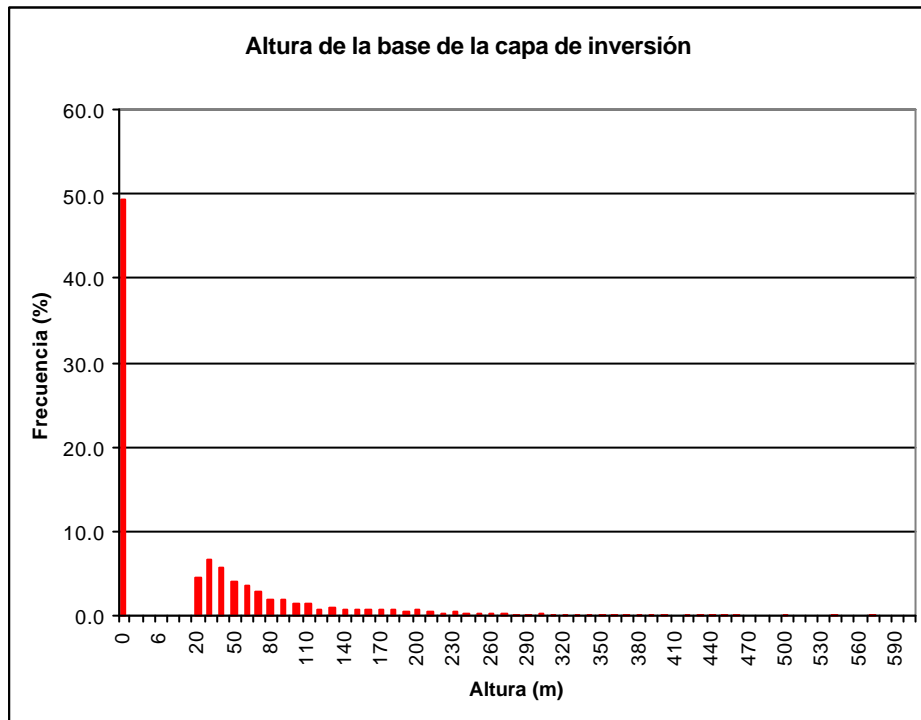


Figura 5.8 – Altura de la base de inversión.

A partir de la observación del gráfico 5.8 se destaca que la altura de la base de inversión resulta principalmente significativamente menor o significativamente mayor que la altura media de las quintas de árboles. Para alturas entre 0m y 30m se tendría una frecuencia de ocurrencia de 11.6%. Se destaca que en esta proporción no se consideró los casos con altura nula, pues esos casos corresponden a situaciones neutras. En estos casos la región en que se dispersan los contaminantes emitidos a nivel del suelo, como sería el emitido por el escape de un camión, estaría contenida en el mismo bosque. Esta capa presentaría alturas entre 30m y 60m en un 13.2% de los casos. Esto significa que los contaminantes emitidos se dispersarían en una región de la atmósfera de una altura no mayor al doble de altura media de los árboles.

Según la descripción del flujo que se desarrollarían en las plantaciones, se generarían vórtices de escala 10m y 30m en el seno de la plantación y del orden de los 300m sobre la misma. Este complejo de vórtices incrementa en un factor de aproximadamente 2 el coeficiente de dispersión lateral. En cuanto a los coeficientes de dispersión vertical cambiarían en la dirección vertical. Entre la altura de los árboles (h) y la altura donde termina el follaje (h_0) los coeficientes de dispersión cambian según la

ley presentada en la ecuación (5.4), mientras que entre la altura donde termina el follaje y el suelo según la ecuación (5.5), según los resultados que se presentan en Belot, et al., 1976.

$$k_z(Z) = k_z(h) e^{-2.5\left(1 - \frac{Z}{h}\right)} \quad (5.4)$$

$$k_z(Z) = k_z(h_0) \quad (5.5)$$

Es decir que por debajo del follaje se supondrá que el coeficiente de dispersión vertical se mantiene constante.

6 - Conclusiones

En base a las características deducidas para las zonas donde se ubicarían las quintas de árboles, la velocidad media del viento sería del orden del 77% a 50m del que se tendría a 10m del suelo en un terreno rural como el que se ubica en la estación meteorológica de Salto.

La atmósfera presentaría en cerca de la mitad del tiempo un estado termodinámicamente neutro.

Aproximadamente el 25% del tiempo la capa de inversión se encontraría a menos de 60m de altura y del orden del 13% del tiempo por debajo de los 30m. Esto confina la región de la atmósfera en la cual se dispersan los contaminantes que se emiten en la atmósfera, lo cual se analizará si resulta significativo en los casos que se analicen.

Debido a la presencia de los árboles, en el seno de la quinta aparecen sistemáticamente vórtices de escalas 10m y 30m (estructuras coherentes) y del orden de 300m por encima. Estas estructuras hacen más intensos la dispersión y el transporte de los contaminantes emitidos, lo cual se traduce en un incremento de los coeficientes de dispersión en zonas cercanas al suelo.

7 – Bibliografía

Belot, Y., Baille, A., Delma, J.L., “Modele numerique de dispersion des polluants atmospheriques en presence de couverts vegetaux”, Atmospheric Environment, Vol. 10, pp. 89 – 98, 1976.

Boldes, U., Scarabino, A., Marañón, J., Colman, J., Gravenhorst, G., “Characteristics of some organized structures in the turbulent wind above and within a spruce forest field measurement”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 91, pp.1253-1269, 2003.

Holmes, John D., “Wind Loading of Structures”, Ed. Spon Press, 2001.

Panofsky, H.A. and Dutton, J.A., “Atmospheric turbulence, Models and methods for engineering applications”, John Wiley and Sons, 1983.

Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y., “Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy”, Boudary-Layer Meteorology 78, pp351-382, 1996

Simiu and Scanlan, “Wind Effects on structures: An introduction to wind engineering”, John Wiley & Sons, 1986.

Walmsley, J.L., Taylor, P.A. and Salmon, J.R., “Simple guide for estimating wind speed variations due to small-scale topographic feature - An update”, Comunicación particular, 1990.

Wang, Z.Y., Plate,E.J., Rau,M. and Keiser,R., “Scale effects in wind tunnel modelling”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 61, pp.113-130, 1996.