

## ANÁLISIS DEL CAMPO DE CONCENTRACIÓN EN UN PROCESO DE DISPERSIÓN TURBULENTO APLICANDO TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE VIDEO

R. D. Vazquez<sup>1</sup>, A. R. Wittwer<sup>2</sup>, E. Perondi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio Eléctrico Electrónico Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Resistencia

<sup>2</sup>Laboratorio de Aerodinámica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste.

<sup>3</sup>Departamento de Mecânica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul.

**RESUMEN:** Se presenta un procedimiento para la evaluación de la dispersión de contaminantes atmosférico, a través de ensayos en un túnel de viento, con un modelo reducido. El análisis del proceso de dispersión se realiza mediante técnicas de procesamiento de video articulado con el modelo gaussiano. El flujo atmosférico se simula mediante dispositivos de mezcla y rugosidad superficial, en tanto que la emisión se modela mediante una máquina de generadora de humo. El procedimiento permite una estimación del campo de concentraciones para una determinada extensión de la pluma de dispersión y no solo localmente, como en el caso de los sistemas convencionales de medición.

**Palabras clave:** dispersión atmosférica, procesamiento de imágenes, túnel de viento.

### INTRODUCCIÓN

Los contaminantes atmosféricos son transportados y dispersados, principalmente, por la acción del viento medio y la turbulencia atmosférica. El proceso de dispersión depende de un gran número de variables características del escurrimiento atmosférico, las condiciones meteorológicas y la duración de la emisión adquieren una gran importancia en el alcance de la dispersión de la pluma o penacho. Diferentes estudios muestran que las máximas concentraciones dependen de la altura de la chimenea, pero además son fuertemente dependientes de condición de estabilidad atmosférica. En las emisiones producidas en la capa límite superficial, es decir, a alturas menores a 100 m, la turbulencia mecánica generada por la topografía del terreno y los obstáculos próximos tienen una incidencia primordial.

Los estudios de campo para el análisis de este tipo de proceso de dispersión presentan dificultades tanto en lo referido al control como a los costos de las mediciones. Por este motivo, el desarrollo de metodologías de estudio basadas en el uso de modelos a escala reducida en túneles de viento es muy importante. Para poder modelar correctamente este tipo de fenómeno a escala de laboratorio, es necesario simular el flujo atmosférico y diseñar un modelo de la fuente de emisión teniendo en cuenta las condiciones de semejanza y la relevancia de los diferentes parámetros adimensionales (Wittwer et al., 2003).

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### *Modelo gaussiano de dispersión*

El modelo gaussiano es un modelo de uso común para el análisis de problemas de dispersión contaminantes. Básicamente, se supone que el penacho o pluma que se produce a partir de una fuente puntual, presenta una distribución de tipo gaussiana de los valores de concentración en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento como se muestra en la figura 1.

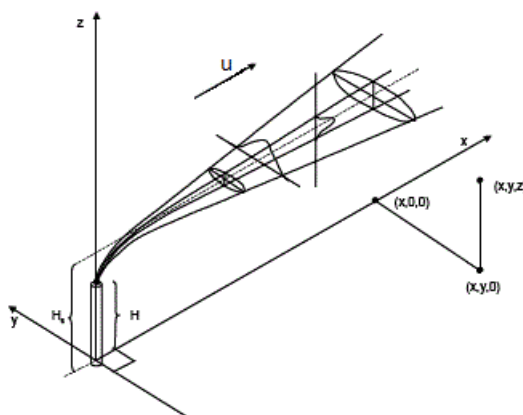


Figura 1: Esquema del modelo de difusión turbulenta de tipo gaussiano.

Los modelos gaussianos de dispersión describen, a través de una fórmula simple, el campo de concentraciones generado por una fuente puntual en condiciones meteorológicas y de emisión estacionaria. A medida que un penacho progresa en la dirección del viento, el modelo supone que el perfil de concentración, por el proceso de mezcla turbulenta, adquiere una configuración gaussiana. Si la condición atmosférica es neutra, se desarrollará un penacho en forma de cono. La concentración en la línea central de la pluma será máxima en las cercanías de la fuente emisora y disminuirá en las posiciones más alejadas a sotavento. A medida que la distancia viento abajo aumenta, los extremos de la pluma pueden impactar sobre el terreno. La concentración  $C$  de un contaminante en cualquier punto se expresa como se muestra en la ecuación (1):

$$C(x, y, z) \approx \frac{1}{U} QG \quad (1)$$

Donde  $U$  es la velocidad media,  $Q$  es el caudal de gas emitido y  $G$  es la curva de Gauss normalizada en el plano, esto es, el plano perpendicular a la dirección del viento,  $x$ .

En la expresión (1), se puede considerar a la concentración en el sentido  $z$  como se muestra en la ecuación (2):

$$c(x_n, z) = \frac{Q}{u \sqrt{2\pi\sigma_{z_n}}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_{\max}}{\sigma_{z_n}}\right)^2} \quad (2)$$

Donde  $C$  es la concentración dependiendo de la distancia  $x_n$ ,  $z$  es la altura,  $z_{\max}$  es la posición donde la concentración es máxima y  $n$  es un número entero que representa la posición de  $x$  en un intervalo  $[x_1, x_2]$ .

El valor de  $\sigma_{z_n}$  se obtiene de una curva denominada curva de Pasquill-Gifford-Turner (Henderson et al., 1988). Los diferentes parámetros  $x_n$  representan las distancias a la fuente de contaminante y por medio de la curva correspondiente a la condición atmosférica de trabajo se define un punto, luego se extiende una línea horizontal hasta cortar el eje de las ordenadas y así obtener  $\sigma_{z_n}$ .

En la figura 1, el origen de coordenadas se ubica en la base de la chimenea, con el eje  $x$  alineado en la dirección del viento. La emisión de gas contaminado, que denominaremos columna de humo, penacho o pluma inicialmente se desplaza verticalmente una altura  $\Delta h$ , pero luego se nivela para continuar en la dirección  $x$ , dispersándose a medida que avanza en las direcciones  $y$  y  $z$ .

Lo normal es que la columna de humo se eleve por encima de la chimenea, ya sea porque la emisión se produce a temperaturas más elevadas que la atmosférica, o directamente por la velocidad vertical de salida.

La primera hipótesis del modelo es 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.

Se supone que la fuente es puntual y la emisión es estacionaria de caudal  $Q$ .

Finalmente, se considera que el viento sopla en la dirección  $x$  a una velocidad constante en forma estacionaria. De esta manera es posible calcular la concentración  $C$  en un punto  $p(x_n, z_n)$ .

La condición de estabilidad atmosférica y las propiedades del terreno permiten definir los valores a utilizar en la expresión del modelo.

Cabe hacer notar que estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades con relieves y circulaciones atmosféricas complejas como se muestra en la figura 2.

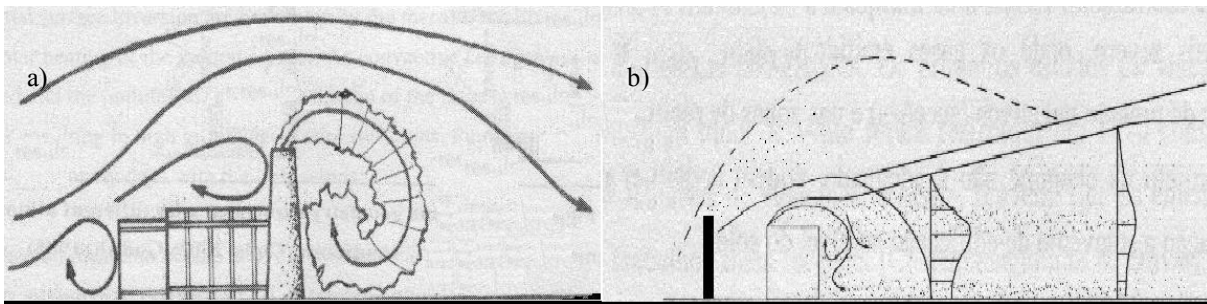


Figura 2: Interferencia en la trayectoria de la columna de humo por un objeto a) delante o b) detrás de la chimenea. .

Los obstáculos colocados delante o después de la fuente de emisión producen interferencias en la columna de humo afectando el resultado de la ecuación (2).

El trabajo de investigación desarrollado proporciona una metodología que articula la ecuación (2) con el campo de concentración en un túnel de viento en condiciones de trabajo donde la columna de humo no cumpla con el modelo de Gauss. Se realizan tomas de fotogramas y se utilizan técnicas de edición de video semejantes a los realizados en los trabajos de Huber (1988, 1989).

Se implementa un procedimiento de análisis que permita medir diferentes procesos de dispersión, transformando un método comúnmente cualitativo, como es la visualización de procesos turbulentos, en un método cuantitativo que permite obtener los valores que caracterizan el campo de concentración de contaminantes a lo largo de una pluma de dispersión.

Frente a los sistemas de medición de concentración que se usan para este tipo de estudios (Wittwer et al., 2007), este procedimiento, bien es de menor exactitud, pero permite analizar de forma simultánea el proceso para una determinada extensión de la pluma de dispersión y no solo localizadamente.

### PROCESAMIENTO DE IMAGEN DIGITAL

La toma de imágenes se realiza mediante una cámara denominada CCD y la obtención de los fotogramas se realiza utilizando la norma NTSC (Bártulos, 2006) de 525 líneas. El conjunto de líneas verticales y horizontales tienen una unidad fundamental indivisible denominado píxel siendo la unidad mínima que compone una imagen digital o fotograma.

La extracción de las imágenes de la columna de humo se obtiene a partir de algoritmos propuestos por Gonzáles (1992) y se estudian los píxeles de la imagen empleando una máscara de dimensión rectangular n por m. No se utiliza color y las imágenes son transformadas en escalas de grises Zanuy (2000).

La articulación de los conceptos mencionados y la utilización de un software de edición de video como por ejemplo el MathCad, permiten realizar operaciones de segmentación de información para el procesamiento digital en la columna de humo. Para realizar extracciones de información en imágenes se utiliza algoritmos de fácil implementación como se muestra en la figura 3.

```

promedio (a, b) :=
  k ← 0
  for Imagen ∈ a..b
    I ← RED (Imagen)
    k ← k + 1
    C ← I + C
  C ← C / k
  C
  
```

Figura 3: Algoritmo encargado de leer fotogramas y realizar el promedio de las imágenes leídas.

### DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

A partir de las leyes de semejanza y el análisis dimensional, es posible modelar vientos de capa límite, condiciones relativas a confort en edificios y procesos de dispersión atmosférica, utilizando un túnel de viento. La aplicación de este tipo de análisis, da lugar a una serie de criterios de semejanza y parámetros adimensionales. El trabajo propuesto, de carácter experimental y basado en el uso de modelos a escala reducida, se justifica a partir de las dificultades de la experimentación a escala real y la posibilidad de realizar mediciones bajo situaciones controladas.

La experimentación se realizará en un túnel de viento diseñado y construido en la Universidad Nacional del Nordeste. Es un túnel de circuito abierto cuya longitud total es de 7.5 m, y su cámara de ensayos consiste en un conducto de sección cuadrada de 0.48m de lado y 4.45 m de longitud (Vázquez et al., 2010). El esquema de trabajo se representa en la figura 4.

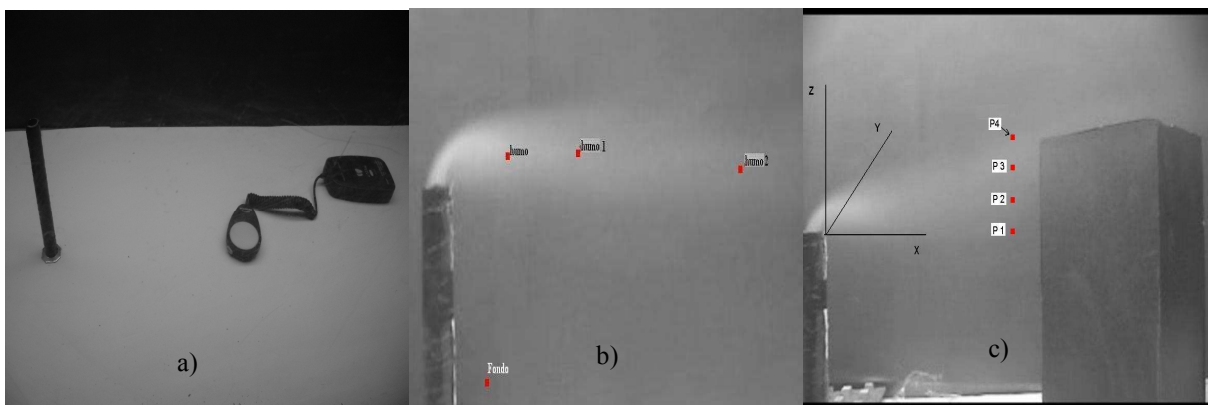


Figura 4: a) Imagen del canal de de viento. b) Columna de humo gaussiano. c) Objeto interfiere en el penacho.

La escena se debe acondicionar debidamente para facilitar la extracción de la columna de humo durante el ensayo, para ello se coloca el fondo oscuro y el suelo blanco.

Se define un eje de referencia y puntos donde se realizarán la toma de datos.

La figura 5 se obtiene empleando técnicas de procesamiento de video y algoritmos de segmentación, la posición  $x_n$  hace referencia a  $z_{max}$  donde la escala de gris es máxima.

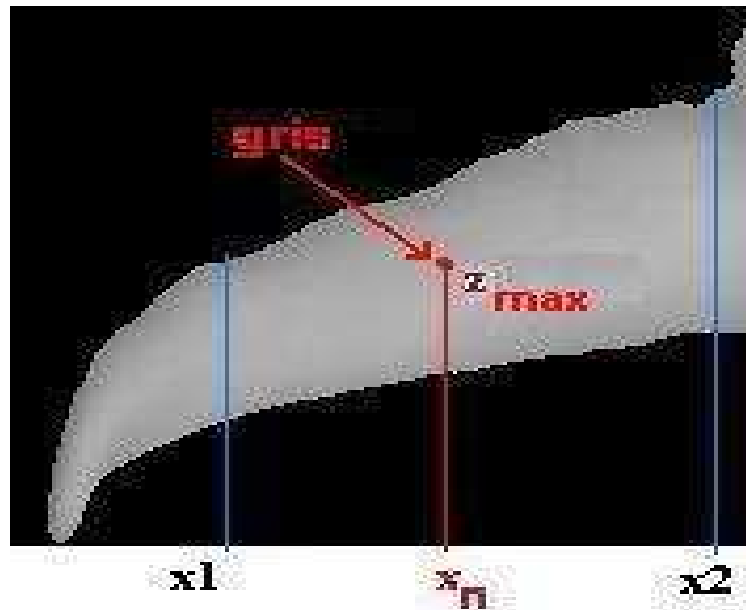


Figura 5: Columna de humo extraída del canal de viento mediante el empleo de algoritmos de segmentación.

En la figura 6 se muestra la imagen promediada de los fotogramas obtenido en la toma de video en el túnel de viento y una línea de máxima concentración, es decir la escala de gris es máxima. Se observa además en los puntos  $x_1$ ,  $x_n$  y  $x_2$  la variación de gris normalizada.

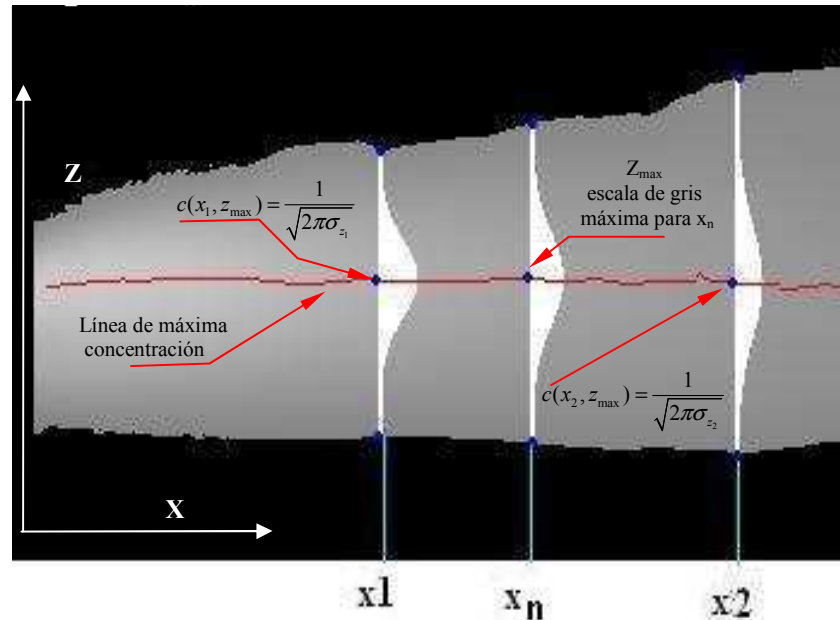


Figura 6: Promedio de la imagen de la columna de humo en el canal de viento y la línea de máxima concentración.

#### DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

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 aplicables según indica Alvarez et al., 2004, y de esta manera, es posible relacionar el comportamiento de un modelo de dimensiones a escala natural con otro modelo a escala reducida.

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 de luz recibida por el sistema óptico disminuirá debido a que el humo absorbe parte de la radiación (energía en forma de luz). Dichas afirmaciones fueron realizadas por (Liepmann et al., 1957) donde se demuestra 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 en una pluma, utilizando la escala de gris medida por un sistema óptico denominado CCD.

Los trabajos de los investigadores como por ejemplo Poreh (1992), Huber (1989) y Ohba (1992) plantean la evidencia experimental 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 con el campo de concentración que determinan los fotogramas.

Si se normaliza la intensidad de iluminación en una línea vertical en el plano z (ver figura 6 puntos  $x_1$ ,  $x_n$  y  $x_2$ ) se observa una correspondencia entre los valores obtenidos experimentalmente en el canal de viento y el factor exponencial en la ecuación de concentración de Gauss (2), como se observa en la figura 7.

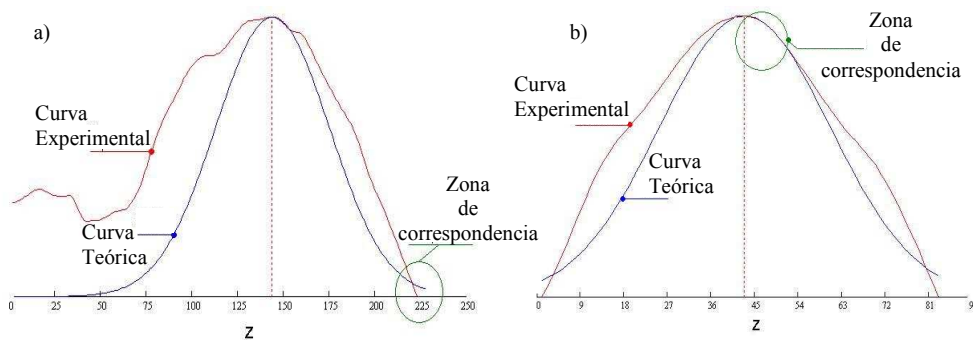


Figura 7: Curva experimental normalizada y curva teórica a) alejada de la fuente de contaminante y b) cercana a la fuente.

Los  $\sigma_{z_n}$  se obtienen aplicando un ajuste de curva denominado mínimos cuadrados y los valores necesarios para dicho cálculo se realiza en las regiones de la curva normalizada donde existan zonas de correspondencia según se observa en la figura 7 (círculo verde).

La curva roja representa la variación de gris normalizada a una distancia  $x_n$  de la fuente de contaminante y la curva azul muestra la curva de Gauss normalizada en el plano, esto es, el plano perpendicular a la dirección del viento, x empleando el  $\sigma_{z_n}$  según la curva de Pasquill-Gifford-Turner.

### OBTENCIÓN DEL CAMPO DE CONCENTRACIÓN

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 la fórmula (2). Donde  $z_{max}$  representa la altura de la máxima concentración de contaminante a una distancia  $x_n$  perteneciente a un intervalo comprendido entre  $[x_1, x_2]$  como se muestra en figura 6. De esta manera la concentración c depende de  $\sigma_{z_n}$  debido a que los valores de  $z_{max}$  y z se obtienen mediante el procesamiento de video.

Luego se asocia el valor teórico de concentración máxima del modelo simplificado  $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{z_n}}$  con la escala de gris en la posición  $z_{max}$ .

Los  $\sigma_{z_n}$  pertenecientes al entorno  $[x_1, x_2]$  se obtienen mediante el empleo de un ajuste de curva denominado mínimos cuadrados en las regiones de las escalas de grises normalizadas donde exista una relación de correspondencia entre valores teóricos y experimentales representado en la figura 8. La línea de tendencia entre ambas curvas es la utilizada para obtener  $\sigma_{z_n}$ .

Se relaciona la escala de gris con la concentración teniendo en cuenta que cada posición  $x_n$  perteneciente al intervalo  $[x_1, x_2]$  tiene su máxima escala de gris en  $z_{max}$  (línea roja figura 6).

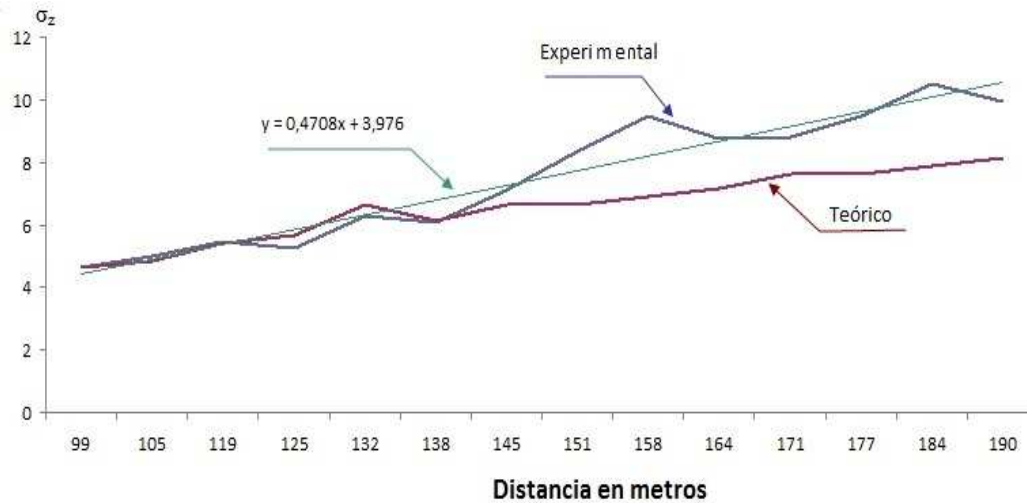


Figura 8: Valores experimentales y teóricos de  $\sigma_{z_i}$  y la ecuación de línea de tendencia.

Luego se asocia el valor teórico de concentración máxima del modelo simplificado  $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_i}}}$  con la escala de gris en la posición  $z_{max}$ , es decir, cada valor de  $z_{max}$  perteneciente al intervalo  $[x_1, x_2]$  establece una escala de gris de valor máximo según se muestra en la curva de color roja figura 6.

La figura 9 muestra la representación de la escala de gris con la concentración ubicando en abscisas la escala de gris máxima (obtenida en el punto  $z_{max}$ ) y en ordenada la concentración máxima (obtenida mediante  $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{z_i}}}$ ). Se realiza un ajuste exponencial (curva roja) para representar la relación entre escala de gris y concentración.

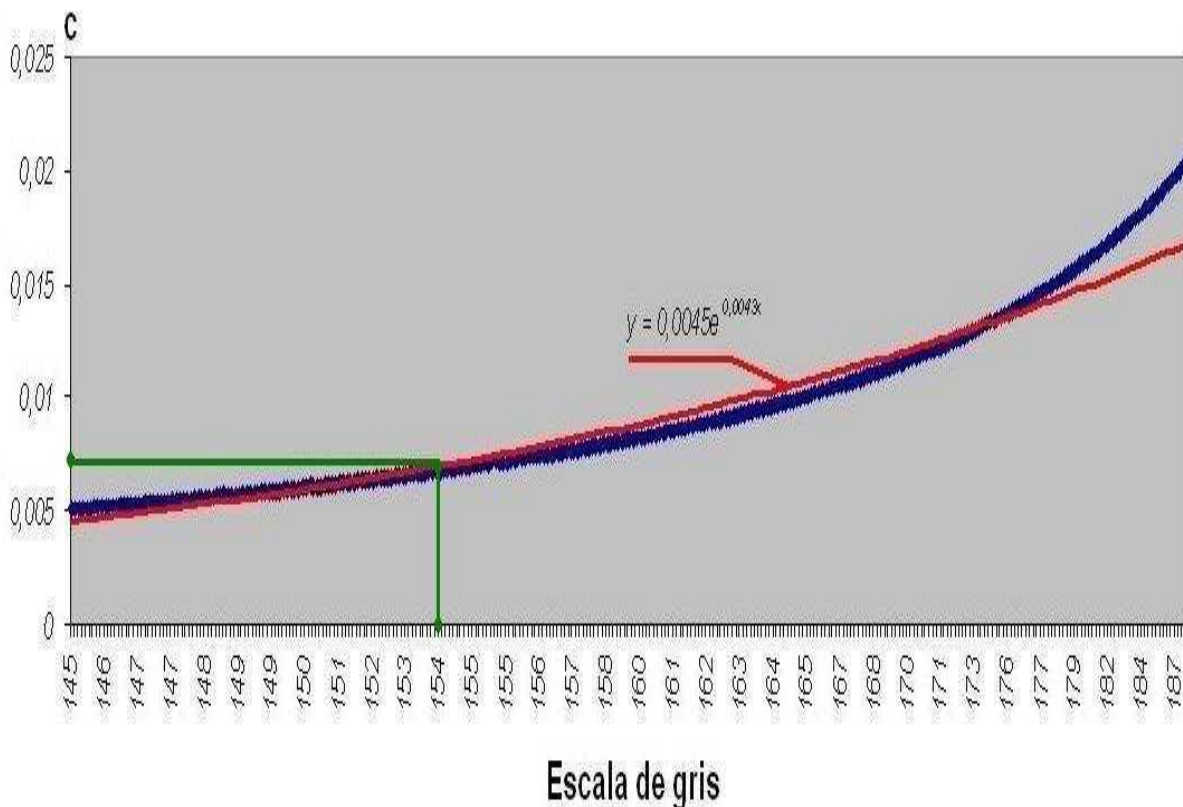


Figura 9: Relación experimental de la escala de gris y la concentración C.

Las escalas de grises pertenecientes a valores superiores a 171 pertenecen a niveles de concentración cercanos a la fuente contaminante, en estas condiciones la CCD pierde capacidad de penetración debido a estados de concentración muy elevado y la linealidad que permite vincular la escala de gris y concentración se alejan significativamente, dichas afirmaciones fueron también realizadas por Ohba (1992).

Se distingue en la figura 9 la escala de gris de 154 perteneciente a una posición alejada de la fuente contaminante ubicado en las inmediaciones del objeto según figura 5 c.

En el ejemplo mencionado la columna de humo se distorsiona y la concentración en dicho punto no se puede representar con la ecuación (2) pero utilizando la ecuación obtenida en el ajuste exponencial se puede estimar la concentración a partir de la escala de gris.

La fórmula exponencial de la gráfica de la figura 9 vincula la escala de gris y la concentración partiendo de un modelo de Gauss pero su utilización se extiende en aquellos casos no gaussianos.

La ecuación exponencial de la figura 9 relaciona la escala de gris y la concentración en procesos de dispersión donde la ecuación (2) no se pueda aplicar.

Su utilización es relativamente sencilla y se puede implementar en software de uso general como por ejemplo Visual C++ o Java.

## 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.

## REFERENCIAS

- Alvarez y Alvarez G., Wittwer A. R., Natalini M. B. (2004), "Estudio de escurrimientos turbulentos de capa limite en un túnel de viento de circuito abierto", IV Escola de Primavera em Transição e Turbulência, Pontificia Universidade Católica Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 27 de Setembro à 1º de Outubro de 2004.
- Bártulos D. (2006). Edición de Video. Cap.1 pp.28-29. Editorial Users.
- González & Woods, (1996). Tratamiento Digital de Imágenes. Capítulo 2, p. 32. Editorial Addison – Wesley / Diaz de Santos.
- Henderson B. Sellers S. An analytical representation for the Pasquill-Gifford-Turner  $\sigma_z$  curves for elevated sources. Department of Mathematics and Computer Scinces, University of Salford, Salford, England. *Atmósfera* October 3,1989, 2,p.p 111-124
- Huber, A H. (1988), Video images of smoke dispersion in the near wake of a model building. Part1: Temporal and spatial scales of vortex shedding", *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 31, 189-233.
- Huber, A H. (1989), Video images of smoke dispersion in the near wake of a model building. Part II. Cross-Stream Distribution: Temporal and spatial scales of vortex shedding", *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 32, 263-284.
- Lipmann ,H. A.Roshko.(1957), *Elements of Gas Dynamics*. Capítulo 10, p. 153-170. Editorial John Wiley & Sons. USA. New York.
- Ohba M,(1992). *Studies on Measurement Techniques of Video Images for Gaseous Diffusion Around a Building*. Vol 41-44. pp.2761 a 2771.
- Poreh M. Cermak J.(1992), *Fluctuations of line integrated concentrations across a CO<sub>2</sub> Plume*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Vol 2745-2755. p.41-44.
- Vazquez R. Wittwer R. Perondi.(2010), *Aplicación de Técnicas de Edición de Videos para el Análisis de la Dispersión de Contaminantes en Flujos Turbulentos* . *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol 14. Tema 8. p. 127

Wittwer A. R., Loredo-Souza A. M., Camaño Schettini E. B. (2003), “Modelagem do vento atmosférico para estudos de dispersão em túnel de vento”, *Ciência & Natura*, Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, UFSM, Brasil, Vol. Especial, 2003, pp. 217-221.

Wittwer A. R., Loredo-Souza A. M., Camaño Schettini E. B. (2007), “Simulação física de processos de difusão turbulenta de gases poluentes na camada atmosférica superficial”, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, AVERMA, Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Vol. 11, pp. 08.115-122.

Zanuy M. F. (2000), *Tratamiento Digital de Voz e Imagen y Aplicaciones a la Multimedia*. Capítulo 3, p. 120. Editorial Marcombo.

#### **ABSTRACT**

A procedure to evaluate the atmospheric pollutant dispersion process using wind tunnel tests is presented. Image processing techniques and the Gaussian model are using to analyse the concentration field. The atmospheric wind is simulated by mixing devices and roughness elements. The emission is modelled using a smoke generator. An estimation of the concentration field on an extension of the dispersion plume is obtained, different to local evaluation realized with conventional measure systems.

**Keywords:** atmospheric dispersion, Image processing, wind tunnel.