

Universidad Nacional del Nordeste

Facultad de Ingeniería

Carrera:

Maestría en Ciencias de la Ingeniería



**Medición de contaminantes en flujos turbulentos,
aplicando técnicas de edición de videos y procesamiento
digital de imagen**

T E S I S

Para obtener el título de:

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

Ing. Vázquez Raimundo Damian

Director de tesis:

Dr. Ing. Eduardo A. Perondi

Co-director de tesis:

Dr. Ing. Adrián R. Wittwer

Resistencia, Chaco Argentina

2011



Universidad Nacional del Nordeste

Carrera

Maestría en Ciencias de la Ingeniería

Resistencia - 8 de marzo de 2011

Trabajo de Tesis

Título

**Medición de Contaminantes en Flujos Turbulentos, Aplicando
Técnicas de Edición de Videos y Procesamiento Digital de Imágen**

Autor : Ing. Vazquez Raimundo Damian

Director: Dr. Ing. Eduardo A. Perondi

Co-director: Dr. Ing. Adrian R. Wittwer

Índice

1. Introducción	11
2. Conceptos Fundamentales	16
2.1. Semejanza y Modelos a Escala Reducida	16
2.2. Flujo Turbulento	18
2.3. Trazas Atmosféricas y Contaminantes	21
2.4. El Modelado	23
2.5. Tipos de Modelos	26
2.6. Modelo Gaussiano de Dispersión	27
2.7. Modelos de Difusión Simplificado	31
2.8. Consideraciones del Modelo de Difusión Simplificado	33
2.9. Requisitos del Modelo de Dispersión del Tipo Gaussiano	35
3. Fundamentos de la Edición de Video	36
3.1. Dispositivo Capturador de Imagen	37
4. Procesamiento Digital de Imagen	41
4.1. Representación de una Imagen Digital	41
4.2. Operaciones con Imágenes Digitales	43
4.3. Herramientas Estadísticas Utilizadas en PDI	45

5. Instrumental y Materiales	50
5.1. Características de la Toma de Datos en el Canal de Viento	55
6. Desarrollo del Trabajo de Investigación	58
6.1. Hipótesis de Trabajo	58
6.2. Metodología	59
6.3. Procedimiento para el Análisis del Proceso de Dispersión	62
6.3.1. Calibración del Sistema	65
6.3.2. Concentración Versus Máxima Escala de Gris	69
6.3.3. Relación de la Concentración y la Escala de Gris	71
6.3.4. Procedimiento para Calcular la Concentración de Contaminante	76
6.4. Consideraciones Finales	77
7. La Estadística en el Proceso de Dispersión	80
7.1. Análisis Estadísticos de Escala de Gris en una Región Rectangular . .	80
7.2. Comparación de Campos de Concentración Utilizando Descriptores . .	85
7.3. Histogramas	87
7.4. Función Probabilidad Acumulada	93
7.5. Análisis de Resultados	96
8. Conclusiones	98

Índice de figuras

1.	Traza Atmosféricas [19].	22
2.	Modelo Gaussiano de Dispersión [19].	28
3.	Vista en Planta y Concentración Relativa [19].	29
4.	Distribución Instantánea de Concentraciones y Promedios Horarios [19].	30
5.	Gráfica de $\sigma_z(x)$	30
6.	Esquema del Modelos de Difusión Simplificado [21].	31
7.	Imagen Instantánea(A), Imagen Promediada (B) [21].	32
8.	Sensor CCD de Barrido de Línea(a), Sensor CCD de Área o Matricial(b).	38
9.	Software encargado de realizar cálculos de campos de concentración.	42
10.	La matriz A representa el humo en la imagen y B el fondo.	44
11.	Operación de Segmentación.	45
12.	Histograma de la imagen en distintos lugares.	45
13.	De la matriz fuente se obtiene P_m y se ubica en la matriz destino.	46
14.	El comportamiento de la población se refleja en el signo de los descriptores.	48
15.	a)Correlación lineal positiva. b) Correlación lineal negativa. c) No hay correlación.	49
16.	Imagen del instrumento luxómetro.	50
17.	Imagen del instrumento anemómetro.	51
18.	Imagen de la chimenea, fondo negro, piso blanco y luxómetro.	52

19. Reservorio de humo.	52
20. Imagen del canal de viento.	53
21. Imagen de rugosidad y agujas.	54
22. Ubicación de los puntos P1, P2, P3 y P4 sin el modelo.	55
23. Ubicación de los puntos P1,P2,P3 y P4 en relación al modelo.	56
24. Cálculo de $gris_n$ y z_n despues de la segmentación.	62
25. Situación ideal descrita por la ecuación del modelo simplificado de Gauss [35].	63
26. Forma de la pluma causada por un objeto antes de la chimenea [35].	64
27. Forma de la pluma causada por un objeto después de la chimenea [35].	64
28. Segmentación de la pluma aplicando P.D.I.	65
29. Segmentación de la columna de humo aplicando PDI caso 2.	66
30. Se observa en $[x_2, x_3]$ una fluctuación en la pluma.	67
31. Columna de humo, se asemeja al modelo ideal.	67
32. Gráfica de $\sigma_z(x)$ teórico y experimental.	68
33. Curva normalizada de la escala de gris y Curva de Gauss, alejadas de la chimenea.	68
34. Curva normalizada de la escala de gris y Curva de Gauss, cercanas a la chimenea.	69
35. Concentración en relación a la escala de gris.	70
36. Variación temporal de la escala de gris.	72

37. Variación temporal alejada de la chimenea (línea negra).	72
38. Puntos de muestreo para la experiencia, fondo, humo, humo1 y humo2. . . .	73
39. Comportamiento de los puntos de referencia, fondo, humo, humo1 y humo2. .	74
40. El intervalo de trabajo [140, 170].	75
41. Curvas de Briggs.	75
42. La columna de humo en el canal de viento.	77
43. Objeto en el canal de viento interfiere a la columna de humo.	78
44. Software encargado de calcular la media aritmética de la escala de gris. . . .	78
45. Gráfica de la concentración versus escala de gris.	79
46. Comportamiento de la pluma en el canal de viento.	82
47. Caso 1 (A), caso 6 (B) y P3 (ocho vecinos).	85
48. Caso 1 (A), caso 6 (B) y P3 (seis vecinos).	87
49. Columna de humo afectada por un objeto.	88
50. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 1).	89
51. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 2).	89
52. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 3).	90
53. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 4).	90
54. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 5).	91
55. Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 6).	91

56.	Histograma en el punto P3 según los casos 1, 2 y 3.	92
57.	Histograma en el punto P3 según los casos 4, 5 y 6.	92
58.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 1).	93
59.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 2).	94
60.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 3).	94
61.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 4).	95
62.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 5).	95
63.	Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 6).	96

Agradecimientos

Agradezco a mi esposa Leticia y mi hijo Pancho por el aporte incondicional.

" Hay que vivir el momento feliz,
hay que gozar lo que se puede gozar,
porque sumando la cuenta total,
la vida es un sueño y todo se va."

Resumen

El estudio de procesos de dispersión atmosférica permite evaluar problemas específicos y el análisis de modelos de difusión. La necesidad de contar con resultados experimentales en conjunto con los elevados costos de la experimentación a escala natural conduce a desarrollar estudios de laboratorio. El objetivo de este trabajo de investigación es evaluar la aplicación de técnicas de edición de video para el estudio de procesos de dispersión. Para tal fin, se desarrolla e implementa un procedimiento para estimar el campo de concentración en un proceso de dispersión atmosférica, utilizando modelos a escala reducida en un túnel de viento de pequeño porte.

Para obtener el campo de concentraciones en la pluma de dispersión, se utiliza la edición de videos y técnicas de procesamiento de imágenes. La edición de video genera fotogramas representativos de sucesivos estados de la pluma de emisión simulada con humo. Técnicas de procesamiento digital permiten la segmentación del humo en las imágenes respectivas. Utilizando el modelo de distribución espacial Gaussiana de las concentraciones, a partir de los fotogramas, se calculan coeficientes de dispersión para cada posición a sotavento de la emisión. Esto constituye la calibración del sistema óptico y permite estimar la relación existente entre la escala de gris y la concentración de humo en una posición determinada, partiendo de un ensayo en situaciones semejantes a las ideales. Una vez establecida la calibración, sus resultados pueden ser extendidos a aquellas situaciones de dispersión más complejas. El desarrollo experimental planteado define además el rango de aplicación y las limitaciones de sistema de análisis.

La evaluación del proceso de dispersión se complementa y profundiza mediante el uso de herramientas estadísticas denominadas descriptores. Histogramas y funciones de probabilidad acumulada son determinados con el fin de realizar comparaciones de cuadros en diferentes regiones de la imagen digital o verificar la similitud de comportamientos en experimentos semejantes. El uso de este tipo de herramientas podría extenderse al análisis de las fluctuaciones de concentración, al menos hasta las frecuencias de fluctuación que permitan las muestras de los sucesivos fotogramas, aplicando el análisis espectral.

1. Introducción

Los contaminantes del aire atmosférico son transportados, dispersados y diluidos en la atmósfera principalmente por el viento medio y la turbulencia atmosférica. Este proceso depende de un gran número de variables características del escurrimiento atmosférico. Las condiciones meteorológicas y la duración de la emisión tienen una gran importancia en el alcance de la dispersión de la pluma. Diversos trabajos demuestran que la máxima concentración depende de la altura de la chimenea, pero además es fuertemente dependiente de la estabilidad atmosférica. Por otro lado, en emisiones producidas en la capa límite superficial, es decir, a alturas menores a 100 metros, la turbulencia mecánica generada por la topografía del terreno y los obstáculos próximos tienen una incidencia primordial.

Los estudios de campo para la determinación de la dispersión atmosférica son difíciles de controlar y costosos, por este motivo el desarrollo de métodos de análisis de concentración en túneles de viento es una herramienta útil que puede tener una variedad de aplicaciones. Los modelos de dispersión atmosférica requieren conocimientos de algunos conceptos fundamentales de mecánica de fluidos en relación a los modelos de turbulencia, leyes de semejanza y teoría de dispersión¹.

En especial, el modelo de Gauss es fácil de utilizar y la potencia de cálculo necesaria para su implementación en una computadora personal es relativamente baja. Existen algunos trabajos, donde se simulan situaciones de dispersión de contaminantes utilizando un modelo a escala natural y los valores de los datos son tabulados en una planilla de cálculo para el procesamiento de la información en una planilla de cálculo. Los coeficientes que intervienen en la fórmula, son extraídos de tablas (dependiendo de las condiciones de trabajo). Por ejemplo, estado del clima, tipo de suelo, características del contaminante, velocidad del viento, entre otros factores.

Desafortunadamente, el modelo de dispersión de Gauss no puede ser aplicado a todos los fenómenos, debido a las hipótesis a partir de las cuales fue desarrollado.

¹Irving H. Shames *Profesor of Engineering Sciences and Head, Division of Interdisciplinary Studies and Research, University of Buffalo*, La mecánica de los Fluidos.

Para subsanar dicho inconveniente, se puede recurrir a otros modelos numéricos más sofisticados o modelos físicos, que permiten estudiar el fenómeno de dispersión de contaminantes con mayores niveles de complejidad.

En ese sentido, cuando se realizan evaluaciones a partir de técnicas de visualización, generalmente se recurre a la simulación de la emisión mediante humo, y el proceso de dispersión se analiza mediante imágenes que son procesadas digitalmente.

Los primeros estudios de evaluación de procesos de dispersión de gases mediante la utilización de túneles de viento de capa límite, fueron realizados por Lord & Leutheusser [1]. Posteriormente, los estudios de Pratte & Baines [2] permitieron analizar el comportamiento de emisiones orientadas en dirección normal a un flujo de aire estacionario. Esos resultados fueron complementados por las experiencias realizadas por Kamotani & Greber [3].

La realización de ensayos con modelos a escala en el túnel de viento implica, en primer lugar, modelar la capa límite atmosférica. Counihan [4] y Standen [5], emplearon métodos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla, y desarrollaron técnicas de simulación apropiadas para reproducir capas límites en condición de estabilidad neutra. Estas técnicas permiten obtener representaciones de capas límites que se desarrollan sobre terrenos rurales y urbanos.

Además de los requerimientos de simulación de la capa límite atmosférica, para reproducir fenómenos de difusión, se deben establecer condiciones de semejanza para modelar el comportamiento de la pluma de emisión. De acuerdo a Isyumov & Tanaka [6], los requerimientos consisten en semejanza geométrica de la fuente, igualdad del número de Froude, igualdad de la relación de densidad, igualdad de la relación entre velocidades e igualdad del número de Reynolds de la fuente. En general, los requerimientos que implican la semejanza completa entre modelo y prototipo, no se cumple en los ensayos en túnel de viento. Por otro lado, en una etapa preliminar como la que se presenta en este trabajo, las consideraciones de semejanza se circunscriben a la simulación de la capa límite atmosférica.

Los gases utilizados como trazador dependen del tipo de pluma que se pretende

simular y determinan que instrumento debe utilizarse para evaluar la concentración. Es muy común el uso de helio puro [7] o de mezclas de aire-helio [8]. Para emisiones que generan plumas con empuje negativo, Donat & Schatzmann [9] utilizaron una mezcla de SF_6 , CO_2 y C_2H_6 .

Cuando se realizan evaluaciones a partir de técnicas de visualización, generalmente se recurre a la simulación de la emisión mediante humo, y el proceso de dispersión se analiza mediante imágenes que son procesadas digitalmente.

El humo, según las propiedades químicas en el proceso de generación, puede tener características espectrales que permiten la transmisibilidad de luz a través de él. El fenómeno está relacionado con las partículas que pertenecen al humo, por ejemplo si son monodispersos o polidispersos. Existe una gran variedad de métodos para la observación del proceso de dispersión alrededor de un modelo en un túnel aerodinámico. Estos incluyen la utilización de columna de humo y la articulación de un sistema óptico. Los sistemas ópticos, operan en virtud del hecho de que el índice de refracción de un gas es función de la densidad del mismo. El cambio en el índice de refracción proporciona el conocimiento de que, con ayuda de un sistema óptico, puede obtenerse información relativa al campo de densidades en una parte del humo de elevada velocidad [10]. De esta manera, controlando la forma de generar humo y su cantidad, es posible establecer una relación entre la luz que atraviesa la pluma y su concentración.

En ese sentido, también se puede destacar el trabajo realizado por Poreh [11] donde implementa un sistema óptico de medición de dispersión de contaminante articulando conceptos relacionados a la radiación infrarroja, filtros ópticos, sistemas de acondicionamiento de señales digitales, generación de humo mezclado con helio y un dispositivo encargado de calibrar y dosificar la emisión de contaminante en un túnel de viento. La experiencia consiste en colocar un receptor infrarrojo en una posición cercana a la columna de humo para captar la intensidad de radiación emitida por el transmisor infrarrojo. La trayectoria de la columna de humo pasa a través de los mismos, provocando una fluctuación de señales eléctricas en el tiempo. Un sistema amplificador de señales eléctricas acondiciona la señal, permitiendo de esta manera el procesamiento de la información hacia una computadora personal. Los niveles de la

intensidad de las fluctuaciones eléctricas se relacionan con la variación de la concentración en el tiempo en esa posición. Mediante un software y la calibración del sistema experimental de medición, permite calcular el campo de concentración en una región específica.

Huber [12][13] realizó una series de investigaciones en este sentido, y estableció una relación entre la concentración en una pluma (en un canal de viento) y la imagen obtenida en ella utilizando una filmadora de video en formato VHS Standard. Mediante un procedimiento la filmación se descompone en sucesivos fotogramas para extraer información de la densidad de la pluma en el video. Los cálculos realizados se basan en fórmulas estadísticas como por ejemplo el promedio, desviación estándar, el coeficiente de variación, probabilidad acumulada y descriptores estadísticos.

Es muy importante además destacar el trabajo de Ohba [14], donde se describe un procedimiento para vincular el proceso de dispersión de contaminante y un sistema óptico de visualización de imágenes. Los materiales y métodos utilizados en su trabajo experimental, lograron establecer una vinculación entre la intensidad de iluminación en una región de la imagen y la concentración de contaminante.

En los trabajos referidos se ubica a la tecnología de video de imagen digital, como un instrumento de medida cuantitativa del proceso de dispersión de contaminante en forma espacial alrededor de un modelo a escala reducida en un túnel de viento.

La ventaja de estos nuevos procedimientos sobre los ensayos experimentales a escala natural y en ambiente real son, fácil implementación con bajo costo, el tiempo relativamente corto de obtención de las medidas, inexistencia de sensores dentro del canal de viento (la cámara de video se ubica en el exterior) y la accesibilidad de información de los datos se hace evidente.

A partir de la revisión bibliográfica realizada y en función de las necesidades del laboratorio y la disponibilidad de instrumental, se establecieron los siguientes objetivos.

1. Desarrollar una metodología sencilla, de bajo costo, flexible, basada en el procesamiento digital de imágenes, para estudiar en forma experimental procesos de dispersión de contaminante en un modelo a escala reducida en un canal de viento.
2. Evaluar la aplicación de métodos, procedimientos y técnicas para el estudio de los procesos de dispersión de mayor complejidad, a partir del análisis estadísticos de señales provenientes de la edición de video.
3. Articular conceptos relacionados con mecánica de fluidos, técnicas de edición de videos y método numérico.

Este último objetivo tiene como meta futura la integración de los conceptos mencionados en un software de uso general, con código fuente abierto y licencia libre, para ser utilizado en ambiente académico y científico.

A continuación, el texto comienza con una descripción de conceptos relacionados a mecánica de los fluidos, turbulencia, semejanza, modelos y, en particular, el modelo Gaussiano de dispersión. Luego se profundiza en conceptos relacionados a la edición de videos y procesamiento digital de imágenes. Se realiza una descripción de la metodología, el procedimiento del trabajo experimental, la calibración de un sistema óptico y la obtención de valores de concentración característicos de procesos de dispersión, mediante el empleo de fotogramas. Finalmente, se realiza un análisis estadístico a partir de las señales generadas por los fotogramas y se establecen las conclusiones generales del trabajo desarrollado.

2. Conceptos Fundamentales

En este capítulo son presentados los conceptos necesarios para el desarrollo del trabajo propuesto. Los temas analizados incluyen conceptos de semejanza, modelos a escala reducida, turbulencia, trazas atmosféricas y contaminantes, modelación, tipos de modelos y, en forma particular, el modelo de dispersión de Gaussiano. Los conceptos relacionados a la edición de video y procesamiento de imagen digital se desarrollan en el próximo capítulo.

2.1. Semejanza y Modelos a Escala Reducida

En mecánica de los fluidos, los estudios experimentales con modelos a escala reducida son herramientas que facilitan el análisis del comportamiento del flujo en un túnel de viento.

Para tal fin, la utilización de la teoría de semejanza es muy importante en el diseño de los ensayos experimentales que emplean modelos. Semejanza, en sentido general, significa que se mantiene la relación entre dos fenómenos. En mecánica de los fluidos es usualmente la relación entre un flujo a escala natural y otro de menores dimensiones, pero de contornos geoméricamente semejante. No obstante, debe señalarse que existen reglas de semejanza, de uso común en la mecánica de fluidos, en que intervienen flujos con contornos no semejantes. Por ejemplo, existe una relación de semejanza entre un flujo compresible subsónico (número de Mach menor que la unidad) y un flujo incompresible alrededor de un cuerpo deformado de manera prescripta con relación al del flujo compresible. También se utilizan modelos de un río, que tienen semejanza en planta, pero que no son semejantes frecuentemente en profundidad con el río real (Modelos distorsionados). En el trabajo de investigación solo se refiere a flujos geoméricamente semejantes (flujos con contornos geoméricamente semejantes).

Dos flujos constituidos por conjunto de líneas de corrientes semejantes se llaman flujos cinéticamente semejantes. Como los contornos forman alguna de las superficies de corriente, es evidente, que los flujos cinemáticamente semejantes deben ser también geoméricamente semejantes y los requerimientos de semejanza para el modelo

exacto del comportamiento de la pluma de emisión pueden resumirse en la siguiente Tabla:

Tabla 1 Condición de semejanza

Grupos adimensionales	Ecuación
Semejanza geométrica de la fuente	$\lambda_L = \frac{d_{\text{modelo}}}{d_{\text{prototipo}}}$
Igualdad del número de Froude	$Fr_L = \frac{u^2}{L \cdot g}$
Igualdad de la relación de densidad	$\frac{\rho_0}{\rho_a}$
Igualdad de la relación de velocidades	$\frac{w_0}{u_{ho}}$
Igualdad del número de Reynolds:	$Re = \frac{\rho \cdot \omega \cdot D}{\mu}$

Semejanza geométrica de la fuente: se cumple si todas las dimensiones tienen la misma escala lineal entre el modelo y el prototipo. Puntos homólogos son puntos que tienen la misma ubicación relativa. Los ángulos se conservan y las direcciones del flujo se conservan, esto implica que la orientación del modelo y el prototipo respecto del flujo son idénticos.

Igualdad del número de Froude: relación de la fuerza de inercia a la fuerza de gravedad. Si existe una superficie libre, tal como en el caso de los ríos, la forma de esta superficie, al formarse ondas, se verá afectada directamente por la fuerza de gravedad, y, por tanto, en este tipo de problema el número de Froude será significativo.

Igualdad de la relación de densidad: debe guardar una relación entre la densidad del aire ρ_a y la densidad de emisión ρ_0 .

Igualdad de la relación de velocidades: u_{ho} es la velocidad del flujo atmosférico y w_0 es la velocidad de salida de la emisión.

El número de Reynolds: es un número adimensional que permite inferir sobre el comportamiento de flujos. Como resultado del análisis dimensional, puede prescindirse de los requisitos para la semejanza dinámica entre los flujos bajo estudio, con tal que se mantengan iguales, únicamente, los números de Reynolds. También se destaca, que cuando el número de Reynolds (característico de un fluido en movimiento)



excede cierto valor crítico, el escurrimiento se torna turbulento. Donde ρ representa la densidad, ω es la velocidad, D diámetro y μ es el coeficiente de viscosidad dinámica.

2.2. Flujo Turbulento

No existe una definición precisa de la turbulencia, no obstante, hay una serie de particularidades que permiten caracterizarla [15].

Irregularidad: es un fenómeno que se puede tomar como aleatorio y el método utilizado para su análisis requiere herramientas estadísticas [16].

Difusividad: origina mezcla rápida e incremento de la cantidad de movimiento, calor y transferencia de masa [17].

Altos números de Reynolds: cuando el número de Reynolds se incrementa, los escurrimientos laminares se inestabilizan y se vuelven turbulentos.

Tridimensionalidad de la Vorticidad: la turbulencia es rotacional y tridimensional. La vorticidad que caracteriza a la turbulencia, no puede mantenerse si las fluctuaciones de velocidad fueran bidimensionales [18].

Disipación: las tensiones de corte incrementan la energía interna del fluido a expensas de una pérdida de energía cinética de la turbulencia.

Continuo: la turbulencia es un fenómeno del medio continuo. La menor escala de la turbulencia es bastante mayor que la escala molecular.

Es una Propiedad de los Escurrimientos: la turbulencia no es una propiedad del fluido.

Es preciso señalar que dentro de la comunidad científica existen dos puntos de vistas diferentes, respecto al estudio de la turbulencia. El primero es estadístico y utiliza cantidades promediadas para modelar el problema. El otro grupo, considera a la turbulencia desde un punto de vista puramente determinístico, estudiando el comportamiento

de sistemas dinámicos o la estabilidad de escurrimientos en distintas situaciones.

Intensidad de Turbulencia: el primer parámetro a considerar para definir la intensidad de turbulencia es el valor promedio temporal de la función velocidad. Dada la tridimensionalidad del fenómeno, existen tres componentes para la velocidad expresadas como: u , v y w (indicando las componentes de las fluctuaciones en las tres direcciones espaciales x , y , z). La velocidad media se puede expresar de la siguiente manera:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (1)$$

Del mismo modo, el valor cuadrático medio de las fluctuaciones de velocidad se lo puede definir de la siguiente manera:

$$\sigma_u^2 = \overline{u^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt \quad (2)$$

Donde $u(t)$ es la fluctuación de velocidad, definida por $u(t) = U(t) - \bar{u}$. La desviación estándar, que para el caso de fluctuaciones en torno de la media, coincide con el valor RMS (raíz media cuadrática) se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sigma_u^2 = \sqrt{\overline{u^2(t)}} \quad (3)$$

Dado que el fenómeno de la turbulencia es tridimensional, existen tres componentes para la desviación estándar: σ_u , σ_v y σ_w . Conceptualmente, la intensidad de la turbulencia es una forma de medir adimensionalmente la energía de las fluctuaciones de la velocidad, y se define por la razón de la desviación estándar y una velocidad de referencia. El resultado de la intensidad de turbulencia depende del valor de referencia que se utiliza y puede ser local o normalizada.



Intensidad Local de Turbulencia: cuando se adimensionaliza con la velocidad media a la altura de la medición y se lo puede expresar de la siguiente manera:

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\overline{U}(z)} \quad (4)$$

Intensidad Normalizada de Turbulencia: cuando se adimensionaliza con la velocidad media a la altura gradiente o con la velocidad de cizallamiento.

$$I_{gi}(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\overline{U}(z_g)} \quad (5)$$

El subíndice indica las tres componentes mencionadas anteriormente.

2.3. Trazas Atmosféricas y Contaminantes

La atmósfera es un envoltorio gaseoso que rodea al planeta, tiene un espesor no más del 3 % del diámetro de la tierra. Nuestra atmósfera está constituida por nitrógeno y oxígeno en proporciones de alrededor de 78 % y 21 % en volumen, respectivamente. El resto está formado por argón, dióxido de carbono y otros elementos que por sus ínfimas cantidades se denominan trazas atmosféricas. Son estas trazas atmosféricas, junto al oxígeno y al abundante dióxido de carbono, las que definen las propiedades químicas de nuestra atmósfera y permiten la interconexión de los sistemas bióticos, propiciando las condiciones para la vida.

La composición de la atmósfera se ha visto fuerte y rápidamente alterada por las actividades humanas en los últimos dos siglos, teniendo ello consecuencias sobre la calidad de los ecosistemas en general y el sistema climático.

Las trazas presentes en la atmósfera en concentraciones que varían en el tiempo y el espacio tienen vidas medias cortas. Por el contrario aquellas de vidas medias largas se mezclan homogéneamente en toda la atmósfera. En la Figura 1, se muestran las escalas de tiempo y espacio características para distintas trazas atmosféricas. Las concentraciones de oxígeno, que tiene un tiempo de recambio de varios millones de años, varían muy poco de un lugar a otro, comparadas con las del amoníaco que tiene un tiempo de recambio de unos pocos días y se caracteriza por tener concentraciones que varían según las condiciones del lugar.

Las trazas atmosféricas actúan e interactúan en un gran número de transformaciones, tales como la precipitación, la condensación del agua y la formación de nubes, hasta la aparición de enfermedades respiratorias.

El aumento de la concentración en la tropósfera de algunas trazas atmosféricas en algunas localidades y regiones del planeta, especialmente en las áreas urbanas y los efectos en la salud de la población que se ve expuesta a ellas y otros efectos sobre el medio ambiente, han llevado a los gobiernos a regular algunas trazas atmosféricas.

Se suele denominar contaminantes criterio, al conjunto de trazas constituido por dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, monóxido de carbono y los CFC. Es

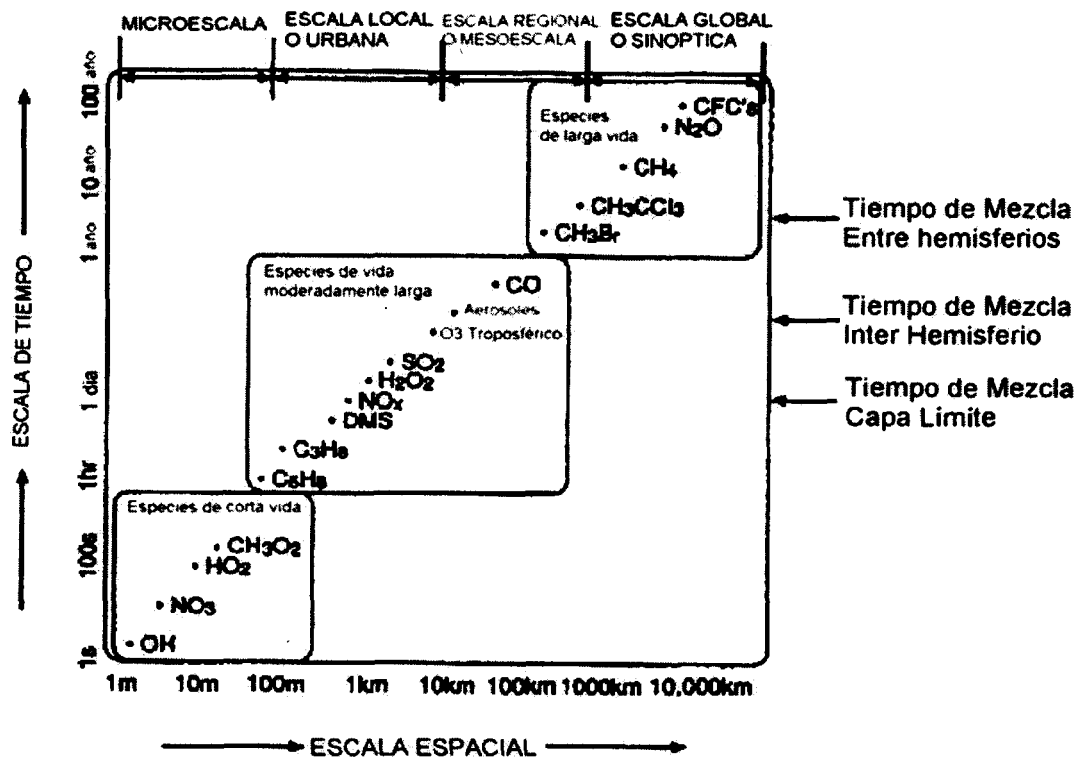


Figura 1: Trazas Atmosféricas [19].

importante considerar que no son los únicos contaminantes, pero sí son aquéllos a los que internacionalmente la gestión ambiental ha dado mayor atención, regulando las concentraciones máximas permisibles en la atmósfera para cada uno de ellos.

El término de trazas, nos introduce al concepto de contaminantes y el fenómeno de dispersión de la columna de humo se conecta con las características químicas y sus influencias en las propiedades de la pluma².

En ese sentido la utilización de un agente contaminante del tipo inerte y no tóxico denominado glicerina líquida [20] se ajusta satisfactoriamente para el trabajo experimental.

²Nurul Izma Binti Mohammed *Development of Air Quality Profile by Using Gaussian Plume Dispersion Model, University Teknologi Malaysia*

2.4. El Modelado

El modelado es una herramienta habitual de diversas disciplinas, que busca explicar o reproducir fenómenos de diferente naturaleza. Por ejemplo, la modelación matemática es una metodología sistemática de comprobado éxito en el entendimiento de los procesos, como así también, las causas subyacentes en la naturaleza, basada sobre sus partes observables y como se relacionan entre ellas. En el área manufacturero, por ejemplo, el modelado se utiliza para determinar los programas de producción, analizar los inventarios y supervisar procedimientos de mantenimiento, para mejorar la planificación, expandir la capacidad, requerimientos de recursos, procesos etc.

La modelación de procesos ambientales y el transporte de contaminantes, es habitual en grupos científicos de la actualidad. La variedad de problemas ambientales que se pueden abordar mediante modelos es muy elevada³. Existen modelos diseñados o sistemas de programas para casi cada área que se puedan estudiar, desde lo referente al tratamiento de aguas residuales, la optimización de vía férrea, transporte de residuos sólidos, la identificación y justificación de localización óptima en el vertido de aguas residuales o propuestas de mejoras para la calidad del aire en lugares públicos.

El modelado permite calcular los resultados con anterioridad o predecir lo que podría ocurrir a un sistema, a partir de un conjunto de datos iniciales, así, se puede modelar un proceso de dispersión, donde se descargan a la atmósfera gases contaminantes a través de una chimenea⁴. Los datos de partida serán la altura de la chimenea, la tasa de emisión del contaminante, las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno, etc. Mientras que los resultados esperados serán los niveles de concentración del contaminante a una determinada distancia de la fuente o las tasas de deposición del contaminante sobre el terreno.

³Salas C. *Aplicaciones de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación del Impacto Ambiental: Análisis del Proceso. Cap.1.*

⁴Liren Y. Almeida I.(2005) *RAM 1.0 Software for Gaussian Plume Multiple Source Air Quality Simulation. American Journal of Applied Sciences 2(2):533-538.*

El nivel de sofisticación puede variar enormemente entre las diversas implementaciones de los modelos, no obstante, la complejidad del modelo depende en general del nivel de comprensión y entendimiento del sistema en sí. En el extremo más sofisticado se encuentra la solución numérica completa de las ecuaciones que describen en su totalidad al fenómeno físico, utilizando herramientas matemáticas, tales como el elemento finito y método numérico⁵.

Muchos de los problemas se resuelven analíticamente para condiciones en régimen estacionario, pero en realidad, la mayoría de los problemas presentan condiciones que cambian con el tiempo o simplemente no tienen soluciones analíticas, debiendo ser resueltas numéricamente.

El modelado es una metodología sistemática y sigue o se ajusta a un conjunto de reglas o principios relacionados y enlazados entre sí. El análisis y definición del problema para efectos de modelado difiere poco del utilizado en cualquier otra herramienta de análisis. Especialmente, implica estudiar los procesos físicos, químicos, biológicos, o de otra índole, identificar los procesos que son esenciales y dominantes, reconocer el problema, especificar los objetivos de la modelación e identificar las variables del sistema en estudio que son o no controlables.

El primer paso de la construcción o selección de un modelo es determinar que propiedades del sistema real permanecen fijas (parámetros) y cuáles pueden variar durante todo el funcionamiento del modelo (variables), para deducir, desarrollar o seleccionar una expresión matemática que describa el sistema o modelo. Esta expresión puede ser tan sencilla como una simple expresión algebraica, una ecuación diferencial compleja o un conjunto de ecuaciones diferenciales y expresiones algebraicas.

Luego de construir o seleccionar el modelo, es necesario especificar los valores que tomarán las variables y parámetros durante el proceso de la modelación; las variables que intervienen deben reflejar en la mejor forma posible el estado del sistema.

La ejecución del modelo propiamente como tal, consiste en resolver analítica o

⁵Cameron B. et al.(2006)*An Analysis of Exhaust Emissions from a Large Ship Docked in Humboldt Bay. Cap 2.p.5.*

numéricamente las ecuaciones y obtener los resultados del proceso estudiado. Las conclusiones que pueden extraerse de una modelación dependen, del grado en el cual el modelo refleja al sistema real, pero también dependen del diseño del modelo en un sentido estadístico y las hipótesis simplificativas que intervienen en el proceso estudiado.

En la mayoría de las situaciones, el analista tiene información disponible para comparar los resultados de la modelación con datos del sistema real, datos del desempeño de sistemas similares y el conocimiento propio del experto sobre la operación del proceso real.

Sin embargo, la información obtenida de estas fuentes probablemente no es suficiente para validar las conclusiones derivadas de la simulación. Así pues, la validación de una simulación es su desempeño en el sistema real, sea después de los resultados del estudio que se hayan puesto en ejecución.

La validación se refiere al hecho de probar el modelo para garantizar que la simulación esté correcta. Específicamente, se trata de verificar si el modelo representa al sistema real de manera adecuada. Durante el desarrollo del modelo pueden surgir errores en cualquiera de las etapas de la modelación.

El modelo puede funcionar o fallar en la producción de resultados correctos. Con base en los resultados, puede realizarse un nuevo intento de modelado. Puede cambiar los parámetros, ajustar variables, las normas de decisión, las condiciones iniciales y la duración del funcionamiento. Se puede reproducir el proceso con niveles de emisión de contaminantes diferentes para ver qué cambios se produce. El análisis de sensibilidad del modelo, al realizarse de manera sistemática, permite la elección de parámetros y ajustar los resultados a un conjunto de observaciones.

Finalmente, el hecho de ensayar duraciones del fenómeno diferentes, constituye un nuevo experimento en lugar de ser una reproducción de un experimento previo que depende de los tipos de eventos que ocurren en la operación del sistema con el tiempo. En este trabajo se utiliza el modelo de Gauss de dispersión, que describe satisfactoriamente el proceso de dispersión de contaminantes de un flujo turbulento bajo

ciertas condiciones, que simplifican el comportamiento de la pluma de emisión.

2.5. Tipos de Modelos

Los modelos de dispersión facilitan el estudio del fenómeno de dispersión y en este sentido las herramientas computacionales permiten complementar y mejorar el proceso de análisis mediante la utilización de diversos métodos numéricos. Se han desarrollado varios tipos de modelos matemáticos para estimar la calidad del aire, caudal volumétrico de contaminante y velocidad del viento. Entre estos se incluyen, modelos Gaussianos, Urbanos, Regionales y Globales, que se describen a continuación.

Modelos Gaussianos: los modelos Gaussianos son de uso común en problemas de dispersión de contaminantes no reactivos de fuentes puntuales tales como chimeneas industriales. Suponen al penacho de un efluente como una distribución normal o de Gauss y la simetría de las concentraciones en torno al eje en la dirección del viento. Son aptos para estimar efectos locales, y su grado de precisión es, en general, decreciente en tanto se aplique en localidades con relieves complejos y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas.

Modelos Urbanos y Regionales: los modelos de escala urbana y regional son a menudo, orientados a ser herramientas de gestión de calidad del aire. Los problemas de escala urbana y regional son complejos y hay que considerar los efectos de múltiples fuentes, contaminantes primarios y secundarios, procesos de deposición y meteorología local y regional. Los aspectos meteorológicos son tratados a través de modelos meteorológicos denominados de diagnóstico o de pronóstico.

En los primeros, se estiman los campos de viento a partir de datos meteorológicos (de superficie y altura) recopilados de estaciones de monitoreo utilizando métodos que buscan una interpolación y extrapolación óptima de las observaciones.

En los segundos, se calculan los parámetros meteorológicos a partir de las ecuaciones que describen las relaciones físicas fundamentales del movimiento y la energía en el aire.

Los esfuerzos de modelación de procesos atmosféricos tienden a integrar ambos tipos de modelos a través de las técnicas conocidas como asimilación de datos. Un problema común de los centros urbanos es la acumulación de precursores de oxidantes, por ejemplo ozono, y de material precipitados. Existe una amplia gama de modelos fotoquímicos comparables en cuanto a sus capacidades de reproducir estas observaciones.

Modelos Globales: los modelos globales resuelven la ecuación de continuidad para toda la atmósfera. Estos modelos, al igual que los modelos locales y regionales, han evolucionado en complejidad en la medida que más variables y trazas con tiempos de recambio más cortos han sido incorporadas en ellos y el desarrollo de computadores más rápidos lo han hecho factible.

2.6. Modelo Gaussiano de Dispersión

El modelo se describe a través de una fórmula simple mediante el campo tridimensional de concentraciones generado por una fuente puntual en condiciones meteorológicas y de emisión estacionaria (ver Figura 2).

A medida que un penacho progresa en la dirección del viento, el modelo Gaussiano supone que el perfil de concentración por mezcla turbulenta adquiere una distribución Gaussiana. Si la condición atmosférica es neutra, entonces se desarrollará un penacho en forma de cono. La concentración en la línea central del penacho será máxima a una distancia cercana del foco emisor y disminuirá en la dirección viento abajo.

A medida que la distancia viento abajo aumenta, los extremos del penacho pueden impactar sobre el terreno.

La concentración de un contaminante en cualquier punto se expresa como:

$$C(x, y, z) \propto \frac{1}{U} Q G \quad (6)$$

Donde, U es velocidad del viento, Q es la tasa de emisión y G es la curva de Gauss normalizada en el plano, esto es, el plano perpendicular a la dirección del viento.

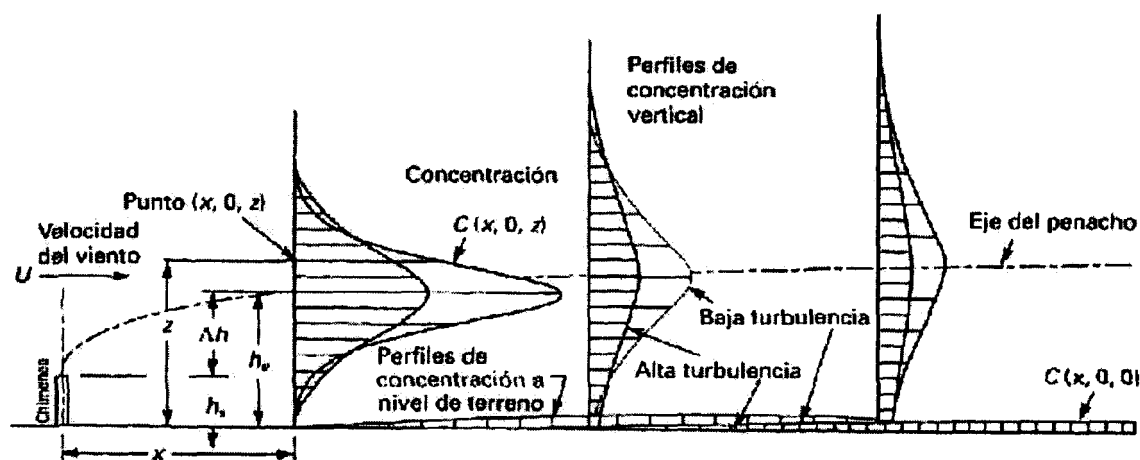


Figura 2: Modelo Gaussiano de Dispersión [19].

to, x.

La altura central en el eje de ordenadas se denomina media y el ancho de la curva se describe como desviación estándar. La distribución de Gauss en la dirección laterales, se describe por la expresión:

$$G_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (7)$$

$$G_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \quad (8)$$

A medida que la distancia viento abajo se incrementa, la concentración máxima en la línea central disminuye ya que la pluma se ensancha en las direcciones z e y . En la Figura 3 es un gráfica (a) de la evolución de la pluma en tiempos diferentes. En cualquier instante, el penacho presenta un contorno serpenteante. A los 10 minutos o 1 hora, el contorno se extiende y la concentración de la línea central disminuye, tal y como se muestra en la gráfica (b).

Describir la pluma Gaussiana que es transportada en la dirección positiva del eje x mediante una ecuación que utiliza parámetros meteorológicos fácil de determinar, resulta relativamente simple.

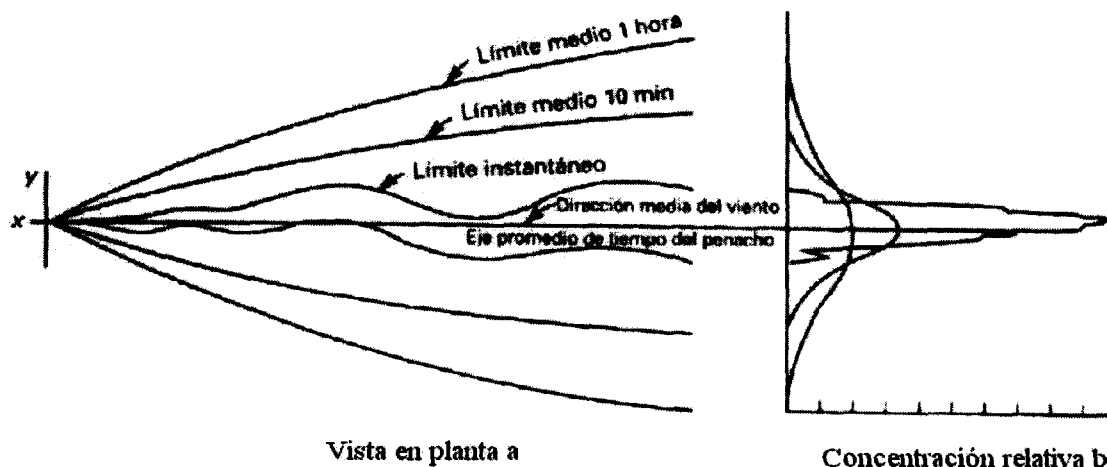


Figura 3: Vista en Planta y Concentración Relativa [19].

Por otra parte, gracias al nivel determinante que esta metodología tiene en la toma de decisiones, ha estimulado el desarrollo de investigaciones con el propósito de eliminar algunas de las limitaciones del modelo Gaussiano en el tratamiento de las situaciones complejas que se presentan en el mundo real. Se puede observar en la Figura 4, donde se ejemplifica la distribución instantánea de concentraciones y promedios horarios. Los valores de σ_y y σ_z están medidos en metros, considerando las curvas de Pasquill -Gifford y el modo rural en este trabajo.

Para obtener σ_y se utiliza la fórmula:

$$\sigma_y = 455,11628[x(\tan(TH))] \quad (9)$$

donde:

$$TH = 0,017453293[c - d(\ln(x))] \quad (10)$$

La variable σ_y se puede expresar como:

$$\sigma_z = ax^b \quad (11)$$

Los coeficientes pueden ser obtenidos a partir de tablas⁶. En la Figura 5 se representa la gráfica $\sigma_z(x)$, donde x esta expresado en kilómetros y σ_z en metros. La

⁶Parámetros de dispersión para una fuente puntual. Modelos de difusión atmosférica. www.estrucplan.com.ar

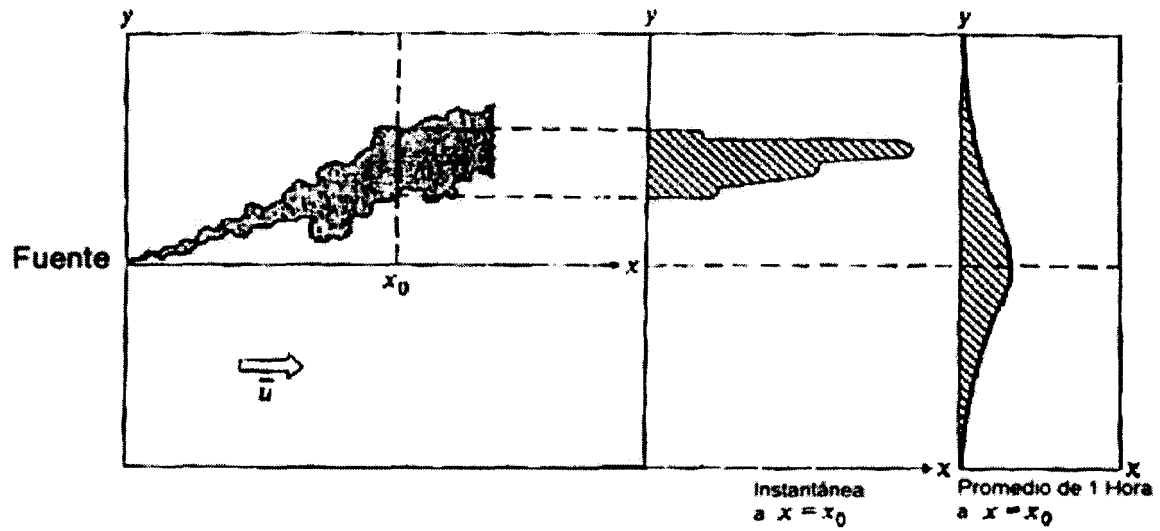


Figura 4: Distribución Instantánea de Concentraciones y Promedios Horarios [19].

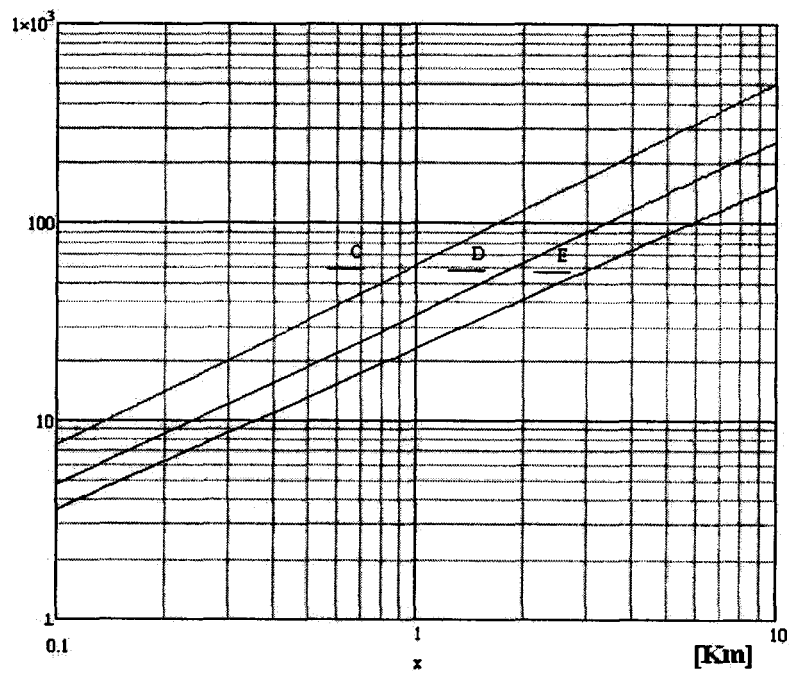


Figura 5: Gráfica de $\sigma_z(x)$.

curva C representa inestabilidad suave, la curva D se refiere a estabilidad neutra y la E hace referencia a la estabilidad suave. El modelo de Gauss fue perfeccionándose continuamente, con la finalidad de obtener mayor exactitud en la descripción en dispersión del contaminante pero nada nos dice sobre los procesos físicos y químicos que intervienen para que dicho fenómeno de dispersión se propague de determinada forma y no de otra. A partir de estas consideraciones nace el concepto de modelo de dispersión simplificado.

2.7. Modelos de Difusión Simplificado

En la literatura sobre la contaminación de aire, esta clase de modelo suele llamarse modelos de difusión [21]. En el ambiente de los ingenieros se lo denominan modelos de dispersión, por reservar la palabra difusión a los fenómenos de difusión molecular. El esquema puede ser representado en la siguiente Figura 6.

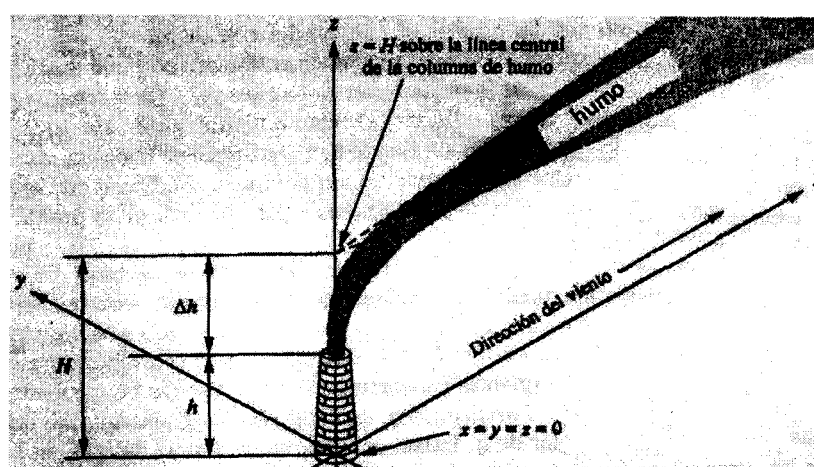


Figura 6: Esquema del Modelos de Difusión Simplificado [21].

Se desprende que el origen de coordenadas se coloca en la base de la chimenea, con el eje x alineado en la dirección del viento. La corriente de gas contaminado o pluma, se observa de la figura una elevación en el eje z, que luego se nivela para viajar en la dirección x, dispersándose en la dirección y y z, a medida que se desplaza.

Lo normal es que la pluma se eleve una distancia por encima de la columna, por ser emitida a temperaturas más elevadas de la atmósfera y con una velocidad vertical. Como primera hipótesis de cálculo, se supone que la columna de humo se emite desde un punto de coordenadas $P(0,0,H)$, donde H es la altura efectiva de la chimenea, la cual es la suma de la altura física de la chimenea (h y Δh en la figura).

La segunda hipótesis supone una fuente puntual ubicada en la coordenadas $P(0,0,H)$.

La tercera hipótesis asume la existencia de un caudal Q (g/seg) en forma estacionaria.

La cuarta hipótesis ubica al viento en la dirección x a una velocidad u que es independiente del tiempo, lugar y elevación.

De esta manera el cálculo de la concentración debida a esa fuente en cualquier punto $P(x,y,z)$ se obtiene a partir de la ecuación (7) en la dirección z o (8) en la dirección y .

Si la difusión fuese causada únicamente en la mezcla de la columna de humo con el aire circulante, esa columna se dispersaría con lentitud y se vería como una veta que se mueva derecho hacia el cielo. La causa real de la dispersión de la columna de humo es el mezclado turbulento a gran escala que existe en la atmósfera, el cual se puede observar al comparar una imagen instantánea de una columna con una exposición de tiempo de la misma⁷. Se puede expresar lo expuesto en la Figura 7.

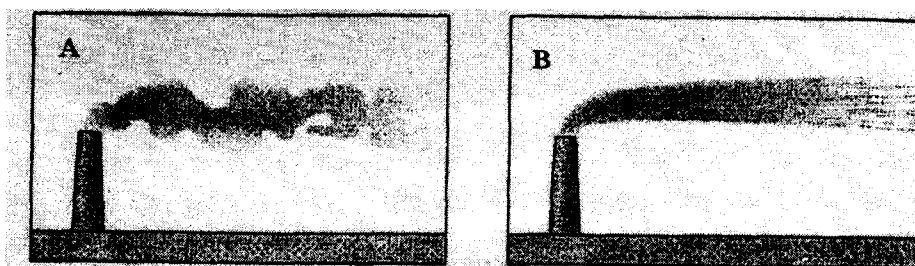


Figura 7: Imagen Instantánea(A), Imagen Promediada (B) [21].

En cualquier foto instantánea, la columna tiene una forma compleja semejante a una serpiente, a medida que se desplaza. El comportamiento de las fluctuaciones es causado por el movimiento turbulento de la atmósfera que se superpone al movimiento lineal a gran escala de la columna de humo causado por el viento horizontal. Este

⁷Wark, Kenneth & Ceil F. Warner.(1994). *Contaminación del aire. Origen y Control*. México: Editorial Limusa.Cap 6. p.124

movimiento turbulento puede considerarse de naturaleza aleatoria, de modo que una foto instantánea, tomada unos cuadros más tarde, demostraría fluctuaciones en lugares diferentes, pero la forma global sería similar. El tiempo promedio de estas variaciones son muy cortos, por eso, en una exposición prolongada en el tiempo aparece en forma uniforme y simétrica. De esta manera, una quinta hipótesis enfoca a estudiar la columna de humo Gaussiana, sólo con valores promedios, sin hacer alguna afirmación acerca de los valores instantáneos.

Si se coloca un medidor de concentración de contaminante en algún punto fijo de la pluma, se vería que la concentración oscilaría en una forma regular en torno a algún valor promedio. El enfoque de la columna de humo Gaussiana trata de calcular sólo ese valor promedio, sin hacer alguna afirmación acerca de los valores instantáneos, conectando de esta manera la turbulencia y el proceso de dispersión. Los resultados obtenidos por los cálculos de la columna de humo Gaussiana deben considerarse sólo como promedio durante períodos de por lo menos 10 minutos y, preferentemente 1 hora.

2.8. Consideraciones del Modelo de Difusión Simplificado

Cuando la concentración instantánea de una pluma sea completamente irregular, su promedio en tiempos suficientemente largos (por ejemplo, una hora) genera, en la mayoría de los casos, distribuciones de concentración acampanadas que pueden bien ser aproximadas a una distribución Gaussiana, tanto en la dirección horizontal como en la vertical. En el caso planteado se utiliza las letras griegas σ porque aparece en las fórmulas estadísticas en las que se aplica la distribución Gaussiana. De este modo, las σ hacen que en este contexto las fórmulas se miren igual. No hay conexión teórica entre las dos, y con igual propiedad pudo usarse algún otro símbolo. Pero los σ se usan en toda la literatura sobre contaminación del aire⁸. Los valores están basados

⁸Wark, Kenneth & Ceil F. Warner.(1994). *Contaminación del aire. Origen y Control. México: Editorial Limusa. Cap 6. p.130.*

en datos experimentales y se pueden determinar mediante gráficas, por ejemplo las curvas de Pasquill-Gifford-Turner⁹.

Un área que ha recibido particular énfasis en su estudio es la identificación de los parámetros que requieren las ecuaciones (7) y (8) para dar una buena estimación de la concentración máxima a nivel del suelo. Como se mencionó, el modelo Gaussiano se encuentra lejos de ser exacto. Sin embargo, se han incorporado a su ecuación general algunos términos adicionales para mejorar su desempeño frente a determinadas situaciones.

Es conveniente destacar la incorporación de términos para simular la reflexión que puede sufrir un penacho, ya sea total o parcial debido a su interacción con el suelo subyacente o cuando su desarrollo en altura se encuentra limitado por una capa de inversión térmica. También se han incorporado términos de decaimiento, deposición y transformaciones químicas, para simular procesos de remoción de los contaminantes desde la atmósfera, tratamiento de fuentes lineales, área o volumen, efectos de fumigación de un penacho sobre el suelo, efectos de edificaciones, penachos que ven limitado su desarrollo al ser atrapados al interior de un valle, penachos inclinados, terreno complejo y dispersión en zonas costeras¹⁰. No obstante, estos ajustes no son suficientes para representar todos los procesos y deben ser utilizados cuidadosamente, sobre todo, se debe tener en cuenta los requisitos del modelo elegido y su categoría asociada.

Resulta razonable suponer que depende de la velocidad del viento, el grado de turbulencia, tipo de contaminante entre otros factores. En la práctica, los modelos a escala natural disponen de unas series de gráficas donde se expresan los coeficientes de dispersión $\log \sigma$ versus $\log x$ Hendersor[16], permitiendo comparar resultados obtenidos entre el modelo en el canal de viento y el modelo natural (respetando la relación de escala).

⁹Henderson B. An analytical representation for the Pasquill Gifford Turner σ_z curves for elevated sources. *Atmósfera* (1989),p.111-124.

¹⁰<http://www.weblakes.com/AUSTAL/3DViz1.html>

2.9. Requisitos del Modelo de Dispersión del Tipo Gaussiano

Los requisitos de los modelos de dispersión de tipo Gaussiano entran en tres categorías:

Datos de la fuente: ubicación de chimeneas y otras fuentes (coordenadas), altura física de la chimenea y su diámetro interno, velocidad de salida del gas desde la chimenea, temperatura y tasa de emisión del contaminante. Este último normalmente se expresa en valores promedio temporales (por 1 hora, 24 horas o 1 año).

Algunos modelos de dispersión pueden requerir datos de entrada adicionales, tales como: la elevación de la fuente y el terreno, dimensiones de edificaciones próximas (por ejemplo, el ancho promedio del edificio y el espacio entre los edificios), distribución del tamaño de la partícula y sus correspondientes tasas de deposición y coeficientes de reflexión superficial.

Datos Meteorológicos: la mayoría de los modelos Gaussianos acepta datos meteorológicos de superficie que consideran la clasificación de estabilidad a cada hora, dirección y rapidez del viento, la temperatura atmosférica y la altura de la capa de mezcla. Es deseable que, como mínimo, se disponga de un año de datos meteorológicos.

Sin embargo, en los casos dónde algunos datos de largo plazo están disponibles sólo para la región (típicamente, lecturas tomadas en un aeropuerto), las observaciones locales para el sitio bajo examen pueden ser obtenidas a partir de éstas, previa revisión de los datos de largo plazo obtenidos en la región.

Datos de los Receptores: la identificación y codificación de todos los receptores (por ejemplo, áreas con alta población o concentración máxima esperada a nivel del suelo). Normalmente, los receptores son especificados por sus coordenadas y elevación.

3. Fundamentos de la Edición de Video

Para entender la formación de la imagen se debe hablar del fenómeno fotoemisor y del fenómeno fotoconductor [22].

El fenómeno fotoemisor ocurre cuando algunos materiales al recibir la luz, generan pequeñas cantidades de electricidad. La electricidad que se produce es proporcional a la cantidad de luz que se recibe. Si una imagen posee distintas luminosidades al ser proyectada sobre una capa de material fotoemisor genera tensiones eléctricas distintas en cada área.

En el caso de fenómeno de fotoconductor, la luz puede modificar la resistencia eléctrica del material.

Estos dos fenómenos son los encargados de convertir la luz en electricidad y para ello se utiliza una placa de material fotoemisor o fotoconductor sobre la cual se enfoca la imagen.

La imagen irá generando distintas variaciones de corriente eléctrica según la cantidad de luz que contenga en sus distintos puntos. Esta variación de corriente constituye la señal de video. En el caso de las imágenes fotográficas se parte de pigmentos para lograr el color, pero en la imagen electrónica se parte de luces coloreadas y se utilizan los colores rojos, verdes y azules. Luego se mezclan distintas proporciones de dichos colores para obtener distintos matices de un mismo color y lograr una gama infinita de tonos [23].

Los colores rojo, verde y azul forman la señal RGB (red, green, blue), que es la encargada de llevar la información de color en el video. La señal del color viaja en tres canales diferentes y la señal monocromática de video solo necesita un canal. Este inconveniente no permitía compatibilizar las TV a color con la TV blanco y negro.

Nace la necesidad de un formato de video y se crean diferentes normas de televisión NTSC (National Television System Committee) y PAL (Phase Alternating Line). Ambas normas coinciden en un punto: descodifican la señal RGB en dos señales diferentes denominadas crominancia C, encargada de llevar la información del color, y



luminancia Y encargada de llevar la información de brillo, luego la imagen se forma en el monitor de la pantalla mediante un haz de electrones de arriba abajo y de izquierda a derecha. El barrido esta controlado por una serie de pulsos de sincronismo.

La sucesión de puntos que se ilumina se denomina línea de barrido horizontal. Por cada línea que se completa, se crea un punto de sincronismo horizontal que indica el fin del cuadro.

Cada sistema recorre una cierta cantidad de líneas de barrido en dos pasos, primero los pares y luego los impares. Se obtiene dos semi-imágenes que se denominan campos que solapados entre si forman un cuadro o fotograma.

Sistema NTSC posee 525 líneas, utiliza 30 fotogramas por segundo y 60 campos. El sistema PAL utiliza 625 líneas, una cantidad de 25 fotogramas por segundo y 50 campos¹¹.

3.1. Dispositivo Capturador de Imagen

La invención de los dispositivos de acoplamiento de carga (CCD, Charge Coupled Devices) fue anunciado por el Laboratorio Bell en 1970. Un CCD consiste en una serie de condensadores MOS (también conocido como complimentary metal oxide semiconductor) monolíticos muy próximos donde se transfiere una señal analógica en forma de carga o paquete, de un condensador a otro, a modo de registro de desplazamiento analógico.

La carga se almacena y transfiere entre pozos de potenciales entre la interfase entre silicio y óxido de silicio. Los pozos los forman condensadores MOS, se deposita una serie de electrodos metálicos sobre el oxido de silicio, conectado a una señal de reloj polifásica. Las cargas transferidas son electrones o agujeros respectivamente, en dispositivos de canal n y de canal p. Dichas cargas pueden ser inducidas eléctricamente u ópticamente, de esta manera el CCD es un sensor óptico.

¹¹ http://www.axis.com.productts/video/about_networkvideo/resolution

Los CCD se clasifican en lineales y matriciales¹² (ver Figura 8). En los CCD

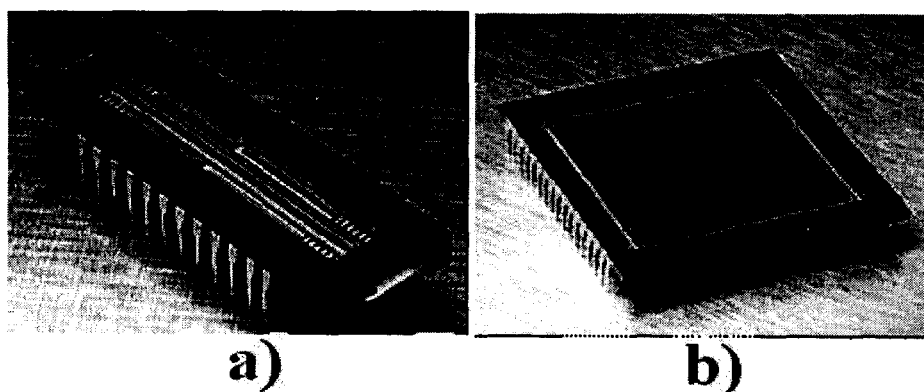


Figura 8: Sensor CCD de Barrido de Línea(a), Sensor CCD de Área o Matricial(b).

lineales el barrido de las líneas es de forma lineal. Cada línea del CCD, se transfiere a una memoria temporal externa para su procesamiento digital de imagen. Un ejemplo práctico, son los scanner de página completa.

Los matriciales los píxeles del CCD se transfieren a una matriz o memoria temporal, luego un chip DSP (Digital Señal Procesamiento) transfiere la información a una pantalla para su visualización en pantalla. Posteriormente se utiliza la edición o montaje es el proceso de seleccionar, ordenar, cortar y empalmar imágenes, dándoles un sentido a las secuencias de fotogramas. La toma permite obtener la mínima unidad narrativa y es el registro de una acción sin ningún corte. Una toma es la cantidad de veces que se registra un mismo plano que se combina con otra y permite construir un relato. El tiempo de una toma depende de la duración de la acción que en ella se desarrolla.

Todo lo expuesto se tiene que acompañar con una escena, y se la define como un conjunto de tomas con una acción que se presenta en un mismo tiempo y espacio. En ese sentido, el corte es la separación que existe entre una toma y la otra.

Toda toma tiene un comienzo y un final, que esta determinada por el corte. El

¹²González, R. & Woods, R.(1992). *Tratamiento Digital de Imágenes*. Editorial Addison Wesley / Diaz de Santo. Cap 1.p.14.

plano compone una imagen, es la perspectiva de los personajes y elementos tal como los capta la cámara. Se destaca por su tamaño, angulaciones y alturas. Por último, el archivo AVI es el más utilizado para digitalización de video y significa audio y video intercalado.

Este formato se considera como un contenedor, ya que almacena flujos de datos de audio y video, y éstos pueden estar en cualquier formato, como por ejemplo los archivos con extensión MPEG. El nombre mpeg proviene de Moving Picture Experts Groups y es la denominación de un estándar para comprimir tanto video como audio. Según su calidad existen cuatro tipos de mpeg: mpeg1, mpeg2, mpeg3, mpeg4.

El mpeg1 se creo en 1991 para introducir videos en los CD-ROM. La velocidad de transferencia es aproximadamente 1.5 Mbit/s, los fotogramas tienen una dimensión de 320x240 y su calidad es similar al VHS. Posteriormente el mpeg2 se creo en 1994 para ofrecer mayor calidad con mayor ancho de banda (transferencia de datos es de 3 a 10 Mbit/s). En esa banda, proporciona 720x486 píxeles de resolución, equivalente a la calidad de TV.

Con el formato mpeg2 se puede crear un supervideo CD, y con tasa de transferencia más alta, un DVD. El formato mpeg3 fue propuesto para alta definición para los dispositivos tales como TV o HDTV (no es altamente utilizado debido a que el formato mpeg2 tiene mayor ancho de banda y cumple mejor ese objetivo).

El formato mpeg4 se creado para alcanzar una calidad similar al mpeg2, pero con mucho menor ancho de banda, éste formato dio vida a DivX y se basa en un formato de compresión mpeg4 y se utiliza para aplicaciones multimedia y para transferencia de videos por Internet. Pueden ser reproducidos en computadoras como en otros reproductores como por ejemplos los DVD. En ese sentido, el codec es un software utilizado para realizar la compresión y decodificación de video y audio. Su nombre es la abreviatura de codificador decodificador, y sus funciones son la de comprimir y codificar un archivo para reducir su tamaño, y la de descomprimirlo y decodificarlo para realizar su reproducción.



El avi es un contenedor de flujo de datos de video y audio, que necesita un sistema denominado codec (codificador/decodificador) para su interpretación. Cuando un archivo se abre con un reproductor u otro programa, es necesario enviarlo a un decodificador adecuado para que realice el proceso necesario de descompresión. Un ejemplo puede ser el reproductor de Windows Media o el WIN AVIvideo.

El primer fragmento de información del archivo avi se denomina cabecera y describe las características del video, como por ejemplo la velocidad y dimensiones de los fotogramas. La segunda parte, contiene los flujos de audio e imágenes.

El WIN AVIvideo (o similar) descompone el archivo avi en sucesivos fotogramas y un paquete encargado de realizar procesamiento digital de imagen se encarga de las tareas de extracción de la información en las imágenes.

4. Procesamiento Digital de Imagen

4.1. Representación de una Imagen Digital

El término imagen se refiere a una función bidimensional de la luz y de la intensidad, a la que indicamos por $f(x, y)$, donde la amplitud de f en la posición x e y definen la iluminación de la imagen en esa posición. Se entiende que la luz es una forma de energía y de este modo la función f se tiene que encontrar entre $0 < f(x, y) < \infty$ [26]. Las imágenes que se perciben en las actividades visuales provienen de la luz reflectada por objetos. Se caracteriza f por dos componentes $f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$ donde i es la iluminación y r la reflectancia. La función i depende de la fuente de luz y r por las características del objeto.

La intensidad de una imagen monocromática se denomina nivel de gris. Para procesar la información contenida en el la columna de humo es necesario establecer relaciones entre las intensidades de grises de la pluma y su concentración. Para ello, el utilitario elegido debe tener acceso a la información de la tabla de colores, dimensión y la resolución del archivo de imagen digital.

El archivo de imagen posee un encabezado que representa su formato, se puede diferenciar a cada uno de ellos por medio de su extensión, por ejemplo bmp, jpg, tif, gif. Seguidamente tenemos la tabla de colores y un vector que representa la ubicación de los píxeles en el plano de la imagen. Cualquier editor de imágenes lee automáticamente el formato y la información necesaria para poder representar la imagen en pantalla.

Generalmente los editores de imágenes son paquetes de software cerrados que no permiten realizar cambios o mejoras en los algoritmos utilizados, por ejemplo el Paint o el Visor de imagen de Windows. Por ese motivo, para realizar extracciones o mediciones en imágenes digitales se recurren a programas como el MathCad [27], MatLab, Java, C++ [28]. Los dos primeros son software matemáticos, que posibilitan la incorporación de paquetes de Procesamiento Digital de Imagen (PDI).

En el programa Java, se debe adicionar un desarrollo denominado JAI [29] (Java Advanced Imaging) de distribución gratuita y código abierto. El Visual C++ [30] es un caso especial, debido a que es posible realizar operaciones en conjunto tanto con Mathcad, MatLab y Java. Los paquetes que se le incorporan al Visual C++, pueden ser ImageMagick¹³ o Visión SDK 1.0¹⁴.

En la figura siguiente se observa un imagen de pantalla que corresponde a un programa desarrollado en Visual C++, en el marco de esta tesis. La finalidad del mismo es calcular el campo de concentración de una pluma que sale de una chimenea y circula por el canal de viento, mediante el empleo de técnicas de edición de videos digitales (ver Figura 9).

Se describen en forma sintética las funciones del software desarrollados:

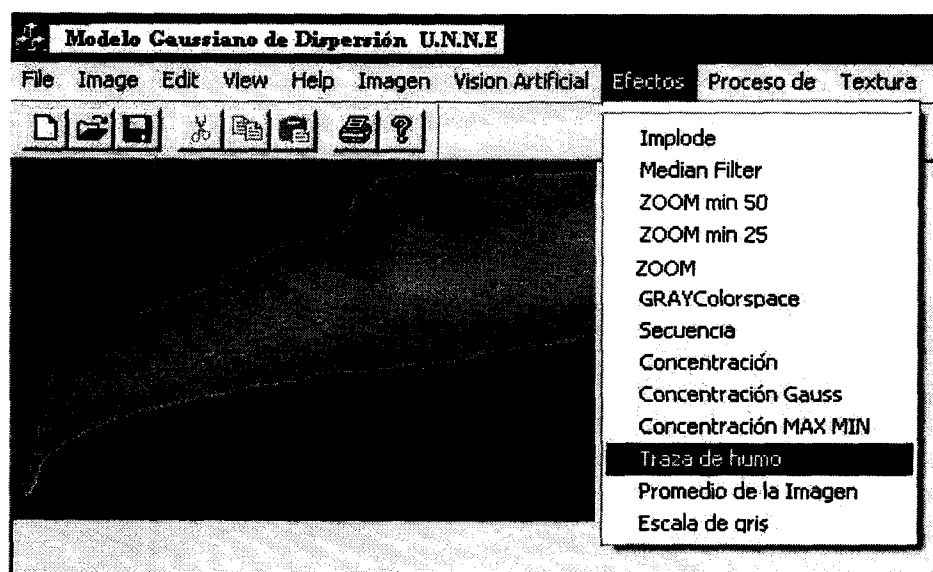


Figura 9: Software encargado de realizar cálculos de campos de concentración.

View: captura fotogramas mediante una webcam (con un muestreo de 16 fotogramas por segundo) o imágenes digitales almacenadas en una archivo configurado como predeterminado.

¹³<http://www.wizards.dupont.com/cristy/ImageMagick.html>

¹⁴El SDK <http://www.research.microsoft.com/research/vision/>



Median Filter: es encargado de filtra ruidos en la imagen digital.

ZOOM: afecta las dimensiones alto y ancho de la imagen digital.

Secuencia: realiza la secuencia de operaciones necesarias para obtener las imágenes, las coordenadas de la línea de la traza de la pluma de máxima concentración y las posiciones de los píxel de mínima concentración (el borde superior e inferior de la columna de humo).

Promedio de la Imagen: función encargada de suman los valores de las escalas de grises en una matriz (denominada matriz fuente) de dimensión igual a la de la imagen, al resultado obtenido se le multiplica por un factor $\frac{1}{k}$, donde k es la cantidad de fotogramas.

Concentración Max Min: en la región definida previamente se extrae los valores de escalas de grises máximos y mínimos según la posición x.

Traza de Humo: traza una curva de color rojo indicando la línea de máxima concentración en la columna de humo.

Escala de Gris: convierte a la imagen color de formato RGB a escala de gris de ocho bits.

Las funciones de procesamiento digital de imágenes, del paquete ImageMagick, son extensas y de relativa sencillez en su implementación. Brinda la posibilidad de realizar operaciones matemáticas sobre la información en la imagen digital.

4.2. Operaciones con Imágenes Digitales

El objetivo buscado en el Procesamiento Digital de Imagen es el acondicionamiento de las imágenes para extraer la información dentro del archivo de números. Dicha acción se realiza mediante la utilización de operadores matemáticos incluidos en los algoritmos de las funciones de los paquetes de edición de videos o imágenes.

La imagen digital puede ser representada mediante una matriz de números como se muestra en la ver Figura 10. Una vez creada la matriz de números, es posible apli-

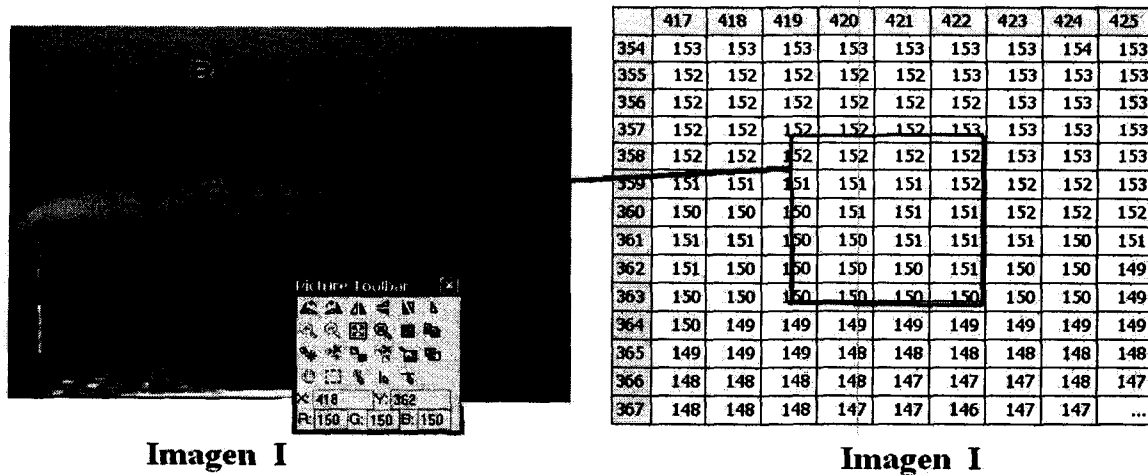


Figura 10: La matriz A representa el humo en la imagen y B el fondo.

carle cualquier operación o secuencia de operaciones matemáticas conocidas. Para lograr la extracción de información requerida en la matriz numérica se necesita acondicionar la imagen. Las operaciones de acondicionamiento pueden ser: Segmentación y Operaciones con Histogramas.

Para realizar la segmentación se utiliza el método de segmentación por amplitud [31], para ello se deben crear dos regiones denominadas imagen fuente e imagen destino (ambas de la misma dimensión), se escanean los píxeles de la región fuente, mediante una ventana rectangular de píxeles. Se realiza una operación matemática que analiza y clasifica la región de estudio. La extracción o permanencia del píxel depende del algoritmo de clasificación, (ver Figura 11). El Histograma es una representación visual de la frecuencia de repetición de las escalas de grises de una imagen [32]. Un ejemplo de ello se visualiza en la Figura 12. La herramienta del histograma, se puede utilizar en forma total o parcial en la imagen a procesar. En este caso, se elige una región rectangular de 5x5 píxeles. El histograma es utilizado en los temas relacionados con la probabilidad y estadística, pero también existen otros conceptos dentro de estas ramas probabilísticas, que pueden ayudar en el proceso de extracción de información en imágenes digitales.

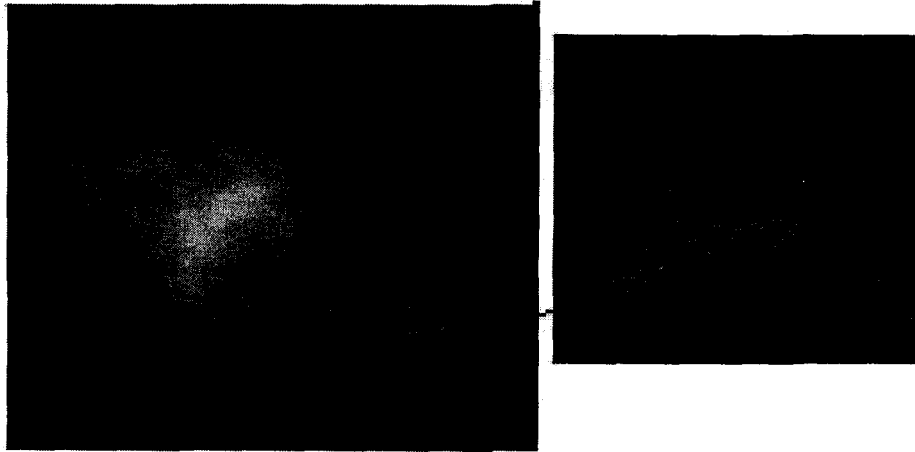


Figura 11: Operación de Segmentación.

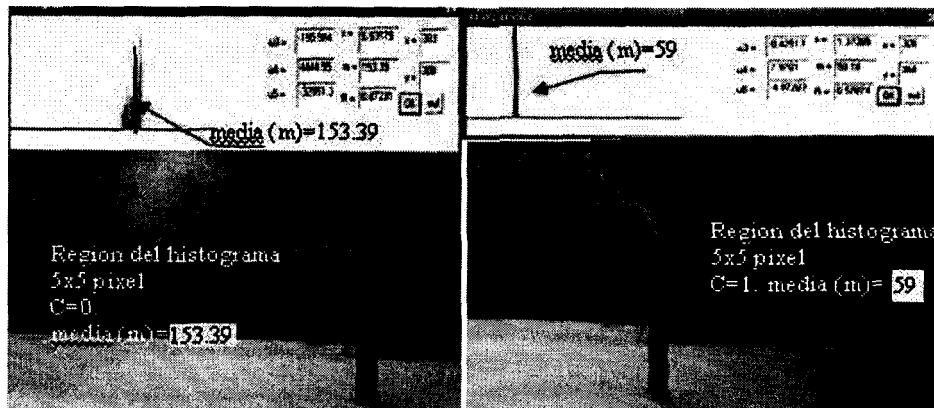


Figura 12: Histograma de la imagen en distintos lugares.

4.3. Herramientas Estadísticas Utilizadas en PDI

La estadística proporciona una herramienta de análisis de la información en la matriz numérica debido a que los datos necesarios para el procesamiento y clasificación no se encuentran en lugares puntuales en la imagen digital.

Es necesario obtener valores representativos de la población analizada y para ello se utiliza el promedio de la imagen en una región [33], ver Figura 13. La media

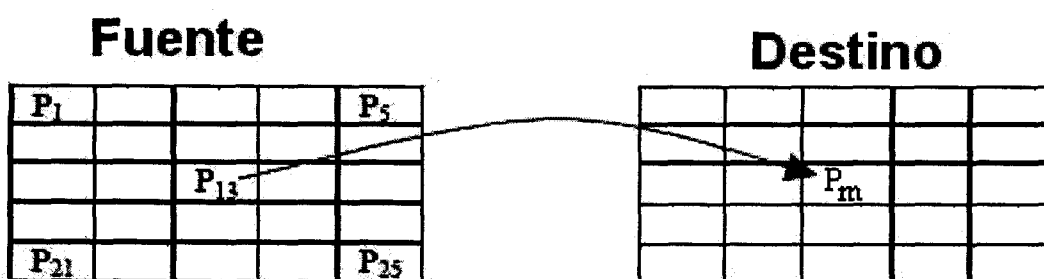


Figura 13: De la matriz fuente se obtiene P_m y se ubica en la matriz destino.

aritmética, se obtiene a partir de una matriz numérica de n columnas y m filas según la fórmula:

$$P_m = \frac{\sum P_i}{m \cdot n} \quad (12)$$

La varianza representada por σ^2 , es de particular importancia en la descripción de regiones. Es una medida del contraste del nivel de gris, que se puede utilizar para establecer descriptores de suavidad R^{15} . Por ejemplo el valor de:

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2} \quad (13)$$

El valor de R tiende a 0 para áreas de intensidad constante (ver región B Figura 10) o a 1 para la región A del fotograma.

Otro concepto estadístico es el coeficiente de variación y se lo define como la relación entre la dispersión y el promedio (ver ecuación (4) y (5)), se lo utiliza comúnmente para medir la intensidad de la turbulencia.

¹⁵González, R & Woods, R. (1992). *Tratamiento Digital de Imagen*. Editorial Addison Wesley / Diaz de Santo. Cap 8.p.550.



Otro procedimiento para describir regiones dentro de una imagen es utilizar el histograma de nivel de gris H_z donde z representa la escala de gris.

En algunas ocasiones es conveniente ver al histograma como un vector de 256 elementos (resolución de 8 bits). El valor de cada elemento z del vector H_z es la frecuencia de repetición de las escalas de grises en una región rectangular.

En este tipo de cálculo la información de la ubicación espacial de las escalas de grises en la imagen se pierde, pero este inconveniente es irrelevante debido a la naturaleza aleatoria del proceso de dispersión.

Esto quiere decir que pueden existir dos cuadros de imagen que representen un mismo estado de concentración pero su distribución de escalas de gris sea muy diferente. Mediante un programa matemático como el MathCad se representa el histograma en forma de vector para facilitar el procesamiento estadístico.

Otro concepto derivado del histograma es la función de probabilidad acumulada μ_z y se la define como:

$$\mu_z = \sum (h_z)^k \quad (14)$$

De la expresión h_z representa al histograma normalizado. Si $k = 1$ la función μ_z es la función probabilidad acumulada.

La función de probabilidad acumulada puede generar un filtro en la imagen debido a que μ_z tiene la capacidad de reasignar los niveles de grises (según los valores de k). En este trabajo de tesis la función de probabilidad acumulada μ_z es implementada como herramienta de comparación.

La kurtosis y la skewness [34] son descriptores estadísticos que permiten realizar comparaciones entre poblaciones. En la Figura 14 se muestra el comportamiento de la población y el sentido del signo en la kurtosis y skewness¹⁶. Cuando se considera el problema de la estimación de una variable, a partir de una o más variables relacionadas entre sí, se utiliza a la función de correlación. La correlación permite pon-

¹⁶Espada, G. y Villasante A. *Estadística*. Editorial Addison McGraw-Hill. Edición 2000. Cap 5. p.91.

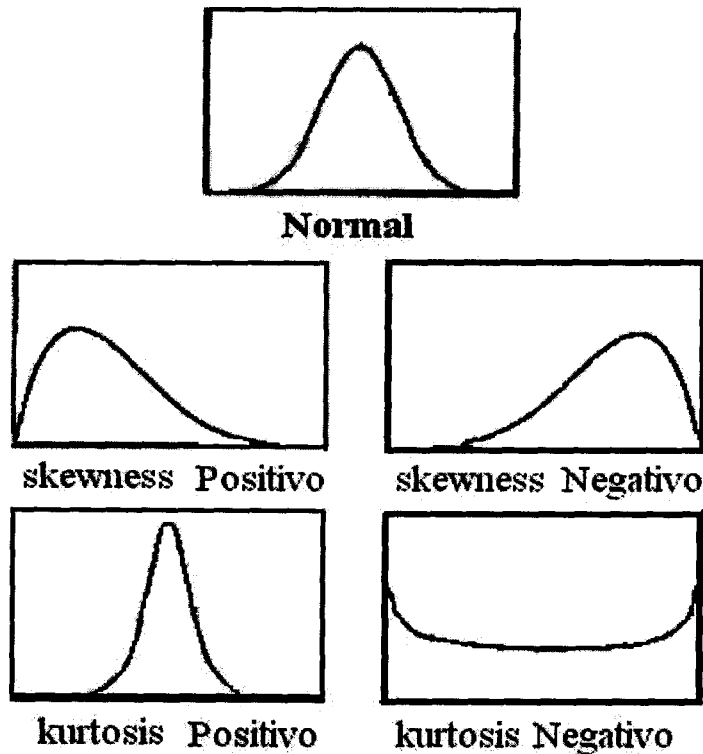


Figura 14: El comportamiento de la población se refleja en el signo de los descriptores.

derar el grado de relación entre las variables que se estudia para determinar en que medida una ecuación lineal o de otro tipo describe o explica de una forma adecuada la relación entre variables.

Si todos los valores de las variables satisfacen exactamente una ecuación, se dice que las variables están correlacionadas perfectamente. Cuando se habla de dos variables, se habla de correlación simple y de regresión simple. Cuando se trata de más de dos variables, se habla de correlación múltiple y regresión múltiple.

En la Figura 15 representa el diagrama de dispersión de las variables X e Y.

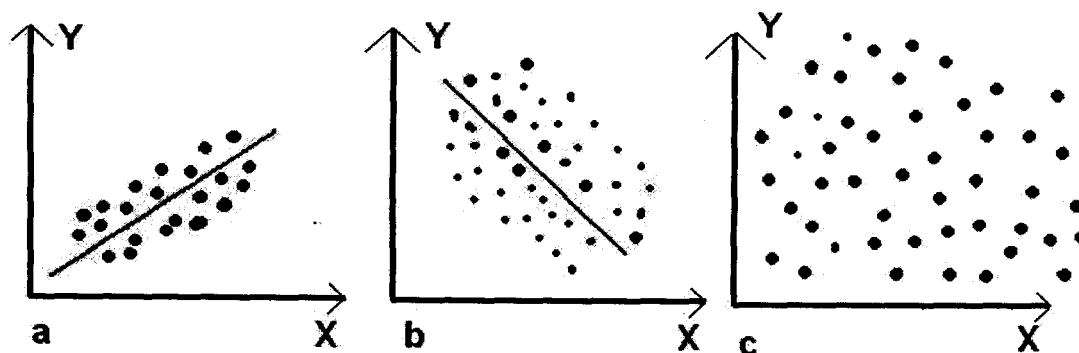


Figura 15: a) Correlación lineal positiva. b) Correlación lineal negativa. c) No hay correlación.

5. Instrumental y Materiales

A continuación se describe el instrumental y materiales necesarios para el análisis del proceso de dispersión. En primer lugar para obtener un resultado adecuado, la iluminación en la escena de experimentación tiene que ser uniforme. Se debe evitar en todo momento puntos de iluminación que afecten a la toma de imagen durante la experiencia, debido a que la concentración del humo está relacionada con el nivel de gris de cada fotograma.

Se dispondrán cuatro lámparas fluorescentes de 40 w cada uno, dando una intensidad de luz de 2800 lux. Se dispondrán en forma espaciadas para distribuir uniformemente la iluminación. En la Figura 16 se observa luxómetro que mide la iluminación y en la Figura 17 un anemómetro encargado de proporciona información de la

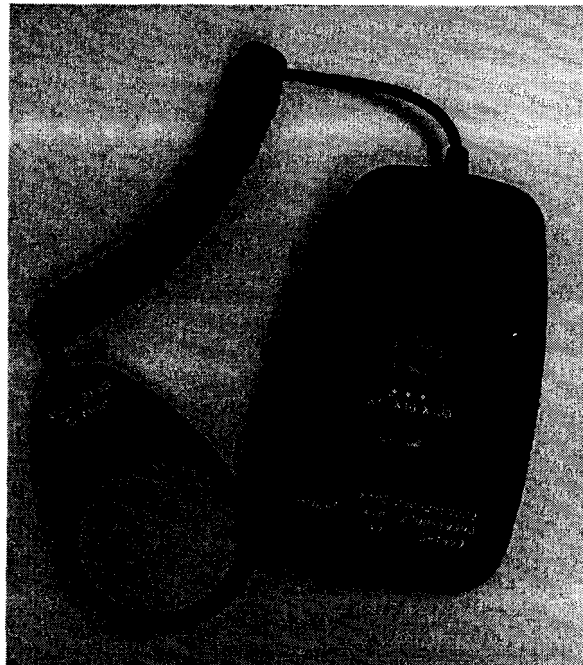


Figura 16: Imagen del instrumento luxómetro.

velocidad de viento en el canal de viento, para establecer condiciones adecuadas en la toma de videos.

El dispositivo de captura de video es una CCD de 7.2 MG píxel marca Sony, montada sobre un atril fotográfico profesional.

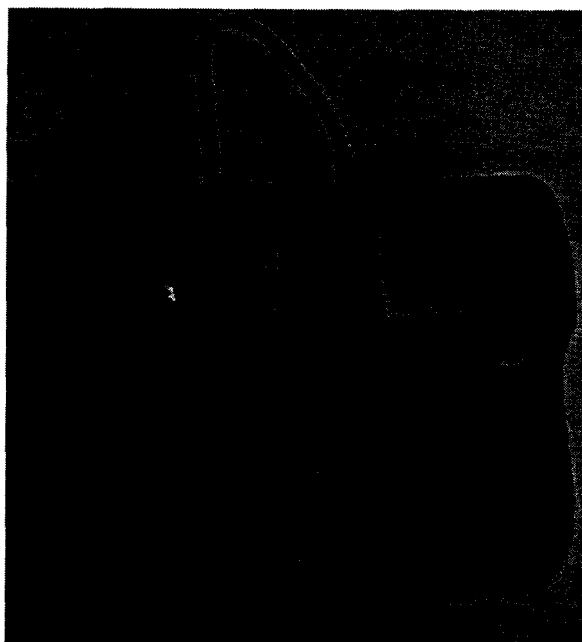


Figura 17: Imagen del instrumento anemómetro.

La CCD puede realizar videos de formato avi con un tiempo máximo de 1 min. En la Figura 18, se observa el luxómetro midiendo la cantidad de luz en la escena junto a la chimenea. El canal de viento posee un acrílico transparente donde la CCD puede capturar los videos para realizar la toma de datos y archivar la información en la PC. El generador de humo posee una potencia de 1kw y no está adaptado para emitir un caudal volumétrico constante.

Para resolver dicho inconveniente se construyó un dispositivo (ver Figura 19) que pueda acumular el humo en un reservorio, y mediante un ventilador, dosificar la cantidad de contaminante que se impulsa hacia el canal de viento a través de la chimenea.

El contaminante elegido es la glicerina líquida que es inerte y no tóxica. Presenta una gran sensibilidad a la variación de densidad en relación a la temperatura.



Figura 18: Imagen de la chimenea, fondo negro, piso blanco y luxómetro.

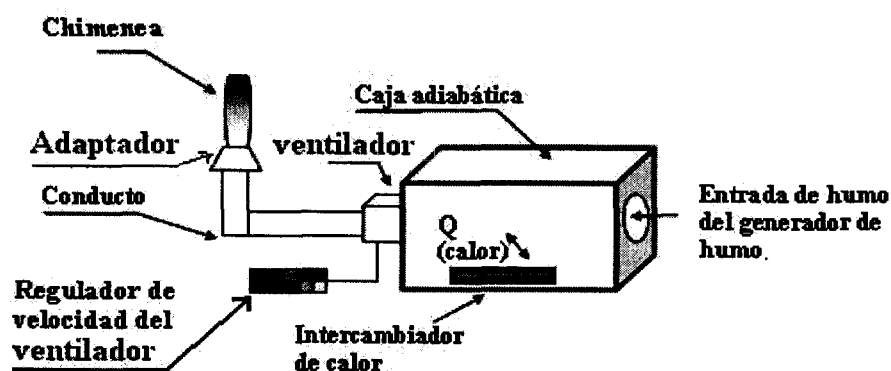


Figura 19: Reservorio de humo.

Por ese motivo, se introduce en la caja adiabática un intercambiador de calor que puede extraer o ceder energía al humo generado en el reservorio. De esta manera, el dispositivo puede controlar la densidad y el caudal volumétrico de la pluma de emisión en la escena durante los ensayos.

La experimentación se realiza en un túnel de viento recientemente diseñado por la Universidad Nacional del Nordeste (ver Figura 20).

La simulación de la capa límite atmosférica se efectuó empleando elementos de rugosidad y dispositivos de mezcla apropiados para reproducir una capa límite

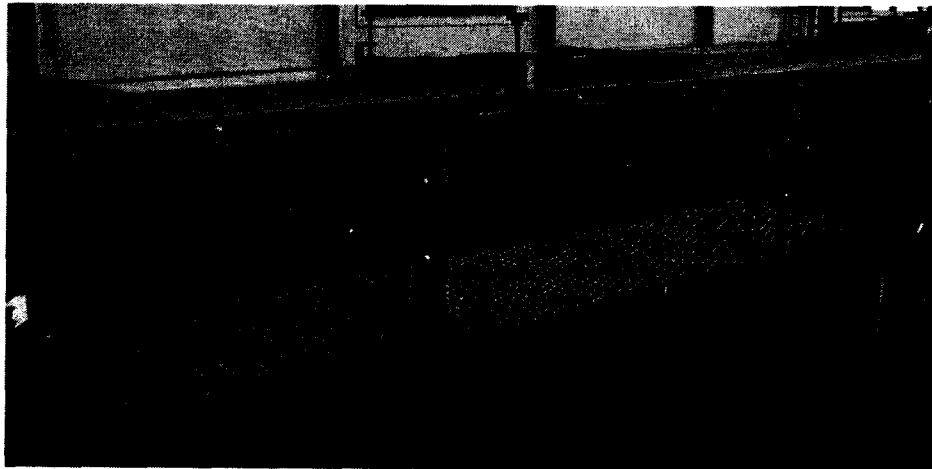


Figura 20: Imagen del canal de viento.

neutralmente estable de espesor parcial. La finalidad es poder simular la capa límite de un terreno de categoría IV de la norma NBR-6123/1988, equivalente a una categoría de exposición B del reglamento argentino CIRSOC 102.

El canal es de circuito abierto cuya longitud total es de 7,5 m. Su cámara de ensayo consiste en un conducto de sección cuadrada de 0,48 m de lado y de 4,45 m de longitud. La máxima velocidad del flujo en el canal vacío, es aproximadamente de 18 m/seg y emplea un ventilador centrífugo accionado por un motor trifásico de 1450 rpm y 13,59 kW de potencia.

La regulación de la velocidad del aire en el canal de viento se realiza mediante el cierre o apertura de un diafragma en el conducto de entrada de aire.

En los diferentes ensayos no se reproduce una fuente de emisión determinada, simplemente se considera el número de Reynolds y la relación de velocidades, no como parámetros a ser reproducidos, sino como parámetros de comparación. La fuente de contaminante se representa mediante un conducto metálico de 1.02 cm de diámetro interno (chimenea de color negro) y 10 cm de alto, ubicado en el centro de la escena en el canal de viento.

Todas las experiencias son realizadas mediante un régimen estacionario. En la imagen del canal, se observan agujas y rugosidades (ver Figura 21).

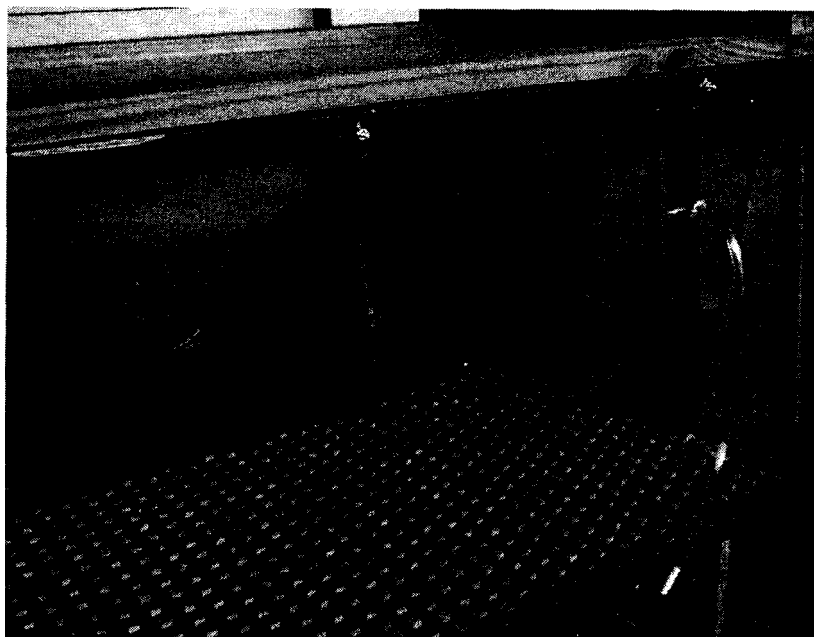


Figura 21: Imagen de rugosidad y agujas.

Las agujas, en conjunto con la rugosidad superficial son encargadas de generar un flujo de capa límite turbulento que representa las características del flujo atmosférico en condición de estabilidad neutra.

Las agujas generan un déficit inicial de cantidad de movimiento en la parte baja que luego la rugosidad termina de configurar en el perfil de velocidades medias y distribución de turbulencia similar al que se quiere simular en el túnel. En este caso es una capa límite turbulenta que se desarrolla sobre un terreno rural.

El fondo de la escena es de color oscuro (papel cartulina negro) que facilita el contraste y permite segmentar la pluma. El piso es de color blanco para reflejar la luz de los fluorescentes que se encuentran en la parte superior. Con las consideraciones planteadas la escena queda caracterizada para obtener y procesar información de la columna de humo en la toma de datos en el canal de viento.

5.1. Características de la Toma de Datos en el Canal de Viento

Para analizar en forma estadística el campo de dispersión del flujo turbulento en el canal de viento, se definen cuatro puntos denominados P1, P2, P3 y P4. En la Figura 22 se muestra la ubicación de los puntos para la toma de los datos.

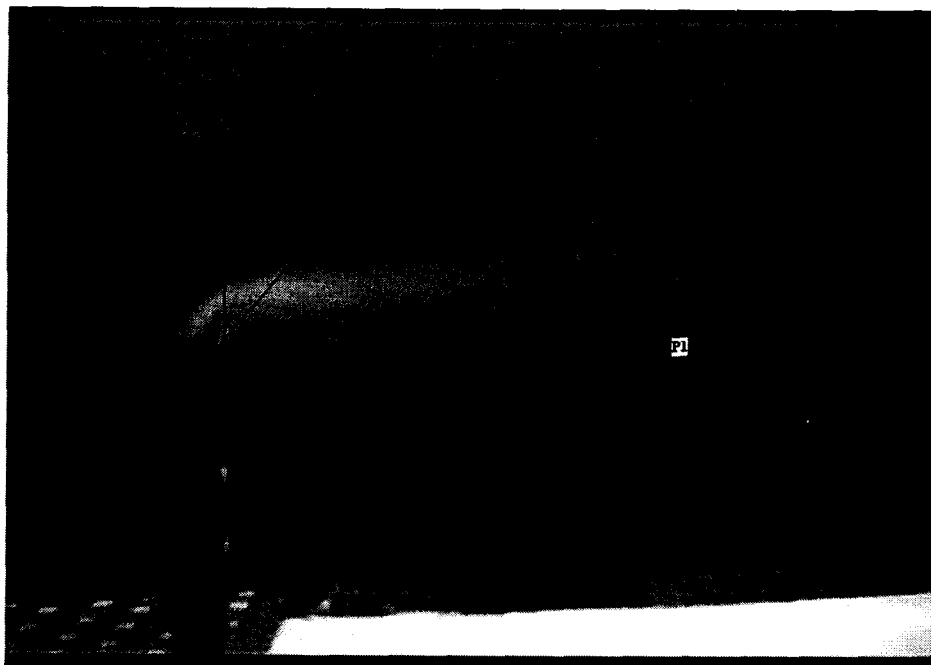


Figura 22: Ubicación de los puntos P1, P2, P3 y P4 sin el modelo.

En la Figura 23 se muestra la ubicación de los puntos P1, P2, P3 y P4 para la toma de los datos con el modelo a escala. Cada uno de los casos, se diferencian por la velocidad del viento, en el canal de viento y el modelo a escala dentro de la escena. La Tabla 2 resume los seis casos estudiados.

La primera columna representa los casos, la segunda expresa la velocidad del viento en el canal de viento, la cuarta columna muestra sobre la existencia o no de un modelo reducido en la escena, la quinta columna visualiza la cantidad de fotogramas

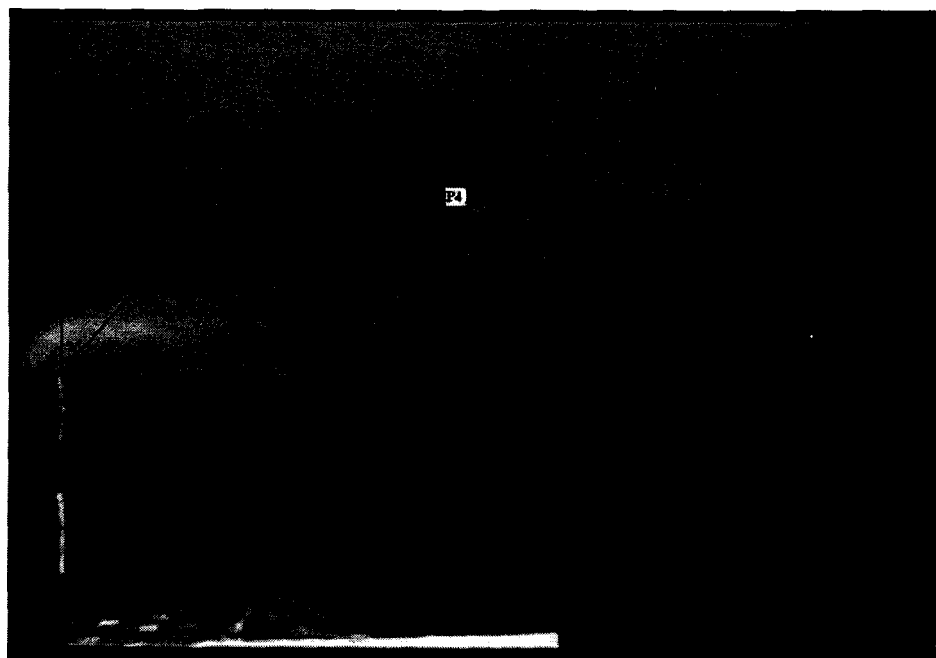


Figura 23: Ubicación de los puntos P1,P2,P3 y P4 en relación al modelo.

obtenido en el ensayo y finalmente el tiempo de duración de cada toma medida en segundos.

Tabla 2. Resumen los casos estudiados

Ensayos	Velocidad (m/seg)	Modelo reducido	Fotogramas	Tiempo
caso 1	2.11	No	409	13.63
caso 2	5.11	No	319	10.63
caso 3	10.11	No	478	15.93
caso 4	2.11	Si	322	10.73
caso 5	5.11	Si	322	10.73
caso 6	10.11	Si	340	11.83

A continuación, se resumen las condiciones de ensayo.

1. La velocidad es registrada mediante un anemómetro y la iluminación se realiza con dos tubos fluorescentes de 40W cada uno. La cantidad de fotogramas obtenidos se resume en la tabla y la frecuencia de adquisición es de 30 fps/seg.
2. La posición de la cámara es del tipo plano entero.
3. La angulación de la cámara es del tipo normal y el montaje es analítico (los seis casos).
4. La resolución final de cada fotograma es de 920x720.
5. Se tabula en una planilla los resultados experimentales obtenidos.
6. Eje de referencia: lado derecho de la chimenea.
7. Relación de escala: 57 píxel/14 mm(diámetro de la chimenea).

6. Desarrollo del Trabajo de Investigación

A continuación, se describen las hipótesis de trabajo, la metodología y el procedimiento que permite caracterizar el campo de concentración en un proceso de dispersión. Se brindan detalles de la calibración del sistema y de la relación entre concentración y escala de gris. Mediante el análisis de los resultados y la comparación de datos bibliográficos es posible evaluar las limitaciones del sistema.

6.1. Hipótesis de Trabajo

De forma general, se plantea la determinación del campo de concentración de contaminante en una pluma de emisión aplicando la edición de videos. A partir de conceptos antes desarrollados, se toma como base el modelo de dispersión de Gauss simplificado, para establecer la relación entre imagen y campo de concentración. Se considera que las leyes de semejanza son aplicables¹⁷, y de esta manera, es posible relacionar el comportamiento de un modelo de dimensiones a escala natural con otro modelo a escala reducida.

Existe una gran variedad de métodos para el análisis del proceso de dispersión en un túnel aerodinámico. Estos incluyen la utilización de la columna de humo y los más importantes el uso de sistemas ópticos. Estos sistemas operan en virtud del hecho de que el índice de refracción de un gas es función de la densidad del gas y su cambio observado en un sistema óptico permite obtener información del campo de densidades en el flujo viajando a elevada velocidad.

El CCD es un sistema óptico sensible a la emisión de energía de una fuente de luz. Si entre la fuente de emisión de luz y el CCD, pasa un flujo de gas, la cantidad

¹⁷Alvarez y Alvarez, Gisela M. Wittwer A. Natalini M.(2004) Estudio de procesos de difusión de gases contaminantes en la atmósfera mediante la técnicas de visualización. Comunicación Científicas y Tecnológicas U.N.N.E

de luz recibida por el sistema óptico disminuirá debido a que el humo absorbe parte de dicha radiación (energía en forma de luz). Diversas experiencias demuestran la existencia de una relación entre la variación de la cantidad de luz absorbida por la pluma y la densidad. Dichas diferencias, pueden ser capturadas por la CCD y representadas en forma cuantitativa mediante las escalas de grises. De esta manera, se plantea una metodología para calcular campos de concentración de en una pluma, utilizando la escala de gris medidos por un sistema óptico denominado CCD.

Existe mucha evidencia experimental respecto a que el campo de concentración media de una pluma de emisión, bajo ciertas condiciones de dispersión, presenta una distribución espacial Gaussiana. Por esta razón, inicialmente en este trabajo se elige el modelo de Gauss de dispersión y, realizando una serie de consideraciones, se relaciona la expresión Gaussiana (15) con el campo de concentración que determinan los fotogramas. La metodología desarrollada permite vincular la escala de gris (de los fotogramas) con la concentración de contaminante. Este procedimiento constituye la calibración del sistema óptico, que en este caso es un sistema de medición, y queda expresado en un gráfico concentración vs. escala de gris. Finalmente, una vez obtenida esta relación entre la escala de gris y la concentración, es posible evaluar procesos de dispersión donde, debido a las condiciones de difusión de la pluma, el fenómeno no necesariamente presente una configuración espacial Gaussiana.

6.2. Metodología

La medición de la dispersión de contaminante en la pluma se efectúa relacionando las escalas de gris de unas series de imágenes obtenidas en el túnel de viento con la concentración. Para articular el concepto intensidad de iluminación en la columna de humo con la concentración del contaminante en el modelo de difusión simplificado, se recurre a las fórmulas escrita anteriormente de la siguiente manera:

$$c_z = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{-\frac{(z-z_{max})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (15)$$

Donde z_{max} representa la altura donde se encuentra la máxima concentración de contaminante a una distancia x . Si es posible obtener la posición z_{max} y se define z , la concentración estaría dependiendo del parámetro de la variable σ_z .

Debido a la relación que existe entre la escala de gris de una imagen y la concentración, el histograma proporciona información sobre el comportamiento de los píxeles en una porción de ventana ubicado en una posición definido en la pluma. Dado un punto $p(x,z)$ es posible calcular la media aritmética de la escala de gris mediante una matriz con dimensión de n columnas y m filas.

Para poder relacionar la concentración y la escala de gris, es necesario acondicionar la escena donde se realiza la experiencia, para extraer la información deseada en la columna de humo. La intensidad de la iluminación (de las lámparas a lo largo de la pluma) debe ser constante. Se debe diferenciar en todo momento, el fondo, el piso y la pluma en la escena. De esta manera, en las regiones de las imágenes capturadas, donde el fondo no es interferido por el humo, la escala de gris se asocia a concentración nula, y en aquellas donde la línea de escala de gris es máxima se relaciona a concentraciones elevadas (línea de máxima concentración).

Un software que permite la edición de video y el procesamiento digital de imagen (ver pag. 42) puede realizar el proceso de obtención de los puntos z_{max} y z . Para aplicar la ecuación de dispersión de contaminante (15) se debe conocer los valores de σ_z .

De esta manera, se plantea la necesidad de determinar σ mediante un procedimiento de cálculo para estimar los valores de concentración en una posición $p(x,z)$ perteneciente a la pluma (en el canal de viento). Si partimos de la expresión del modelo de dispersión simplificado y ahora lo expresamos de la siguiente forma:

$$C_z = e^{-\frac{(z-z_{max})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (16)$$



Tabulando los valores obtenidos de la siguiente manera:

Tabla 3. Tabulación de los valores

Concentración c	Escala de gris
c_0	$gris_0$
c_1	$gris_1$
c_2	$gris_2$
.....	
c_n	$gris_n$
.....	
c_{zmax}	$gris_{zmax}$

El valor de $c_{zmax} = 1$ y además, se relaciona las escalas de grises de la siguiente manera:

$$\frac{c_1}{c_{zmax}} = \frac{gris_1}{gris_{zmax}} \quad (17)$$

De esta forma se puede establecer:

$$\begin{aligned}
 c_0 &= 0 \\
 c_1 &= \frac{gris_1}{gris_{zmax}} = e^{-\frac{(z_1 - z_{max})^2}{2\sigma_z^2}} \\
 c_2 &= \frac{gris_2}{gris_{zmax}} = e^{-\frac{(z_2 - z_{max})^2}{2\sigma_z^2}} \\
 c_3 &= \frac{gris_3}{gris_{zmax}} = e^{-\frac{(z_3 - z_{max})^2}{2\sigma_z^2}}
 \end{aligned}$$

Los valores $gris_n$ y z_n , se pueden obtener mediante la edición de video y procesamiento digital de imagen. De esta manera, se establece una relación para estimar el σ_z . Para ello, se hace pasar una curva de comportamiento semejante al modelo Gaussiano de dispersión por los puntos c_1, c_2 y c_3 .

Se estima el σ_z en cada posición perteneciente al intervalo $[x_1, x_3]$ para su utilización en la fórmula de Gauss (ver Figura 31).

6.3. Procedimiento para el Análisis del Proceso de Dispersión

Se acondiciona la escena en el canal de viento y se fijan los parámetros de velocidad del viento y caudal de contaminante. Mediante la edición de video y una cámara digital, se obtienen planos enteros para ser descompuestos en fotogramas. Se toma una serie de videos con formato avi en el canal de viento. Se transforma el formato avi a la extensión mpg2 por ser la de mayor calidad y su equivalencia con el formato analógico VHS. Luego se guardan en un archivo los fotogramas de los diferentes videos. Las diferentes series de imágenes se promedian y mediante un algoritmo de segmentación extrae la columna de humo del fondo. De esta manera, para cada valor x se obtiene $gris_n$ y z_n (ver Figura 24).

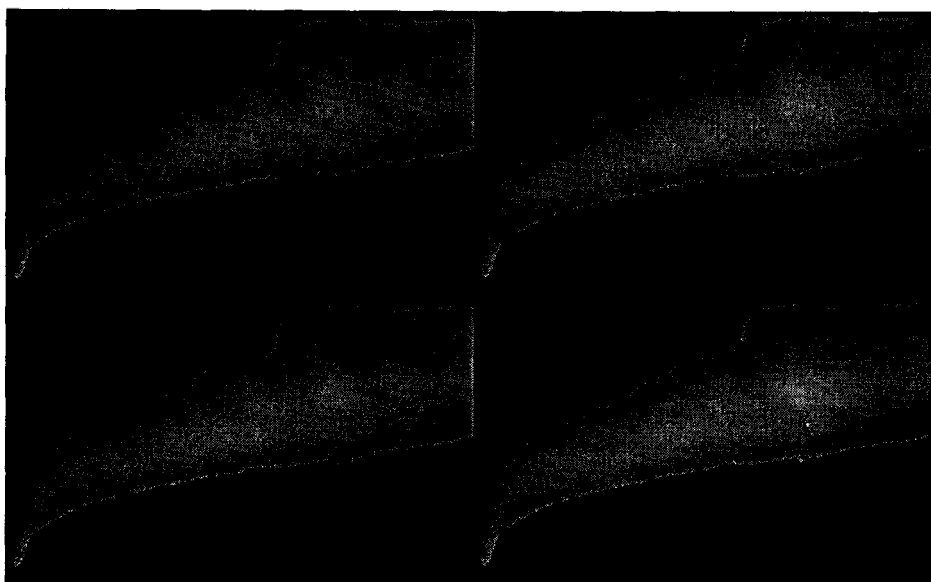


Figura 24: Cálculo de $gris_n$ y z_n despues de la segmentación.

Haciendo pasar una curva de forma similar a la Gaussiana por los c_1, c_2, c_3 para cada valor de x , se estima el valor de σ_z . Para realizar el cálculo de la concentración de contaminante, se efectúa una calibración en un estado conocido. Por esa razón, se utiliza el modelo simplificado de Gauss. Para ello, no se deben introducir interferencia en el sistema de adquisición que afecte al estado ideal del modelo de dispersión. En la Figura 25 se observa una situación ideal que puede ser descrita por la ecuación del modelo.

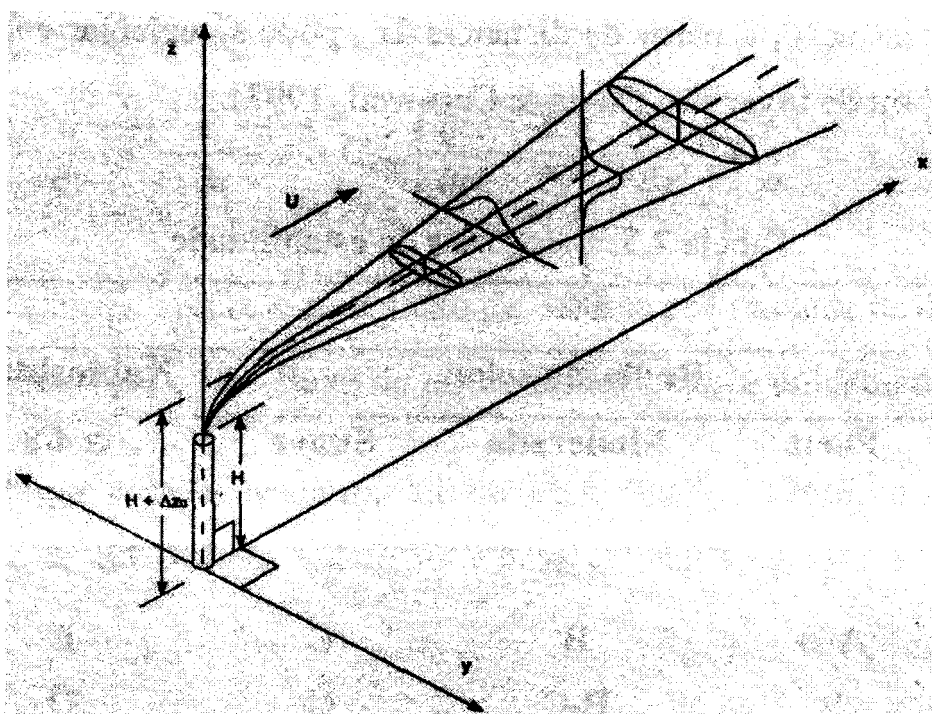


Figura 25: Situación ideal descrita por la ecuación del modelo simplificado de Gauss [35].

En la Figura 26, se encuentra un obstáculo antes de la fuente de emisión de humo, dando interferencia sobre el desplazamiento ideal de la pluma. De la misma manera, en la Figura 27, se encuentra un obstáculo después de la fuente de emisión de humo, generando interferencia sobre el desplazamiento ideal en la columna de humo.

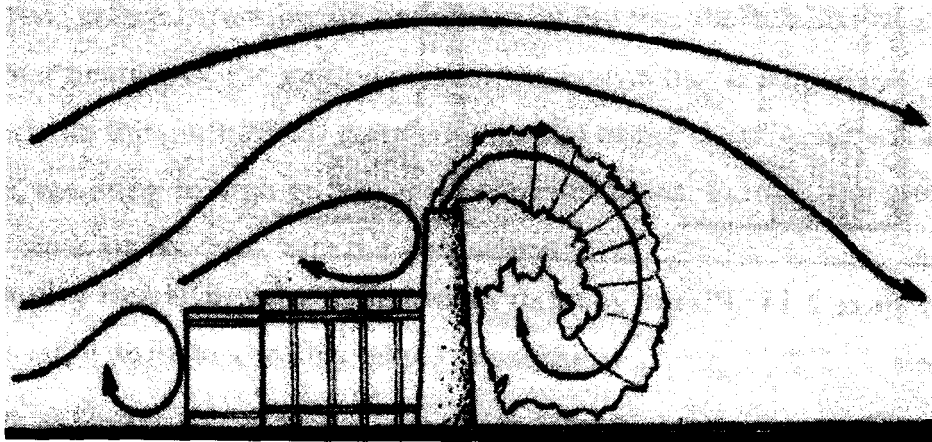


Figura 26: Forma de la pluma causada por un objeto antes de la chimenea [35].

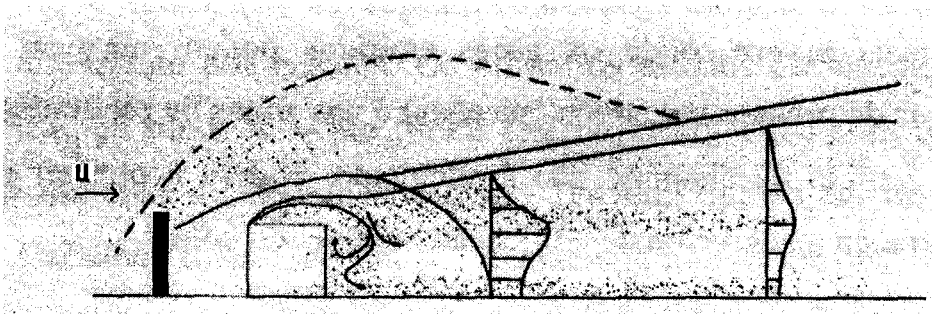


Figura 27: Forma de la pluma causada por un objeto después de la chimenea [35].

Para calcular la concentración de un flujo turbulento, es necesario realizar una calibración del sistema de adquisición de información (sistema óptico). Los ensayos experimentales, deben ser lo más cercanos a las situaciones ideales en el canal de viento (Figura 25). De esta manera, se determinan los parámetros utilizados en la expresión de dispersión de contaminante.

6.3.1. Calibración del Sistema

Las condiciones de la pluma deben ser lo más ideales posibles, debido a que en esas situaciones, las fórmulas de dispersión simplificado de Gauss se ajustan convenientemente a valores conocidos.

La cantidad de contaminante debe establecerse entre ciertos límites para diferenciar lugares de máxima y mínima concentración en relación al fondo. En el primer caso elegido, la velocidad del viento en el canal de viento es de 1 m/seg y el caudal de contaminante es elevado. La segmentación del humo en la escena es posible, pero se dificulta diferenciar el fondo y los valores de máxima concentración en la pluma empleando la CCD. Las técnicas de edición de video al igual que los procedimientos de PDI, logran procesar la información, pero el ejemplo planteado no es elegido como

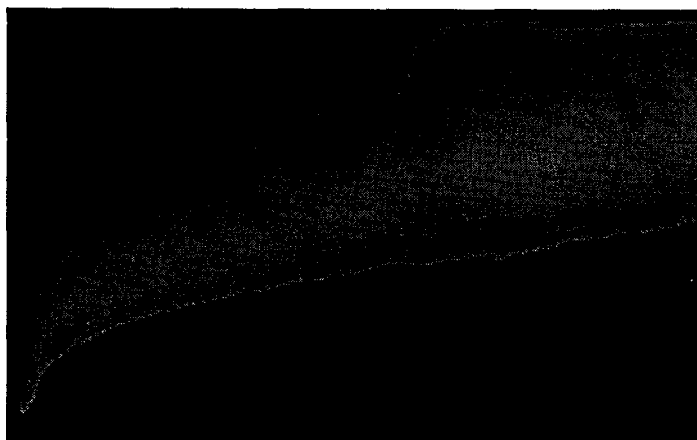


Figura 28: Segmentación de la pluma aplicando P.D.I.

modelo en la calibración (ver Figura 28). En el ejemplo de la Figura 29, la velocidad del viento en el canal de viento es ahora 2.11 m/seg y la cantidad de emisión de contaminante disminuye. En esas condiciones, es posible diferenciar el fondo y la línea de máxima concentración. Para tales fines, se determinan en la imagen todos los puntos verticales que pertenezcan a la columna de humo desde x_1 hasta x_3 .

En cada una de los segmentos verticales, se obtiene la media aritmética del píxel de la posición z (ver Figura 24). Para cada posición x del intervalo $[x_1, x_3]$, existe

un máximo de la media aritmética y se lo representa como un punto de color rojo. Los sucesivos puntos forman una línea característica, que constituye la máxima concentración de contaminante en la pluma. En el ejemplo propuesto, se observa una fluctuación de la columna de humo entre el intervalo $[x_2, x_3]$ (columna de humo en la parte superior), dicho comportamiento afecta el carácter ideal del modelo.

Se aumenta la velocidad del viento (en el canal de viento) a un valor de 5.11 m/seg, y se observa nuevamente en la Figura 30 un comportamiento de la pluma que afecta la forma ideal esperada. Se aumenta nuevamente la velocidad y la forma

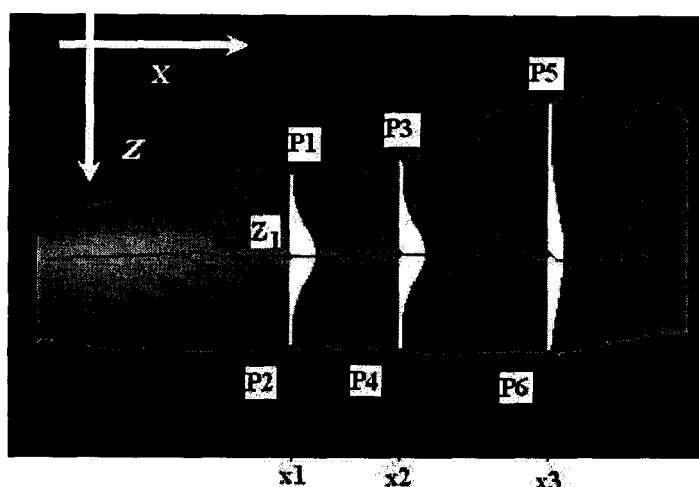


Figura 29: Segmentación de la columna de humo aplicando PDI caso 2.

observada de la columna de humo se asemeja al ideal ver Figura 31. Se elige este ejemplo, para realiza los procedimientos necesarios en la obtención de los σ_z por ser el más ideal. En la Figura 32 se representa el σ_z experimental y teórico.

Se observa a una distancia de la chimenea, donde los valores teóricos y experimentales se alejan en forma significativa. Dicho comportamiento es debido a la hipótesis de relacionar los primeros coeficientes c_1, c_2 y c_3 de la curva normalizada (de la escalas de grises) con la exponenciales (ver ecuaciones (15), (16) y (17)) de la función de dispersión de Gauss en todo el intervalo $[x_1, x_3]$.

En Figura 33 se representa el comportamiento normalizado de la escala de gris

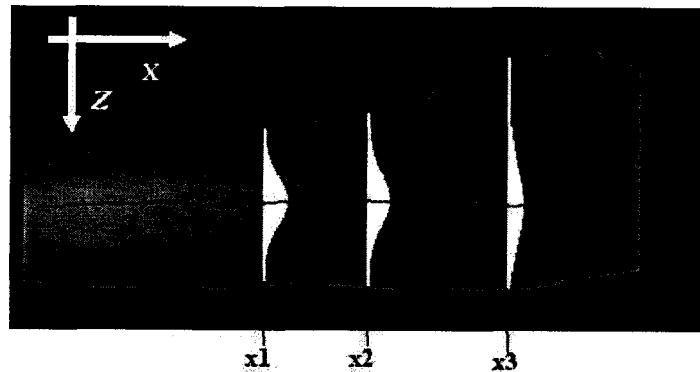


Figura 30: Se observa en $[x_2, x_3]$ una fluctuación en la pluma.

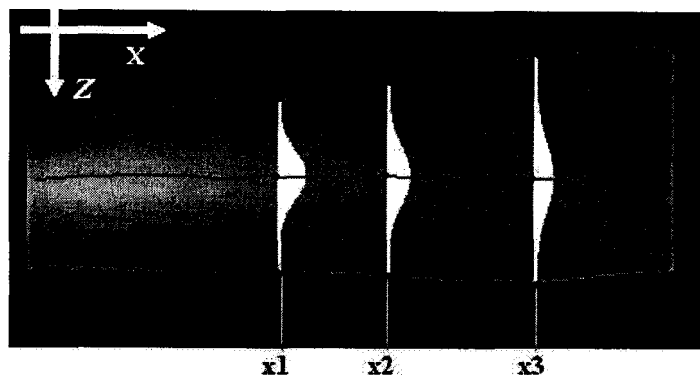


Figura 31: Columna de humo, se asemeja al modelo ideal.

y la expresión de dispersión de Gauss. En el ejemplo se visualiza la curva normalizada y la de dispersión ajustándose a valores esperados. En la Figura 34, representa el comportamiento normalizado de la escala de gris y la expresión de dispersión de gauss, pero en este caso, la curva experimental y normalizada no se ajustan a los cálculos teóricos (distancias menor a 145 metros).

El caso elegido para el análisis del proceso de dispersión se representa en la Figura 31. La línea de máxima concentración, separa dos zonas. En la zona superior, el humo presenta una ciertas irregularidades que impiden tomar los valores de σ_z en los extremos. Se visualiza el comportamiento señalado en la Figura 33 y Figura 34.

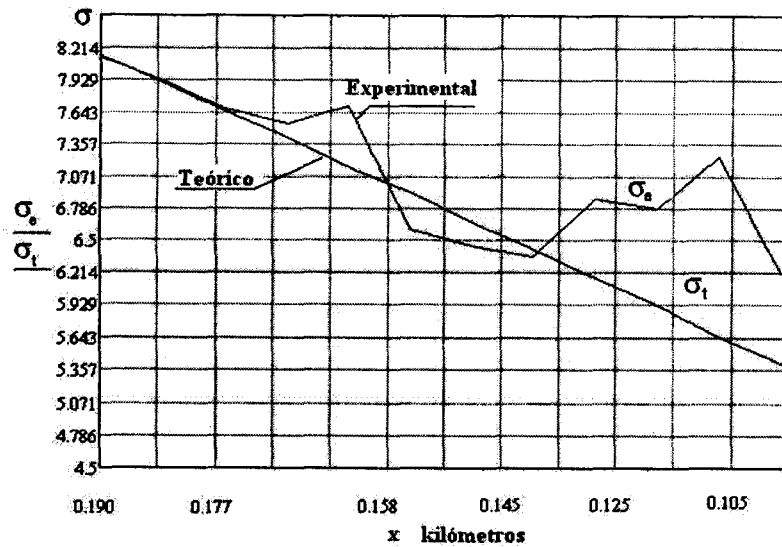


Figura 32: Gráfica de $\sigma_z(x)$ teórico y experimental.

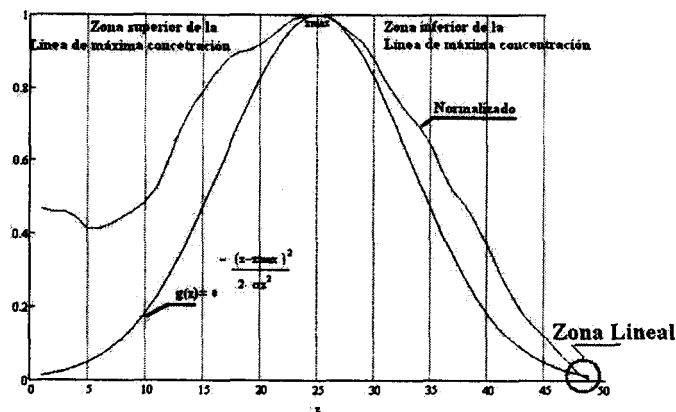


Figura 33: Curva normalizada de la escala de gris y Curva de Gauss, alejadas de la chimenea.

En la zona inferior, la pluma se asemeja al ideal, por ese motivo, se analiza la región comprendida entre la zona de máxima concentración y la zona inferior.

Una vez obtenidos los valores que vinculan la escala de gris y los valores de concentración de contaminante en función de $p(x, z)$, se organizan los datos en una tabla, para establecer la relación de concentración versus máxima escala de gris.

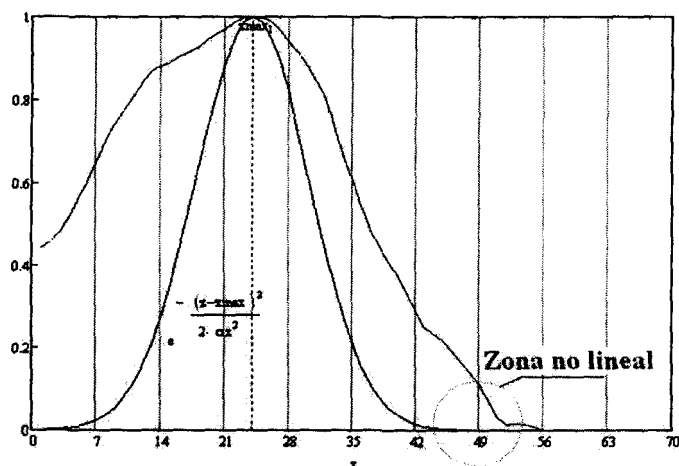


Figura 34: Curva normalizada de la escala de gris y Curva de Gauss, cercanas a la chimenea.

6.3.2. Concentración Versus Máxima Escala de Gris

Cada posición x perteneciente al intervalo $[x_1, x_3]$ tiene su máxima escala de gris (en la posición z_{max}) y se lo asocia con el valor teórico de concentración del modelo simplificado de dispersión (ver Tabla 4).

Tabla 4. Valor teórico de concentración y la escala de gris

X	Concentración c	Escala de gris máxima
x_1	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_1}}}$	$gris_1$
x_2	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_2}}}$	$gris_2$
.....		
x_n	$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_n}}}$	$gris_n$

La tabla puede ser expresada según la Figura 35, representando en el eje vertical la concentración c en forma adimensional, y en el eje horizontal la escala de gris.

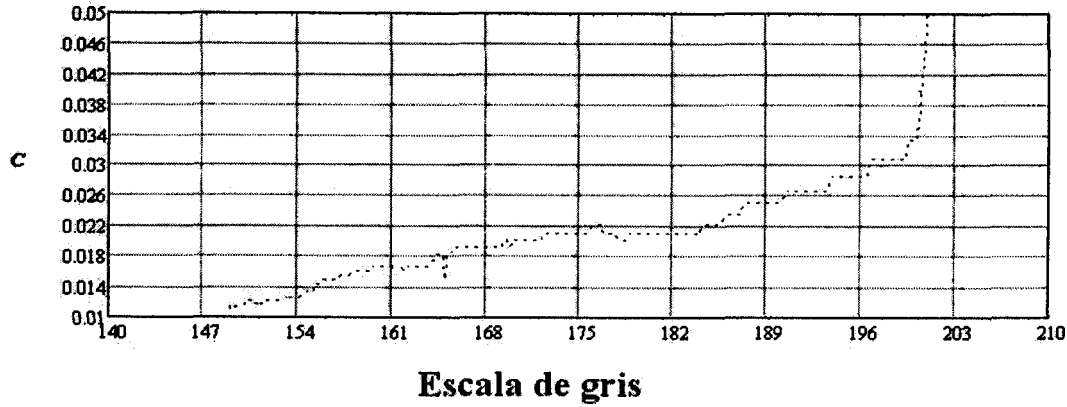


Figura 35: Concentración en relación a la escala de gris.

Para asociar los valores de la gráfica a magnitudes de concentración en los ensayos experimentales, se tiene en cuenta el caudal másico de contaminante a la salida de la chimenea y la velocidad del viento en el canal de viento.

La concentración absoluta estimada en la posición $p(x_n, z_n)$, se puede definir de la siguiente manera:

$$c(x_n, z_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} e^{\frac{-(z-z_{max})^2}{2\sigma_z^2}} \quad (18)$$

$$C(x_n, z_n) = k_1 c \quad (19)$$

El valor del coeficiente k_1 , depende de las siguientes constantes:

$$k_1 = \frac{g}{u} k_2 \quad (20)$$

El valor g es el caudal másico de contaminante en la salida de la chimenea medidos en [gr/s], u es la velocidad del viento en el canal de viento medida en [m/s] y k_2 es un coeficiente de corrección medido en [1/m] y σ_z en metros. De esta manera, los resultados de la concentración en un punto de la imagen ubicado en la posición $C(x_n, z_n)$, estaría expresado en [g/m³].

En la Figura 35, se relaciona la escala de gris y la concentración, pero no se especifica el verdadero entorno de trabajo que es utilizado en el desarrollo experimental. Para definir dichos intervalo, se realiza un análisis de la gráfica de concentración versus escala de gris.

6.3.3. Relación de la Concentración y la Escala de Gris

La gráfica que relaciona la escala de gris con la concentración en un punto de la imagen digital, se obtiene mediante la toma de video de un ensayo experimental en un sector del canal de viento denominado escena y mediante técnicas de procesamiento digital de imagen, se extrae la columna de humo de la escena. La operación de extracción se denomina segmentación y se realiza mediante el empleo de algoritmos encargados de clasificar patrones de escalas de grises pertenecientes al fondo o la columna de humo. Existen diversas maneras y métodos para implementar las tareas de segmentación.

En el caso de la gráfica concentración versus escala de gris, se procede a la utilización de reglas que permiten caracterizar regiones donde existe humo o ausencia de contaminante. En la Figura 36, se muestra la variación temporal de la escala de gris en dos regiones definidas como Fondo (fondo de la escena) y Humo (columna de humo a la salida de la chimenea).

La línea roja caracteriza el humo y la línea azul el fondo. Dicha representación (de la fluctuación en el tiempo de la escalas de grises) se obtiene a partir del promedio de una región rectangular (Humo o Fondo) en los fotogramas en un período de tiempo (ver pag. 46). En la Figura 37, se puede observar el comportamiento de la escala de gris (línea negra) perteneciente a un punto analizado en el contorno de la columna de humo o a una distancia muy alejado de la chimenea. Los resultados obtenidos son semejante al trabajo experimental realizado por Ohba¹⁸ en relación a la variación

¹⁸M. Ohba,(1992). Studies on Measurement Techniques of Video Images for Gaseous Diffusion Around a Building. Vol.41-44. p.2766.

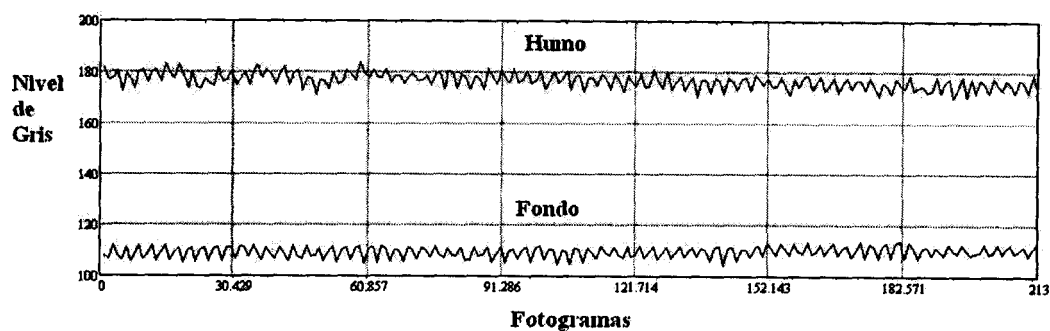


Figura 36: Variación temporal de la escala de gris.

temporal de la escala de gris en puntos de la imagen.

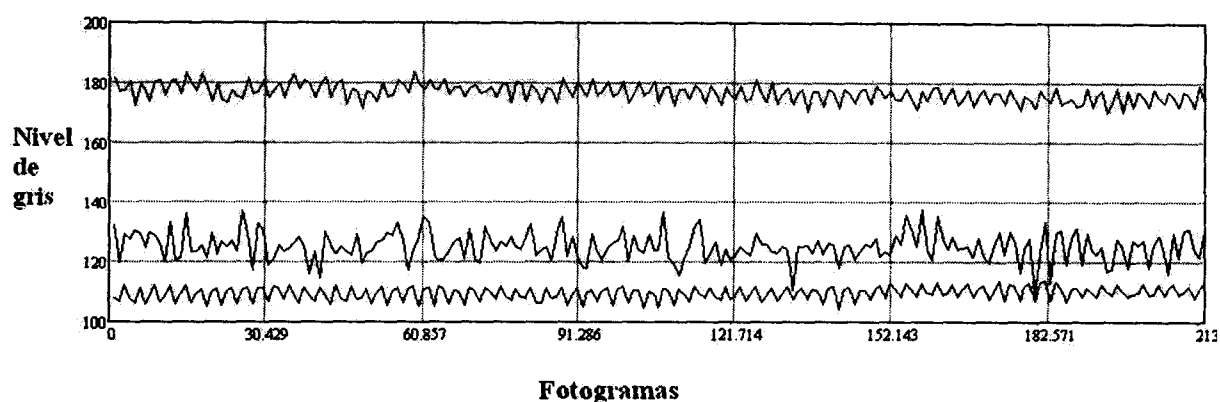


Figura 37: Variación temporal alejada de la chimenea (línea negra).

En la Figura 37, la trayectoria de la línea negra se observa algunos puntos que se solapan con el fondo y la aplicación de reglas¹⁹ se torna ambigua. Para resolver dicho inconveniente se suele relajar los coeficientes de ponderación pertenecientes al conjunto de reglas (se puede suponer que el conjunto de reglas funciona como un filtro). En ese caso puede suceder que información perteneciente al fondo se tome

¹⁹Sing Tze Bow. Pattern Recognition and Image Preprocessing. Second Edition. Editorial Marcel Dekker 2002. Cap1. p.20.

como humo.

Otra opción es volver más rígidas las condiciones de filtrado de los píxeles, con el inconveniente de restringir la extracción de información y afectando el proceso de cálculo posterior (que en este caso sería la obtención de los σ_z). De esta manera, se hace evidente la relación entre los algoritmos de segmentación adoptado y los valores obtenidos en la gráfica concentración versus escala de gris, es decir; la rigidez de las reglas establecidas generan pérdida de exactitud y la relajación de los coeficientes de ponderación afectan a la precisión.

En la Figura 38, se observan las ubicaciones de los puntos donde se realizaron las muestras (fondo, humo, humo1 y humo2). Seguidamente, en la Figura 39, se rep-

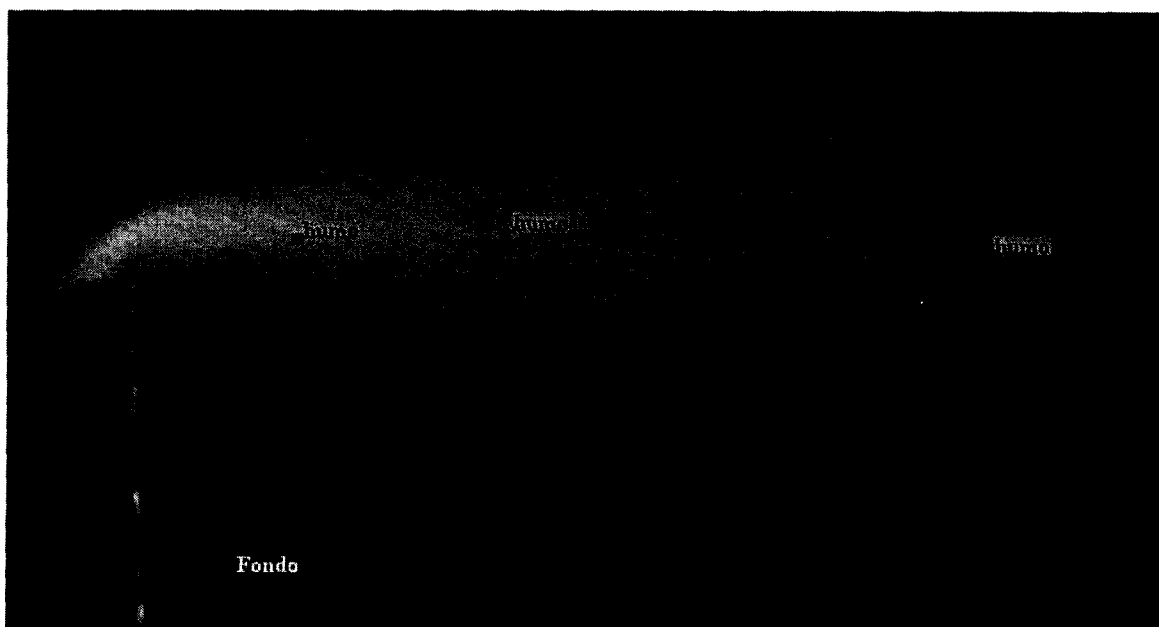


Figura 38: Puntos de muestreo para la experiencia, fondo, humo, humo1 y humo2.

resenta la variación de la escala de gris en cada fotograma y los valores estadísticos.

En la línea roja, se toman como umbral de máxima concentración pero debido a las características de la obtención de las imágenes en la CCD no se puede obtener

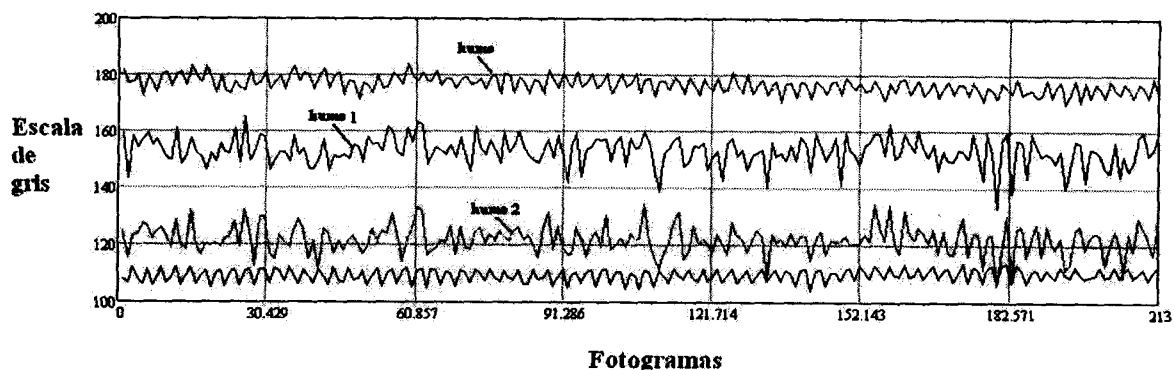


Figura 39: Comportamiento de los puntos de referencia, fondo, humo, humo1 y humo2.

información más allá de ciertos límites en los fotogramas. Las mismas observaciones fueron realizadas por Ohba²⁰ donde hace referencia a una región de baja linealidad, debido a que la luz no puede atravesar la zona de humo de elevada concentración. Se justifica de esta manera el comportamiento de la curva de la Figura 35 en valores más allá de 196 niveles de grises.

Los valores de escalas de grises cercanas a la chimenea representan solo la concentración en la superficie de la columna de humo, y no su interior. Si la toma de imágenes es cercana a la chimenea, los valores estadísticos se ven afectados significativamente en la gráfica concentración versus escalas de grises.

En la Figura 35, el intervalo perteneciente [176,196] posee valores de escala de gris distintas, con iguales concentraciones, debido a que los valores de la concentración de humo, pertenecientes a la columna exterior del penacho, presentan una distribución homogénea de escala de gris. Por tal motivo se realiza un procedimiento para analizar el proceso de dispersión ubicado en puntos alejados de la chimenea y no en su entorno inmediato.

En la Figura 40 se representa el intervalo de trabajo.

²⁰M. Ohba. Studies on Measurement Techniques of Video Images for Gaseous Diffusion Around a Building. Vol.41-44. p.2768.

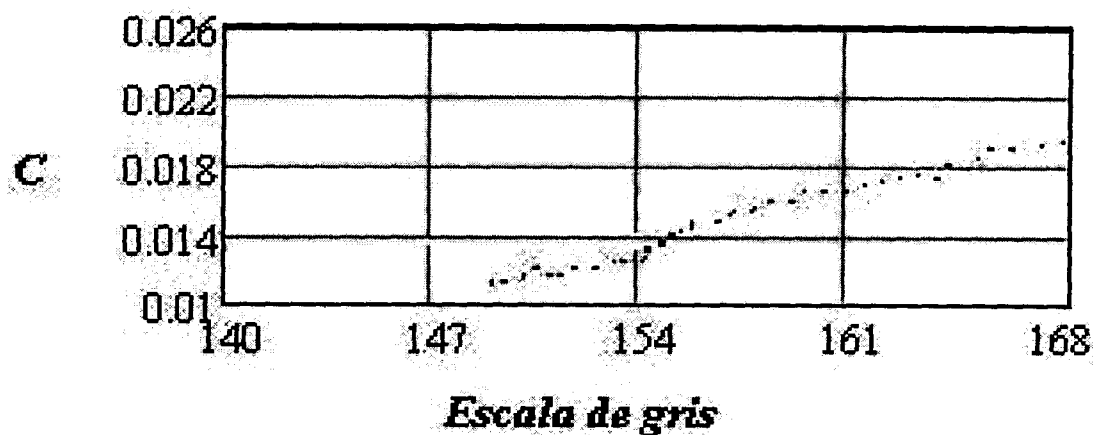


Figura 40: El intervalo de trabajo [140, 170].

En la Figura 41, se realiza un análisis de comparación de valores experimentales de dispersión vertical de la pluma en una configuración semejante al modelo experimental para estabilidad atmosférica D y estabilidad atmosférica E²¹.

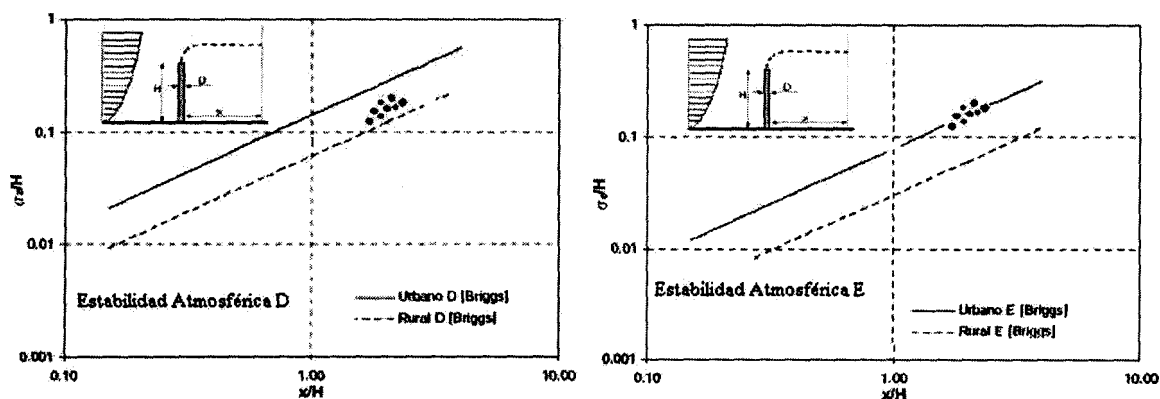


Figura 41: Curvas de Briggs.

La curvas de Briggs son representaciones gráficas empíricas obtenidos de nu-

²¹A. Wittwer. Simulación de Viento Atmosférico en Procesos de Dispersión de Contaminante en un Túnel de Viento. Porto Alegre Agosto 2006. Cap 7. p.137.

merosos ensayos experimentales realizados en la atmósfera, relacionando $\frac{\sigma_z}{H}$ con $\frac{x}{H}$ que delimitan una región, la primera se denomina Urbana y la segunda Rural. Las gráficas son elegidas según la estabilidad atmosférica y la configuración del modelo.

Se elige condiciones E y D porque son próximos a la estabilidad neutra (que corresponde a las características del túnel de viento donde se realizaron los ensayos).

Los puntos visualizados en la curva de Briggs se obtienen a partir de los resultados experimentales de este trabajo de tesis (ver Figura 32). Solo se representan los valores de σ_z que se ajustan en forma aceptable a los valores esperados (después de una distancia de 140 metros a la fuente de contaminante).

De esta manera, una vez establecido los parámetros necesarios para el análisis del proceso de dispersión (σ_z , intervalo de trabajo, etc.), se realiza el procedimiento de cálculo de la concentración de contaminante.

6.3.4. Procedimiento para Calcular la Concentración de Contaminante

El proceso de calibración del sistema óptico, se realiza mediante la vinculación de las escalas de grises de la línea de máxima concentración en la imagen y la ecuación de la concentración del modelo de dispersión de Gauss simplificado. Como resultado de dicha operación se obtuvo una gráfica que vincula numéricamente las escalas de grises y la concentración, con la finalidad de realizar mediciones cuantitativas en una región de la imagen digital.

La Figura 42 representa un fotograma de la columna de humo en el canal de viento. Se observa la columna de humo con una velocidad de viento de 10.11 m/seg, y en especial las posiciones donde se realizarán los cálculos de concentración P1, P2, P3 y P4. El ejemplo de la Figura 43, representa un caso donde las ecuaciones del modelo reducido de Gauss no se puede aplicar, debido a que el objeto introducido en el canal de viento ofrece interferencia en la columna de humo y las ecuaciones válidas para el modelo reducido de dispersión se alejan significativamente de los valores esperados.

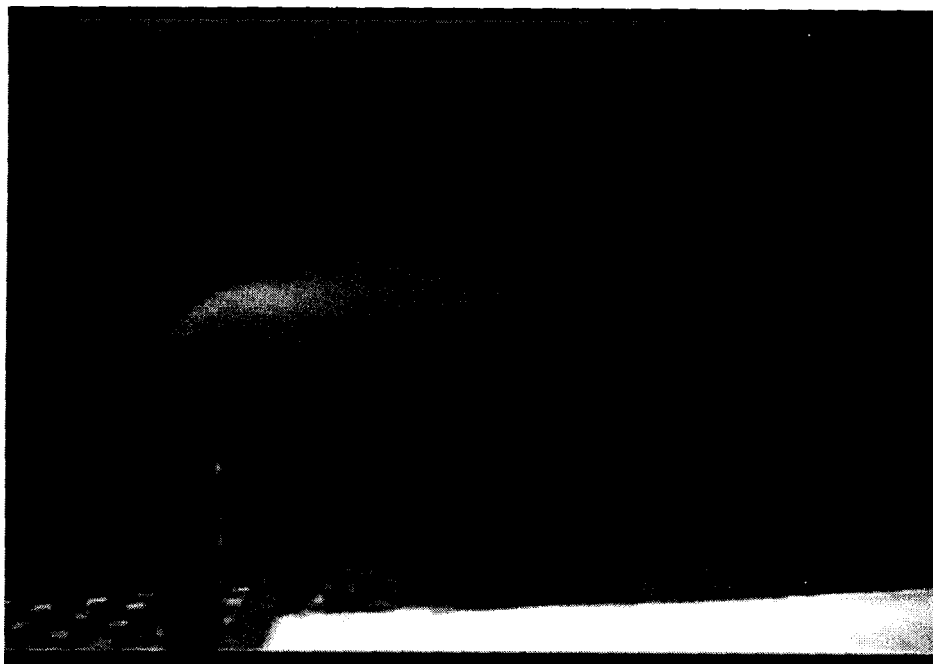


Figura 42: La columna de humo en el canal de viento.

Para analizar el caso, se realizó un algoritmo implementado en Visual C++ 6.0, que permite calcular la media aritmética de las escalas de grises de 350 fotogramas mediante en una región rectangular en la posición P3,(ver Figura 44).

Se define la región en la ventana principal en la escena y una ventana secundaria denominada Histograma establece la media aritmética de la escala de gris en la posición $P3 = 157,1$. Se obtiene el valor de concentración asociada a la escala de gris utilizando la gráfica de calibración antes calculada. El ejemplo de la Figura 45, ilustra el procedimiento.

6.4. Consideraciones Finales

Los resultados obtenidos, se limitan a calcular la concentración en relación a la escala de gris en el sentido z según la ecuación (14). En la Figura 43 la CCD captura la imagen perteneciente a la superficie de humo en los puntos resaltados

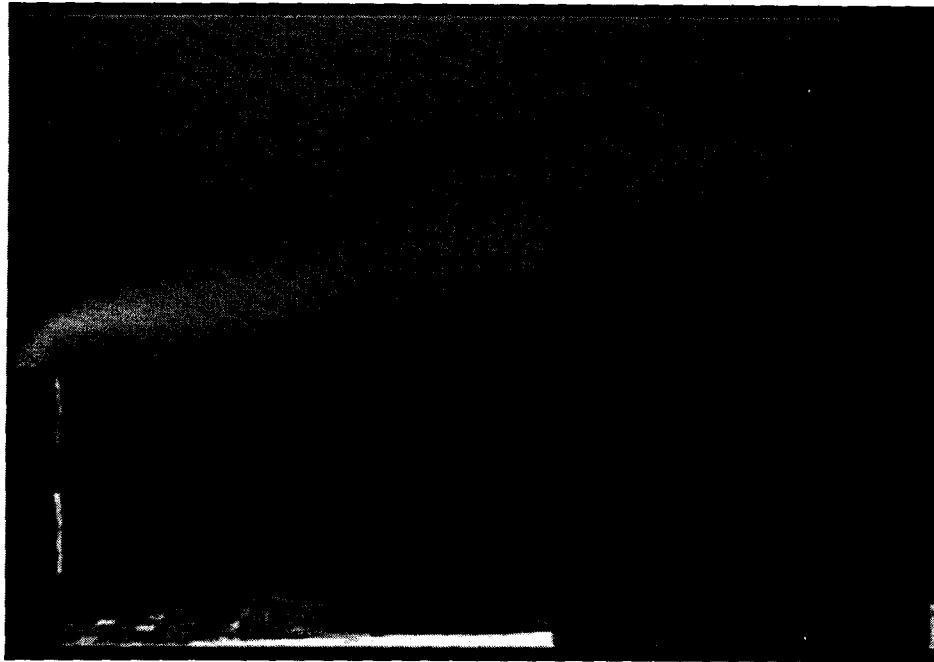


Figura 43: Objeto en el canal de viento interfiere a la columna de humo.

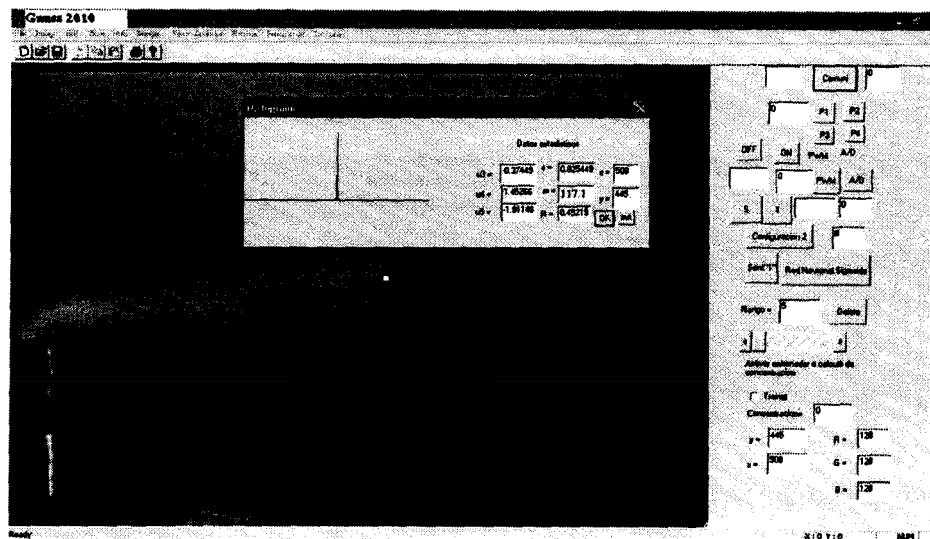


Figura 44: Software encargado de calcular la media aritmética de la escala de gris.

como humo y humo1, estableciendo una limitación del uso de la CCD en el cálculo de la concentración en toda la columna de humo.

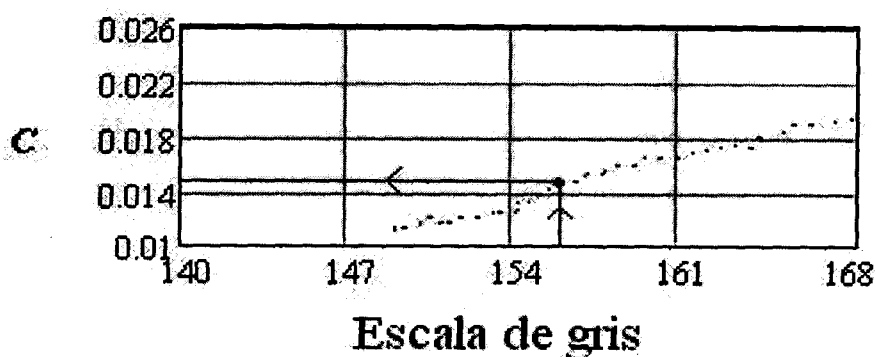


Figura 45: Gráfica de la concentración versus escala de gris.

Solo se representan los valores de σ_z que se ajustan en forma aceptable a los valores esperados, esto sucede a partir de una distancia superior a los 140 metros de la fuente de contaminante. En este sentido, se puede utilizar instrumentos de medida de contaminante en regiones cercanas a la chimenea, donde la toma de datos es relativamente sencilla y realizar el análisis de imágenes en zonas alejadas de la fuente de emisión.

El análisis se considera válido desde las regiones cercanas al punto humo2 hacia la derecha. En ese sentido, este trabajo se puede complementar con el realizado por Wittwer [35], donde sus resultados experimentales tienen mayor precisión en las cercanías de la fuente de emisión.

Una forma de mejorar el procedimiento de cálculo de la concentración de contaminante es realizar un ajuste de curva de los valores experimentales de la escala de gris versus concentración. De esta manera, la expresión obtenida podría ser implementada en otro software o programas matemáticos permitiendo de esta manera extender su utilización.

En el próximo capítulo, sobre la base de este procedimiento desarrollado para la evaluación de la dispersión mediante procesamiento de imágenes, se profundiza el análisis mediante la aplicación de herramientas estadísticas a los valores promediados de los fotogramas representativos del proceso.

7. La Estadística en el Proceso de Dispersión

7.1. Análisis Estadísticos de Escala de Gris en una Región Rectangular

En las secciones anteriores se describió al modelo de la pluma de Gauss de dispersión asumiendo que las concentraciones en la pluma (vertical y lateralmente) pueden representarse por curvas parecidas en su forma a las funciones estadísticas de distribución estándar normal (ver pag. 33), lo cual puede resumirse diciendo que los valores de concentración media presentan una distribución espacial Gaussiana.

Cuando se trabaja con sucesivos fotogramas que representan la evolución del campo de concentraciones en el tiempo, es posible, hacer una evaluación estadística, tanto de una región rectangular de cada imagen, como así también de los valores correspondientes a los sucesivos fotogramas. En este análisis, la evolución estadística fundamentalmente se aplica a la serie de fotograma. Es decir, se considera a las sucesivas imágenes representativas de un proceso temporal asociado al proceso de dispersión. Por ejemplo, la interferencia de un obstáculo en la pluma de emisión, provocará además de la modificación del campo concentraciones medias, una variación de la distribución de la probabilidad asociada a las concentraciones fluctuantes en un punto o región determinado.

En el presente trabajo se utilizan algoritmos de segmentación para la extracción de la columna de humo en los fotogramas y la implementación de la fórmula (12) permite el empleo de herramientas estadísticas. Los fotogramas tienen una resolución de 8 bits asignando 0 al negro y 255 al blanco. De esta manera, la mayor concentración de humo se ve en la imagen como una zona más blanca y por lo tanto el valor del nivel de gris correspondiente es mayor.

Cuadros posicionados en lugares diferentes de una imagen digital pueden ser comparados empleando parámetros estadísticos tales como: el promedio, desviación estándar (STD), coeficientes de variación (CV). Los mismos, describen el compor-

tamiento de la variable aleatoria que en este caso es la escala de gris. La Figura 36 puede ser resumida mediante la Tabla 5 según los casos (ver pag. 56).

Tabla 5. Resumen de los parámetros estadísticos según los distintos casos

Casos	Chimenea	STD	CV	Fondo	STD	CV
caso 1	181.83	9.77	5.40	114.87	2.36	2.05
caso 2	182.62	6.34	3.47	114.35	2.48	2.17
caso 3	175.35	7.55	4.31	112.10	2.58	2.30
caso 4	193.22	13.49	6.98	117.30	2.64	2.25
caso 5	196.46	7.96	4.05	113.63	2.61	2.30
caso 6	182.57	5.81	3.18	113.90	2.51	2.21

La columna Chimenea representa la media de la escala de gris a la salida de la chimenea, la columna Fondo representa la media de la escala de gris del fondo de la escena. Para obtener los valores de la Tabla 5, se realizó un algoritmo sencillo permitiendo de esta manera obtener la media de la escala de gris, STD y CV en una región de la imagen rectangular. En forma automática, el programa captura el sector seleccionado y realiza el trabajo estadístico en los sucesivos fotogramas (ver Figura 44). La STD es una medida de la variación de los valores de la población en relación a la media. Una forma de medir el efecto de la dispersión es relacionar el STD con el promedio, surgiendo así el concepto CV.

Pueden existir dos regiones en la imagen que posean la misma media de la escala de gris, y el CV mide el nivel de intensidad de las fluctuaciones de concentración. Una forma de relacionar la media de la escala de gris, STD y CV es la utilización de kurtosis y el skewness que permiten caracterizar poblaciones representativas de procesos temporales. En este sentido, ambos caracterizan la distribución de la población de las escalas de grises en una región rectangular en cada fotograma (ver pag. 47). El skewness proporciona en signo donde se ubican la población en relación a la media y la kurtosis la forma.

En una primera aproximación, se puede clasificar en forma directa lugares donde se encuentra humo o fondo, mediante la valoración de los coeficientes de la

Tabla 5. De esta manera, es razonable pensar, que al definir una posición en la columna de humo y un caso en particular, la escala de gris, STD y CV estaría comprendida entre las columnas de la tabla 5.

Se establecen cuatro puntos denominados P1, P2, P3 y P4 (ver Figura 46) para obtener los datos estadísticos. Se resume el resultado en la Tabla 6.

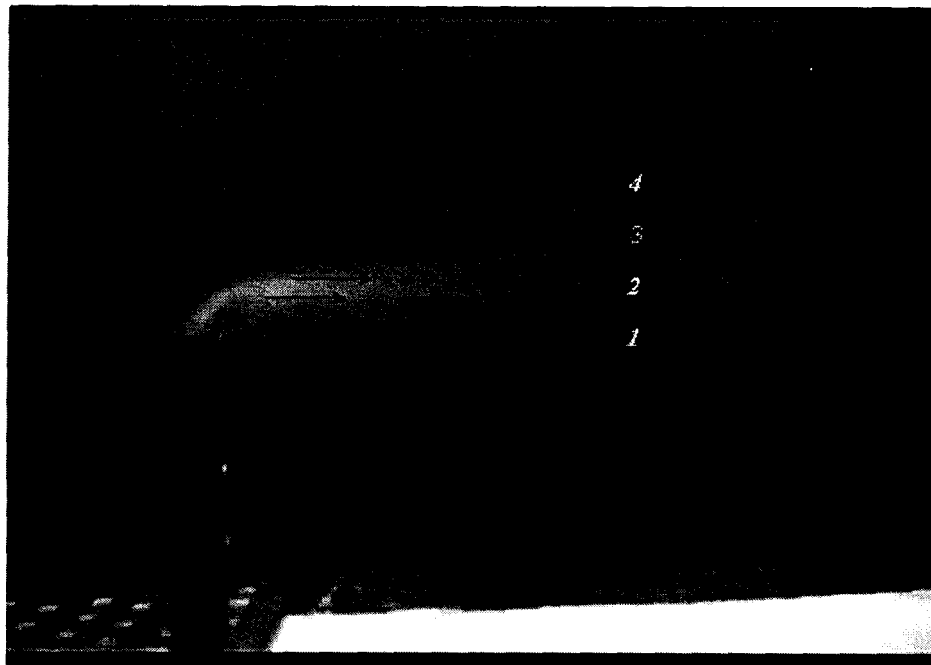


Figura 46: Comportamiento de la pluma en el canal de viento.

Tabla 6. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 1

Caso 1	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	662,356	129	6.88	5.32	12.90	3.57
P2	662,303	133	6.85	5.12	12.60	3.56
P3	662,247	131	7.96	6.07	20.85	4.22
P4	662,192	128	3.68	2.87	35.23	5.83

Los valores estadísticos en P4 tienden a los del fondo debido a que el mismo se ubica en la posición más alta y, por lo tanto, la tendencia estadística es coherente con los valores de Tabla (casos 1, 2 y 3).



Siguiendo el mismo razonamiento, P1 tiende a los valores de P4 debido a su ubicación en la imagen. La media de la población en el muestreo, representa solo el comportamiento medio de las variables en ese intervalo de tiempo y por lo tanto se debe interpretar los valores estadísticos al igual que los descriptores en su conjunto.

Tabla 7. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 2

Caso 2	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	662,356	129	5.88	4.54	12.37	3.62
P2	662,303	134	6.19	4.59	22.18	4.57
P3	662,247	132	7.21	5.46	14.86	3.71
P4	662,192	128	3.84	2.99	34.73	5.74

Tabla 8. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 3

Caso 3	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	662,356	134	6.11	4.53	14.02	3.77
P2	662,303	139	5.91	4.22	20.74	4.40
P3	662,247	134	7.94	5.90	10.65	3.30
P4	662,192	123	3.71	3.01	34.89	5.73

Debido al aumento de velocidad realizado entre el caso 1 hasta el caso 3, la columna de humo se estrecha y los valores de la media de la escala de gris de los punto P1 y P4 tienden al del fondo. Los valores de la kurtosis y skewness en el fondo de la escena superan 30.0 y 5.5 respectivamente. Es decir los valores en P4 tienden a los valores del fondo más que en el caso de P1.

Tabla 9. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 4

Caso 4	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	497,399	128	7.60	5.92	10.50	3.30
P2	497,343	143	6.67	4.64	10.36	3.37
P3	497,287	153	6.58	4.29	14.00	3.76
P4	497,231	151	7.83	5.17	12.73	3.53

Tabla 10. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 5

Caso 5	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	497,399	131	7.98	6.08	10.00	3.22
P2	497,343	147	6.54	4.42	21.32	4.38
P3	497,287	155	6.18	3.97	14.14	3.80
P4	497,231	150	8.09	5.36	9.68	3.23

La tabla 11 representa el caso 6 donde la velocidad en el canal de viento es máxima y además una parte de la pluma se dirige por encima del objeto (ver Figura 43). La media de la escala de gris de P4 aumenta de la misma manera que lo hace STD, por ese motivo los valores de la kurtosis disminuye al igual que skewness.

Tabla 11. Datos estadísticos de los puntos en la escena según caso 6

Caso 6	P(x, z)	región rectangular	STD	CV	kurtosis	skewness
P1	497,399	128	5.38	4.16	18.15	4.23
P2	497,343	142	4.86	3.41	23.84	4.73
P3	497,287	154	3.70	2.40	24.82	4.98
P4	497,231	152	5.37	3.53	17.23	4.11

Se destaca el comportamiento del punto P3, donde se evidencia un incremento de la escala de gris y una disminución de STD, quedando claro el aumento del nivel de intensidad de las fluctuaciones de concentración.

En todos los casos se realizó unas series de análisis estadísticos en regiones rectangulares de la imagen no vinculados entre sí. Se puede realizar una comparación de campos de concentración en regiones fijando un punto y estableciendo sus ocho vecinos. Los valores de sus descriptores pueden ser relacionados con otros ochos vecinos (en otra región u otros casos) mediante la función de correlación (ver pag. 47).

7.2. Comparación de Campos de Concentración Utilizando Descriptores

En la Figura 47 se muestra al P3 y sus ocho vecinos en dos situaciones diferentes (caso 1 y caso 6). En la Tabla 12 y 13, se resumen los valores de los descriptores kurtosis, skewness y suavidad R que representan la región definida (ver Figura 47). El

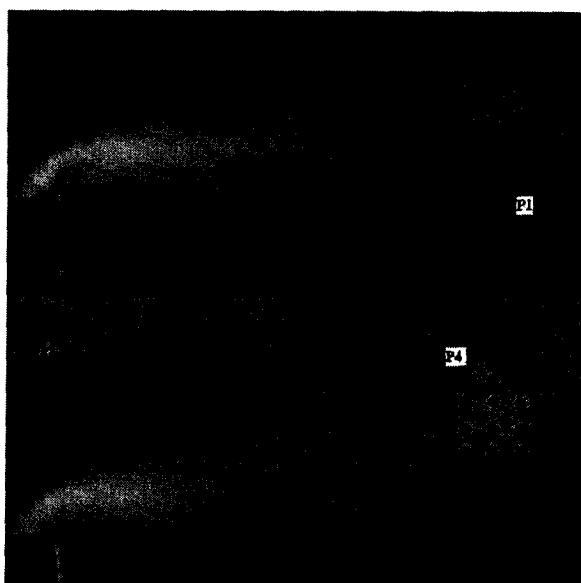


Figura 47: Caso 1 (A), caso 6 (B) y P3 (ocho vecinos).

resultado de la correlación entre el caso 1 y caso 6 es igual 0.76 y para el caso 1 y caso 2 se tiene una correlación igual a 0.97. Otra variante puede ser la utilización de unas series de regiones rectangulares ubicadas en diagonal y que pasen por el punto P3. Mediante la función de correlación se relaciona los cuadros pertenecientes a una región cercana a P3 (ver Figura48).

Tabla 12. Valores de los descriptores en P(x, z) en el caso 1

Variación	P(x, z)	kurtosis	skewness	R
Δx	662,247	20.85	4.22	0.98
	655,240	18.49	4.22	0.98
Δz	662,240	19.04	4.23	0.98
	669,240	17.04	4.05	0.98
	669,247	22.15	4.31	0.98
	669,254	37.54	5.93	0.98
	662,254	13.61	3.57	0.98
	655,254	13.42	3.57	0.98
	655,247	17.26	4.01	0.98

Tabla 13. Valores de los descriptores en P(x, z) en el caso 6

Variación	P(x, z)	kurtosis	skewness	R
Δx	497,287	24.82	4.98	0.93
	490,280	25.21	4.96	0.94
Δz	497,280	26.02	4.98	0.94
	504,280	25.87	5.03	0.93
	504,287	28.02	5.26	0.92
	504,294	10.65	3.29	0.92
	497,294	29.08	5.32	0.92
	490,294	26.18	5.06	0.93
	490,287	22.90	4.83	0.93

Los resultados de la operación de correlación se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Correlación entre casos

Casos	Correlación()
correlación(caso 1, caso 6)	0.66
correlación(caso 1, caso 2)	0.89

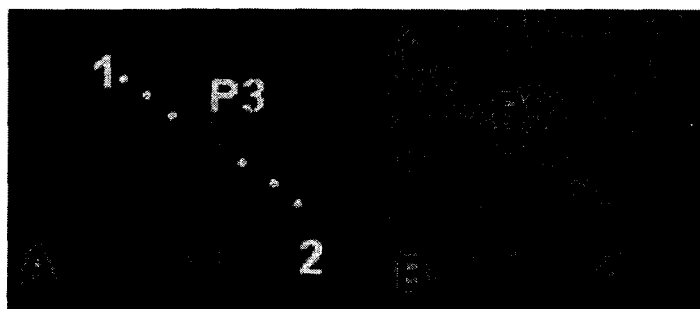


Figura 48: Caso 1 (A), caso 6 (B) y P3 (seis vecinos).

Los descriptores son herramientas útiles para comparar cuadros de imágenes, debido a la distribución aleatoria del fenómeno del proceso de dispersión de contaminante. Cuando se quiere estudiar campos de concentración en puntos específicos en una imagen digital la herramienta adecuada para esa tarea son los histogramas. Los mismos serán utilizados en la próxima sección.

7.3. Histogramas

A continuación se analiza el comportamiento de la población o serie representativa del proceso en un punto específico mediante el uso de histogramas que representan la probabilidad de ocurrencia de las escalas de grises en una región rectangular (ver pag. 47).

En la Figura 49 se observa como la columna de humo es afectada cuando un objeto es colocado en la trayectoria de la pluma. El fenómeno analizado en el canal de viento es de carácter aleatorio y la distribución de los niveles de gris en la región de interés permite un análisis de distribución empleando dichas herramientas.

Dos regiones pueden tener diferentes configuraciones espaciales, pero iguales representaciones visuales en el histograma. Se dice, en este caso, que el histograma

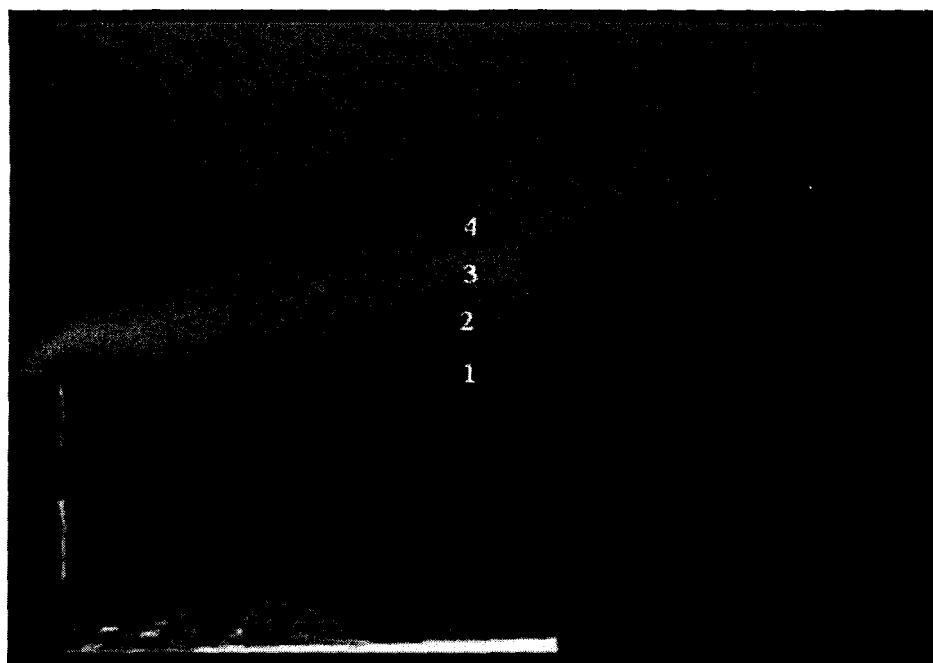


Figura 49: Columna de humo afectada por un objeto.

es un invariante.

En las Figuras 50, 51 y 52 se representa por medio del histograma la frecuencia de repetición de la escala de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 para los casos 1, 2 y 3 respectivamente. Se emplea para ello, un vector columna de 256 posiciones (ver capítulo 5). En las Figuras 53, 54 y 55, se observa la interferencia causada por el modelo en el canal de viento, sobre los puntos P1, P2, P3 y P4 para los casos 4, 5 y 6 respectivamente. Cada punto analizado es convertido en un vector columna de 256 posiciones para facilitar el proceso de análisis. En este sentido P3 representado en las Figuras 56 y 57 ilustran el comportamiento de la población según los casos en relación al punto mencionado.

En los casos 4,5 y 6, donde se introdujo el obstáculo que interfiere en el proceso de dispersión, la correlación entre histograma disminuye significativamente. Utilizando la función de correlación es posible cuantificar los niveles de concentración que se

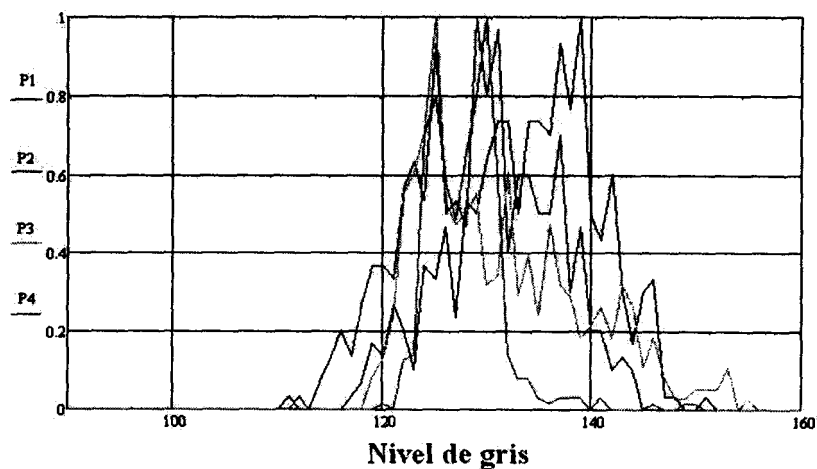


Figura 50: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 1).

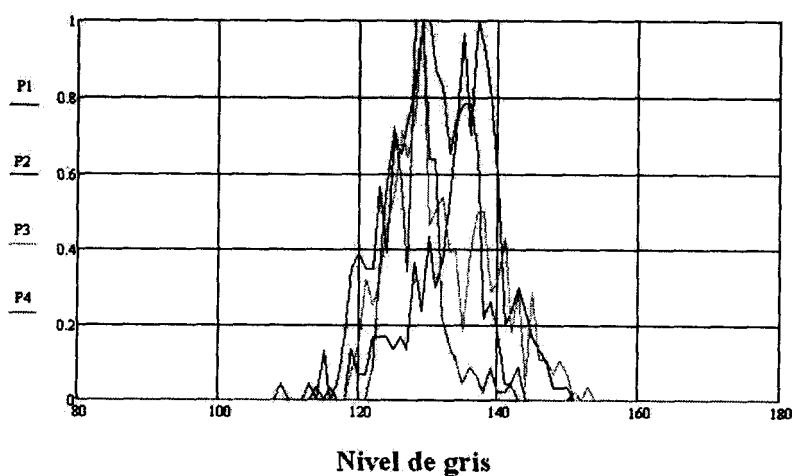


Figura 51: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 2).

resumen en la tabla 15.

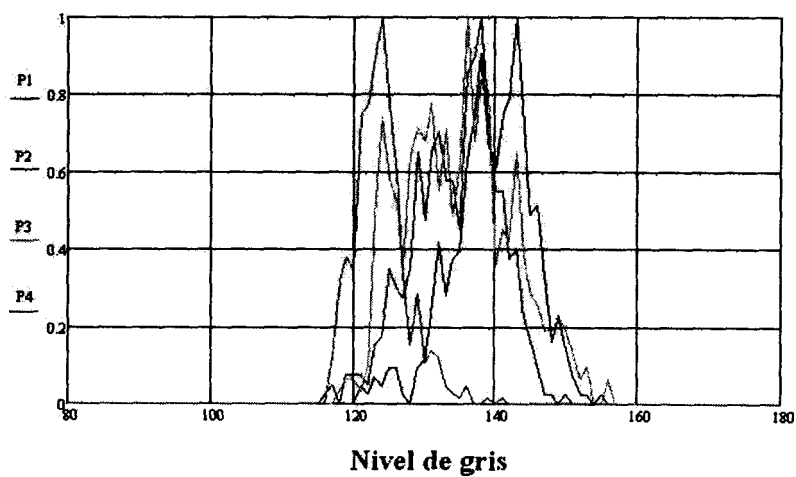


Figura 52: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 3).

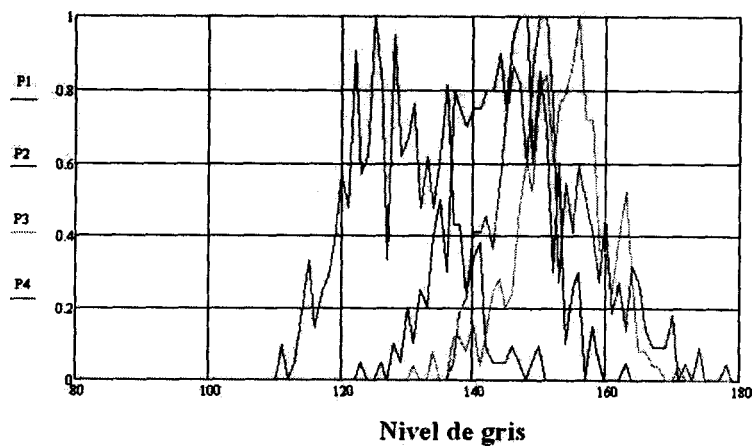


Figura 53: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 4).

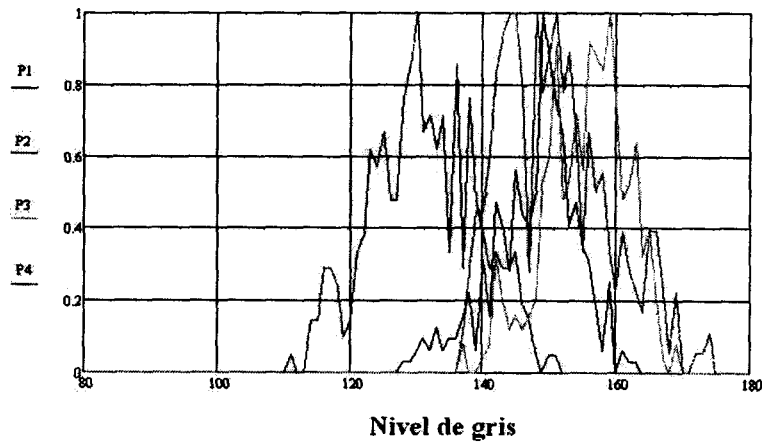


Figura 54: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 5).

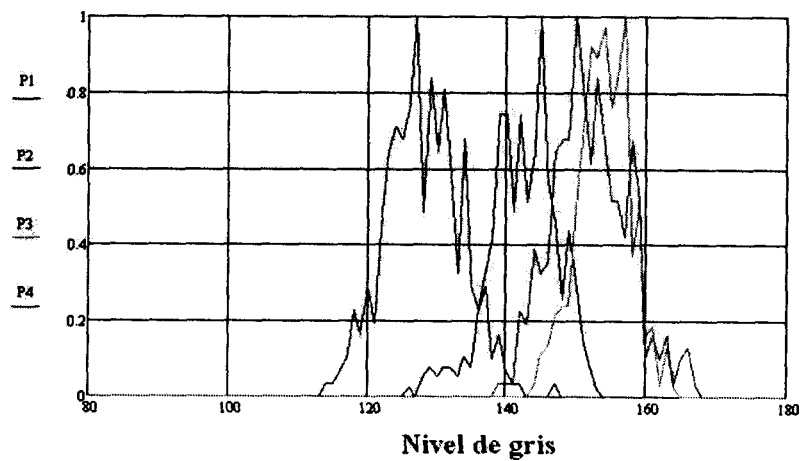


Figura 55: Histograma del nivel de gris en los puntos P1, P2, P3 y P4 (caso 6).

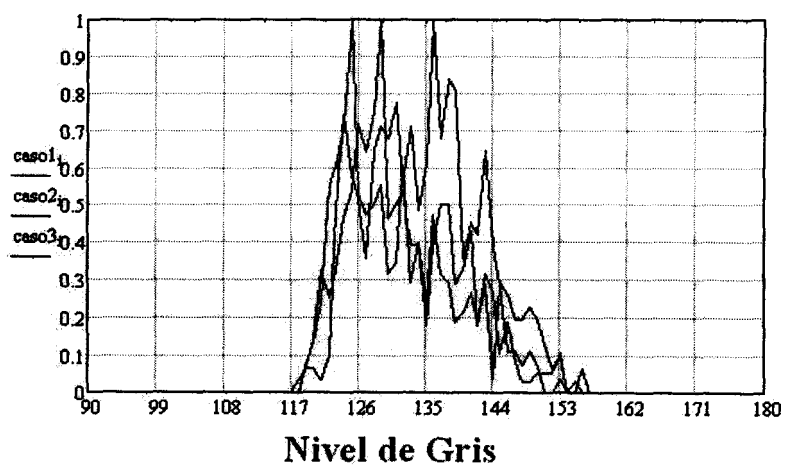


Figura 56: Histograma en el punto P3 según los casos 1, 2 y 3.

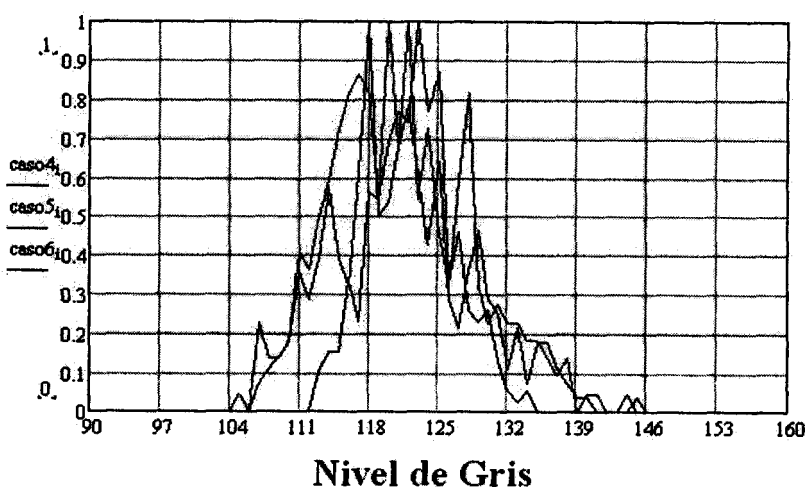


Figura 57: Histograma en el punto P3 según los casos 4, 5 y 6.

Tabla 15. Correlación de histogramas entre casos

Casos	Correlación
caso 1 y caso 2	0.889
caso 2 y caso 3	0.875
caso 1 y caso 3	0.835
caso 3 y caso 6	0.347

7.4. Función Probabilidad Acumulada

La probabilidad acumulada es otra herramienta de análisis estadística y de comparación de regiones de la pluma (ver pag. 47). En las Figuras 58, 59 y 60 se representa la función de probabilidad acumulada para los casos 1, 2 y 3 y se puede apreciar que la configuración es sensible a la la velocidad de viento y a las interferencias causadas en la pluma. El aumento de la velocidad genera una disminución del ancho de la pluma y las escalas de grises de los puntos P4 y P1 tienden a los valores del fondo con mayor rapidez que las escalas de grises de los puntos centrales P2 y P3.

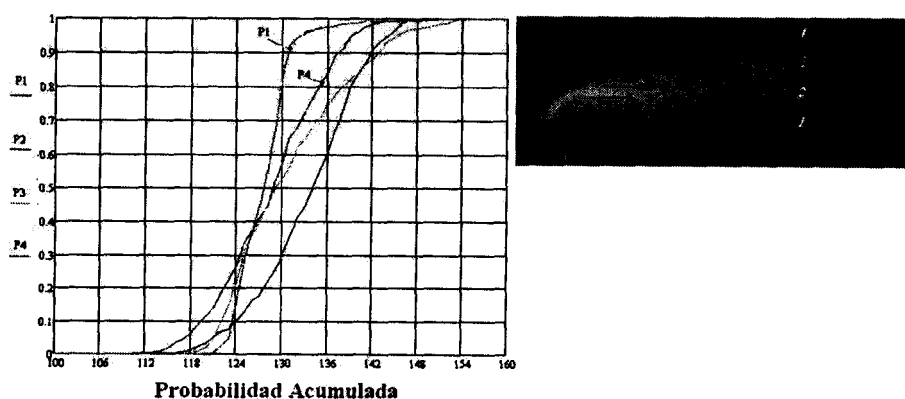


Figura 58: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 1).

En las Figuras 61, 62 y 63 se representa la probabilidad acumulada de los casos 4, 5 y 6. La pluma es afectada por el modelo a escala reducido en el canal de viento y el punto P1 se ve influenciado sobre la velocidad en la curva probabilidad

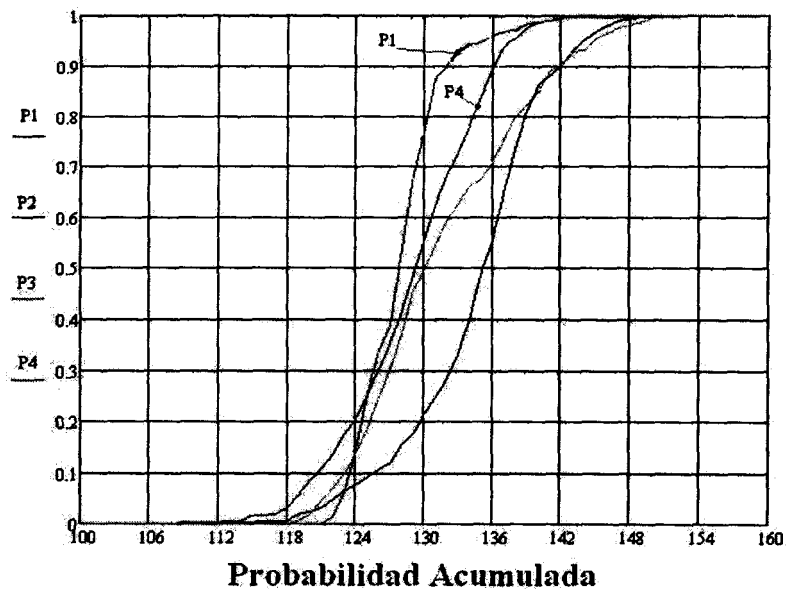


Figura 59: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 2).

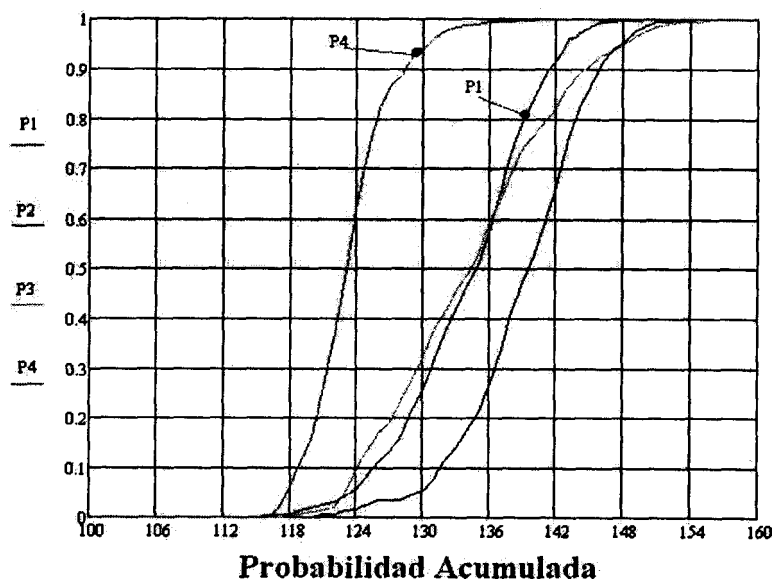


Figura 60: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 3).

acumulada debido a que gran parte del humo pasa por la parte superior del objeto y el comportamiento de la población tiende a la distribución del fondo de la escena.

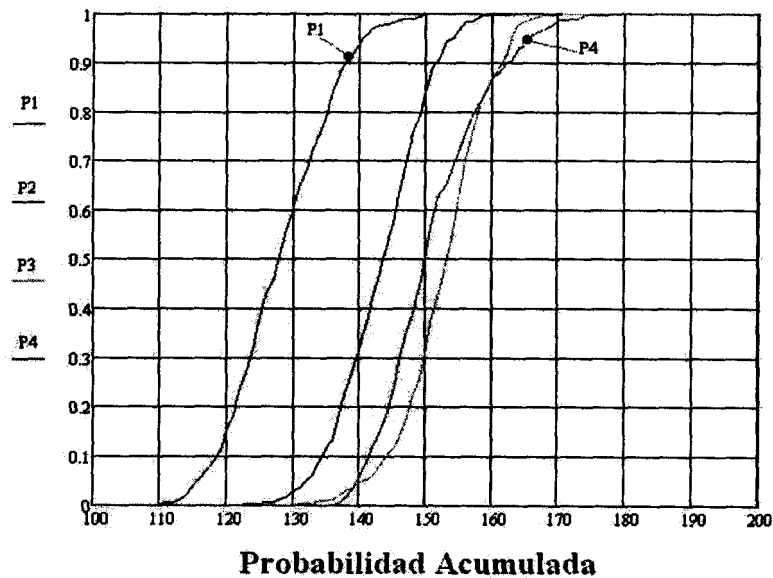


Figura 61: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 4).

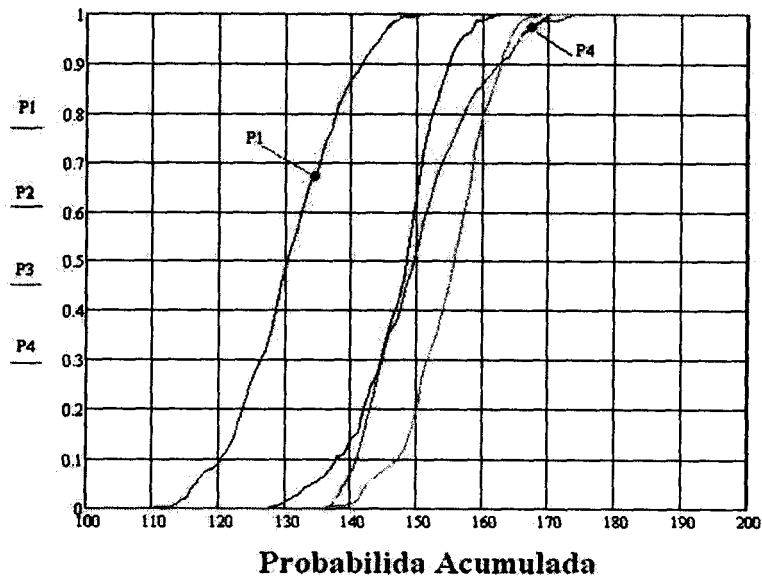


Figura 62: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 5).

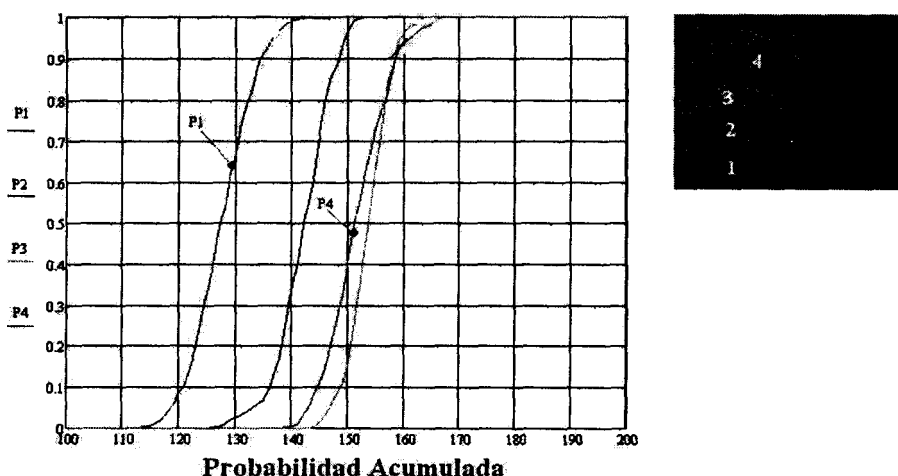


Figura 63: Función de probabilidad acumulada en los P1, P2, P3 y P4 (caso 6).

Los histogramas y la probabilidad acumulada representan, una herramienta de comparación de comportamientos de poblaciones en puntos específicos en los fotogramas y pueden ser guardados para su procesamiento en diferentes software matemático. En este caso, se utiliza el MathCad y los archivos se analizan como simples vectores.

7.5. Análisis de Resultados

Los descriptores estadísticos kurtosis y skewness permiten realizar comparaciones de niveles de concentración de contaminante en un sector de la pluma con un mayor nivel de profundidad que la mera comparación del campo de concentración media. El comportamiento de los descriptores se debe analizar en forma conjunta, ya que la información que brindan es complementaria. Es posible establecer umbrales para la clasificación de los niveles de concentración de contaminante de forma automática con algoritmos relativamente sencillos de implementar (ver Figura 44 y 45). Este tipo de análisis pueden aplicarse en procesos de dispersión, que por su complejidad, presentan comportamientos no Gaussianos. Los valores de los descriptores obtenidos en un sector de la imagen de la pluma pueden ser agrupados y correlacionados, permi-

tiendo realizar comparaciones de la concentración entre diferentes regiones. En este trabajo, los casos analizados de una pluma Gaussiana y de una situación más compleja producto de la interferencia de un obstáculo, ejemplifican la utilidad del uso de descriptores estadísticos en estudios de este tipo.

Con respecto a los histogramas, estos representan la distribución de la densidad de probabilidad asociada al proceso de dispersión, en este caso, a través de la frecuencia de repetición de la escala de gris de los fotogramas obtenidos en una región rectangular de la pluma en el canal de viento. Permite profundizar aún más el análisis del campo de concentraciones en la pluma de dispersión. El estudio permite establecer que plumas semejantes en modelos reducidos con flujos incidentes y configuraciones similares dan como resultado distribuciones de probabilidad semejantes. En este caso, además de las comparaciones entre las diferentes situaciones, los resultados se comparan con los obtenidos por Huber [12][13] en situaciones similares. Finalmente, también se correlacionaron los histogramas, aunque en este caso el coeficiente de correlación obtenido es apenas un indicador complementario.

La función de probabilidad acumulada, obtenida a partir de distribución de la densidad de probabilidad, constituye también una herramienta estadística complementaria para el análisis. En este caso permite analizar la influencia de la velocidad del viento en las características de la pluma, como así también los efectos causados por la interferencia de un obstáculo en el proceso de dispersión de contaminante. Eligiendo convenientemente una serie de puntos dentro de la pluma, es posible establecer una relación entre el ancho de la pluma y la velocidad del viento incidente. Las diferentes regiones de la curva representativa de la función de probabilidad acumulada presentan comportamientos distintivos de las diferentes regiones y situaciones. En este caso solamente se hace un análisis visual de las gráficas y de comparación cualitativa, pero se prevé realizar un análisis cuantitativo del comportamiento con representaciones gráficas de probabilidad más elaboradas.

8. Conclusiones

El trabajo presenta el desarrollo de un procedimiento para evaluar el campo de concentración en procesos de dispersión atmosférica de gases, utilizando modelos a escala reducida en un túnel de viento. Para obtener el campo de concentraciones, se recurre a la edición de videos y técnicas de procesamiento de imágenes. A través de la edición de videos, se generan fotogramas de la pluma de emisión simulada con humo.

Técnicas de procesamiento digital de imágenes permitieron la segmentación del humo en los fotogramas y el cálculo del promedio aritmético de las imágenes. A partir de una situación de dispersión básica en un terreno plano y homogéneo, considerando una distribución espacial Gaussiana de las concentraciones medias, se determinaron los coeficientes de dispersión en sentido vertical para cada posición a sotavento de la emisión. Este procedimiento constituye la calibración del sistema óptico y permite representar, mediante un gráfico, la relación entre la escala de gris y la concentración de humo en una posición determinada.

En situaciones de dispersión en terrenos más complejos o de entornos urbanos significativos, los efectos topográficos o edificios sobre la configuración del flujo y la turbulencia del viento, provocan distorsiones en el campo de concentración y las distribuciones dejan de ser de tipo Gaussiano. En el trabajo se evalúa un caso más complejo donde un obstáculo en la pluma de emisión genera este tipo de interferencias. El proceso de calibración, considerado en el ensayo que reproduce condiciones semejantes a las ideales, permite la evaluación de este tipo de situación, extendiendo la aplicación de este tipo de procedimiento a procesos de dispersión más complejos. No obstante, es necesario tener en cuenta las limitaciones observadas durante estos estudios para el diseño de nuevos experimentos.

Para analizar más detalladamente el proceso, se realizaron comparaciones de cuadros en diferentes regiones de la imagen digital, empleando herramientas estadísticas tales como la kurtosis y skewness. Se define una posición de interés y se generan los descriptores que van a ser utilizados en la comparación de los cuadros representados por las escalas de grises, a su vez relacionados con la concentración en la pluma.

Los descriptores representan estados de concentración en una región determinada de la pluma y pueden ser agrupados y correlacionados, permitiendo profundizar las comparaciones entre zonas y situaciones diferentes, y extender la comparación a resultados obtenidos por otros autores.

El uso de histogramas es una ampliación de la aplicación de herramientas estadísticas para mejorar el análisis de los resultados. La concentración está relacionada con la configuración de la función de densidad de probabilidad representada a través del histograma de frecuencias de las escalas de grises. La configuración de las distribuciones de probabilidad es semejante en casos o regiones de la pluma que representan situaciones semejantes. Complementariamente, las distribuciones de probabilidad acumulada constituyen una herramienta que permitiría comparaciones cuantitativas de las distintas zonas de las gráficas de distribución. En este trabajo, además de las comparaciones de diferentes zonas de la pluma y distintas situaciones, los resultados obtenidos se comparan con resultados provenientes de trabajos de investigación en la misma línea realizados por otros autores. Los valores experimentales obtenidos, además, sirven como herramienta para acondicionar la escena en futuros trabajos en túnel de viento, teniendo en cuenta la sensibilidad de los resultados a la iluminación.

El objetivo principal del trabajo de investigación es el desarrollo de un procedimiento de carácter experimental para el estudio de procesos de dispersión. Los resultados obtenidos y el análisis realizado permiten establecer que el procedimiento es adecuado para estimar campos de concentración y realizar un análisis general del proceso de dispersión en una región determinada de la pluma de emisión. Simultáneamente, es posible establecer las limitaciones de este tipo de procedimiento y las ventajas en relación al uso de instrumental de medición de concentraciones puntuales. La inexistencia de sensores de medición en el túnel de viento, la accesibilidad para la toma de datos en una región más extensa, el fácil montaje, bajo costo de implementación y menor tiempo de medición, son ventajas destacables del procedimiento desarrollado. El estudio permite además señalar las limitaciones de este tipo de procedimiento y definir el rango de utilización del mismo.

De forma complementaria, se propone al trabajo desarrollado, como una herra-

mienta pedagógica que, aplicada a un trabajo de laboratorio, permita articular temas vinculados a teoría de modelos, leyes de semejanza, turbulencia, difusión, etc., en los alumnos de Ingeniería.

Por otro lado, a partir del trabajo desarrollado, las comparaciones realizadas y las conclusiones establecidas, se abre un gran espacio para futuros estudios y mejoras en el procedimiento de análisis. En este sentido, se está evaluando el uso de dispositivos láser conectados a fotocélulas, con la intención de mejorar los resultados obtenidos. El uso de mayores frecuencias de muestreo de las imágenes, permitiría realizar análisis espectrales que permitan complementar la evaluación estadística. A su vez, esto posibilitaría comparar los resultados experimentales obtenidos a partir de este tipo de procedimientos con valores medidos con instrumental específico para el análisis de concentración de gases.

Referencias

- [1] Lord, G. R., Leutheusser, H. J. (1970), Wind tunnel modelling of stack discharge, Man and his environment, vol. 1, M. A. Ward, Editor, Pergamon Press Inc.
- [2] Pratte, B. D., Baines, W. D. (1967), Profiles of the round turbulent jet in a cross flow, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 93, No. HY6, Proc. Paper 5556, pp. 53-64.
- [3] Kamotani, Y., Greber, I. (1972), Experiment on a turbulent jet in a cross flow, AIAA Journal, Vol. 10, No. 11.
- [4] Counihan, J. (1969), An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel, Atmospheric Environment, 3, 197-214.
- [5] Standen, N. M. (1972), A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Natural Wind Simulation in Wind Tunnels, National Research Council of Canada, NAE, Report LTR-LA-94.
- [6] Isymov, N., Tanaka, H. (1980), Wind tunnel modelling of stack gas dispersion Difficulties and approximations, Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA, Ed. by J. E. Cermak, Pergamon Press Ltd.
- [7] Meroney, R. (1979), Lift off buoyant gas initially on the ground, Journal of Industrial Aerodynamics, 5, 1-11.
- [8] Isymov, N., Ferraro (1982), A study of stack gas dispersion and the extent of the aerodynamic cavity for the Ontario Hydro Darlington Nuclear Generating Station, BLWT-SS13-1982, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- [9] Donat, J., Schatzmann, M. (1999), Wind tunnel experiments of single-phase heavy gas jet released under various angles into turbulent cross flows, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 83, pp. 361-370.

- [10] Holder, D. W., North, R. J. North, y , G. P. Wood, Optical Methods for Examining the Flow in High speed wind Tunnels, Agaardograph 23, Nato advisory Group Aeronautical Research and Developent.
- [11] Poreh M.(1992). Fluctuations of line integrated concentrations across a CO_2 plume. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,41-44 2745-2755.
- [12] Huber H.A,(1988) Video Imagen of Dispersion in the Near Wake of a Model Building. Part II.Cross-Stream Distribution. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,32 (1989) 263-284. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam Printed in The Nettherlands.
- [13] Huber, A H. (1988), Video Images of Smoke Dispersion in the Near Wake of a Model Building.PartI.Temporal and Spatial Scale of Vortex Shedding. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics,31,189-223.
- [14] Ohba M,(1992).Studies on Measurement Techniques of Video Images for Gaseous Diffusion Around a Building. Vol 41-44. p.2761 a 2771.
- [15] Hinze J. Turbulence.(1975). Editorial McGraw-Hill.
- [16] Daily, J , Harlenman, D.(1966). Fluid Dynamics. Addison Wesley Publishing Company, INC., Mass., USA.
- [17] Costa, G., Isymov, N.(1990). A study of the acceptability of proposed stacks on University of Western Ontario Chemistry Building. BLWT-SS38-1990, University of Western Ontario, London,Ontario, Canada.
- [18] Newland, D.(1975). An Introduction to Random Vivrations and Spectral Analysis. McGraw Hill
- [19] Salas C.(2004). Aplicación de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación de Impacto Ambiental: Analisis de Proceso. Trabajo de Tesis.
- [20] Alvarez y Alvarez, Gisela M., Wittwer, Adrián R., Natalini, Mario. B.(2004). Estudio de procesos de difusión de gases contaminantes en la atmósfera mediante la técnica de visualización, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004, Universidad Nacionaldel Nordeste, Resistencia Chaco Argentina.



- [21] Wark, K., Ceil F.(1994).Contaminación del aire. Origen y Control. México: Editorial Limusa.
- [22] Bártulos D.(2006).Edición de Videos. Editorial Users.
- [23] Gonzáles C.(1992). Tratamiento Digital de Imagen. Editorial Editorial Addison Wesley / Díaz de Santos.
- [24] Jasio L. (2008). Programing 32 bit Microcontrollers in C Exploring y the PIC 32. Editorial Newnes.
- [25] Ray A. (2005). Imge Processing Principles and Aplications. Editorial John Wiley and Sons, Inc.
- [26] González C.(1992). Tratamiento Digital de Imágenes. Editorial Addison Wesley/ Díaz de Santos.
- [27] Sanchez R.(2008). MathCad paso a paso. Editorial Mc Graw Hill.
- [28] Herbert S.(1995). Programación en C y C++ en Windows 95. Editorial Mc Graw Hill.
- [29] Rodrigues H.(2001). Building Imaging Applications with Java Technology. Editorial Addison Wesley.
- [30] Cebbalos S.(1999).Visual C++ Aplicaciones para Win32. Editorial Ra Ma.
- [31] Pratt K.(2001).Digital Image Processing. Tomoll.Editorial John Wiley and Sons.
- [32] Pratt K.(2001).Digital Image Processing. Tomol.Editorial John Wiley and Sons.
- [33] Marcos, F.(2000).Tratamiento Digital de Voz e Imagen. Editorial Marcombo.
- [34] Murray R.(1970). Estadística. Editorial McGraw Hill.
- [35] Wittwer A.(2006). Simulación de Viento Atmosférico en el Proceso de Dispersión de Polución en un Túnel de Viento. Tesis doctoral. Universidad Federal de Rio Grande del Sur.