

## MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO EN EMISIONES

Javier García E\*; Guillermo Swayne B\*\*

El gobierno peruano ha promulgado leyes (el D.S-016-93-EM y el D.S-046-93-EM) según las cuales todas las empresas dedicadas a actividades de extracción, fundición y refinación de minerales así como actividades de hidrocarburos, están obligadas a establecer programas de monitoreo destinados a determinar la cantidad real de agentes contaminantes del aire emitidos por cada una de ellas, así como la calidad del aire en el entorno de las actividades contaminadoras [1].

Dentro de las emisiones problemáticas tenemos:

### 1.- Gases

El gas contaminador más importante es el  $\text{SO}_2$ . Sin embargo, algunas actividades mineras o metalúrgicas pueden emitir otros gases como:  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{AsH}_3$ , vapores de  $\text{Se}$ ,  $\text{Hg}$ , etc, altamente tóxicos para los seres humanos, animales y plantas. La necesidad de un programa para el monitoreo de estos gases en la actualidad, dependerá de sus volúmenes y lugar de emisión.

### 2.- Partículas

Se ha identificado partículas muy pequeñas, con diámetros menores de 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) que se ha demostrado, son nocivas para la salud humana

---

\* IDEA, Instituto de Estudios Ambientales, PUCP.

\*\* SAE, Servicio de Análisis Energético, Laboratorio de Energía. Sección Ing. Mecánica, PUCP.

dado que las partículas de este tamaño ingresan y permanecen en los pulmones.

Las partículas de mayor diámetro (partículas totales en suspensión, TSP), con frecuencia ocasionan otros problemas ambientales como la pérdida de brillo u oxidación de materiales y la reducción de la visibilidad. Por lo tanto será necesario tener un control de estos contaminantes particulados.

Dentro de los programas de monitoreo de aire se distinguen dos conceptos:

### **Inmisiones y Emisiones**

1. **Inmisiones.**- El monitoreo de inmisiones se realiza en el entorno de la actividad contaminadora. Se le denomina también monitoreo de calidad de aire.

Básicamente, los parámetros que requieren ser monitoreados, en este caso, son:

#### *Partículas*

- TSP (Partículas Totales en Suspensión).

El principio de operación de un equipo de medición de TSP se basa en el ingreso de aire a un recinto cubierto y su paso a través de un filtro mediante un ventilador de gran flujo a 1,1-1,7m<sup>3</sup>/min (High-Vol).

La concentración de la masa de partículas suspendidas en la atmósfera se calcula midiendo la masa de las partículas recolectadas así como el volumen del aire muestreado.

- PM<sub>10</sub> (Partículas menores a 10 micrómetros).

La masa de una partícula se obtiene por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3$$

R= Radio de la partícula

A partir de esta ecuación puede observarse que, dado que la masa es proporcional al cubo del radio de la partícula, una partícula de 20 micrómetros pesará 8 veces más que una partícula de 10

micrómetros. Es por esto que las mediciones de TSP presentan desviaciones por la presencia de algunas partículas relativamente grandes en el filtro. El muestreador TSP de alto volumen extrae el aire bajo el borde de la cubierta del instrumento. Mientras que, el muestreador  $PM_{10}$ , pasa el aire a través de un sistema ciclónico de entrada para retirar las partículas con un diámetro mayor o igual a 10 micrones antes de que ingresen a través del filtro.

### *Gases*

- $SO_2$

El muestreador de  $SO_2$  debe colocarse en un ambiente donde esté protegido del medio ambiente. El dispositivo de entrada del instrumento deberá encontrarse, por lo menos, a 3 metros sobre el terreno (un rango de 3 a 6 metros) y por lo menos a 20 metros de los árboles más cercanos. Debe de haber un flujo de aire sin restricciones a  $270^\circ$  alrededor del dispositivo de admisión. El instrumento deberá estar ubicado lejos de cualquier horno o canal de humo de incineración, para evitar falsas lecturas.

2. **Emisiones.-** El monitoreo de emisiones se realiza en la fuente o chimenea, por lo cual se le denomina “Muestreo de la chimenea”. Por lo general se muestrea gases y partículas simultáneamente.

En el caso de gases, existen en el mercado diversos equipos electrónicos de monitoreo. Los gases monitoreados son:  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  y  $CO_2$ . En el caso de partículas, que es el tema que abordaremos con mayor detalle, el equipo a utilizar es el “tren de muestreo”, cuya forma básica se presenta en la Figura 1.

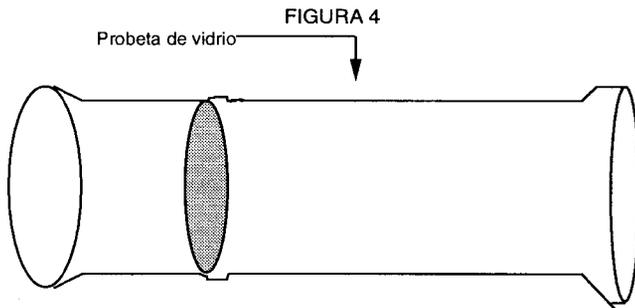
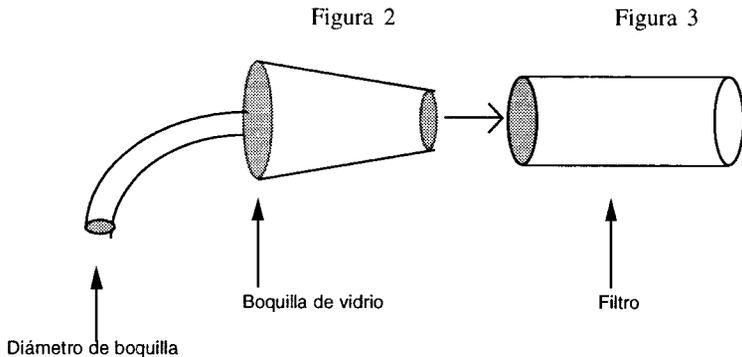
Las partes de este tren de muestreo son las siguientes:

- Una boquilla de succión de diámetro determinado por donde ingresan los gases.(Figura 2)
- Un filtro para colección de las partículas (“Silica Glass Microfibre Thimbles”) que va insertado en la boquilla (Figura 3).
- Una probeta que sirve de soporte para la boquilla y de protección para el filtro (Figura 4)
- Una sonda de 1,70 m de longitud aproximadamente donde van conectadas la boquilla, el filtro y la probeta.
- Una cinta calefactora para la sonda.
- Tres o cuatro “impingers” burbujeadores que sirven como condensadores y, además de evitar que el vapor de agua siga



circulando por el tren de muestreo, nos permiten hacer el cálculo de la humedad dentro del ducto.

- Dos botellas absorbedoras de  $\text{SO}_2$  que contienen agua oxigenada al 5% para oxidar al  $\text{SO}_2$  y formar  $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{ac})$  que queda retenido en las botellas. De esta manera se evita que este gas siga por el tren y deteriore el medidor volumétrico.
- Un medidor volumétrico de gases, que da lecturas de 5 litros/rev. Se utiliza acompañado de un cronómetro para calcular el caudal que pasa por él.
- Una bomba de vacío con regulación de flujo.



El primer paso para monitorear partículas en chimenea es ubicar el punto de muestreo en la chimenea. Este punto debe estar situado a por lo menos ocho diámetros después del último codo o desviación y a no menos de dos diámetros antes de la salida de la chimenea. Este punto debe tener todas las condiciones de seguridad necesarias para las personas que realizan el trabajo.

Seguidamente, hay que definir la cantidad de puntos que se debe tomar dentro de una sección determinada del ducto. Las Figuras 5 y 6 nos indican cómo deben estar situados los puntos de muestreo en una sección, dependiendo de las características del ducto (sección rectangular o circular).

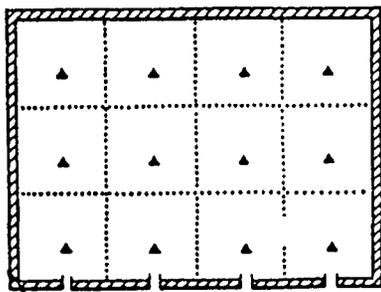


Figura 5. Puntos de muestreo en un ducto de sección rectangular [2]

Tabla 1. Número mínimo de mediciones en un ducto de sección rectangular.

Area de sección transversal para puntos de muestreo, m <sup>2</sup> (pie <sup>2</sup> )	Número de mediciones
Menor que 0,2 (2)	04
De 0,2 a 2,3 (2 a 25)	12
Mayor que 2,3 (25)	20

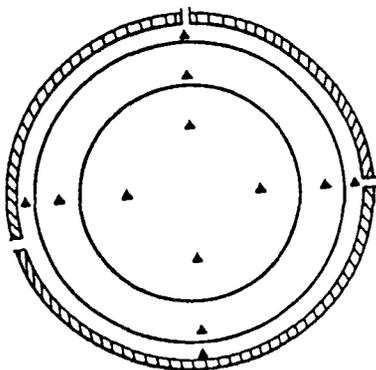


Figura 6. Puntos de muestreo en un ducto de sección circular [2]

Tabla 2. Posición de los puntos de muestreo en una chimenea Circular [2]

(Porcentaje del diámetro del ducto desde la pared interior hasta el punto de muestreo)

Número de puntos transversales en un diámetro	Número de puntos de muestreo en un diámetro											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14,6	6,7	4,4	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
2	85,4	25,0	14,6	10,5	8,2	6,7	5,7	4,9	4,4	3,9	3,5	3,2
3		75,0	29,9	19,4	14,6	11,8	9,9	8,5	7,5	6,7	6,0	5,5
4		93,3	70,4	32,3	22,6	17,7	14,6	12,5	10,9	9,7	8,7	7,9
5			85,4	67,7	34,2	25,0	20,1	16,9	14,6	12,9	11,6	10,5
6			95,6	80,6	65,8	35,6	26,9	22,0	18,8	16,5	14,6	13,2
7				89,5	77,4	64,4	36,6	28,3	23,6	20,4	18,0	16,1
8				96,8	85,4	75,0	63,4	37,5	29,6	25,0	21,6	19,4
9					91,8	82,3	73,1	62,5	38,6	30,6	26,2	23,0
10					97,4	88,2	79,9	71,7	61,8	38,9	31,5	27,2
11						93,3	85,3	78,0	70,4	61,2	39,3	32,3
12						97,9	90,1	83,1	76,4	69,4	60,7	39,8
13							94,3	87,5	81,2	75,0	68,5	60,2
14							98,2	91,5	85,4	79,6	73,8	67,7
15								95,1	89,1	83,5	78,2	72,8
16								98,4	92,5	87,1	82,0	77,0
17									95,6	90,3	85,4	80,6
18									98,6	93,3	88,4	83,9
19										96,1	91,3	86,8
20										98,7	94,0	89,5
21											96,5	92,1
22											98,9	94,5
23												96,8
24												98,9

La Tabla 1 nos indica el número mínimo de mediciones que se debe realizar según el área de la sección rectangular y la Tabla 2 nos da la posición de los puntos de muestreo en un ducto circular [2].

El segundo paso es hallar la velocidad de escape de los gases, debido a que el monitoreo debe ser isocinético; es decir, la recolección del material particulado debe realizarse a la misma velocidad con que los gases (y las partículas) circulan por el ducto (Figura 7).

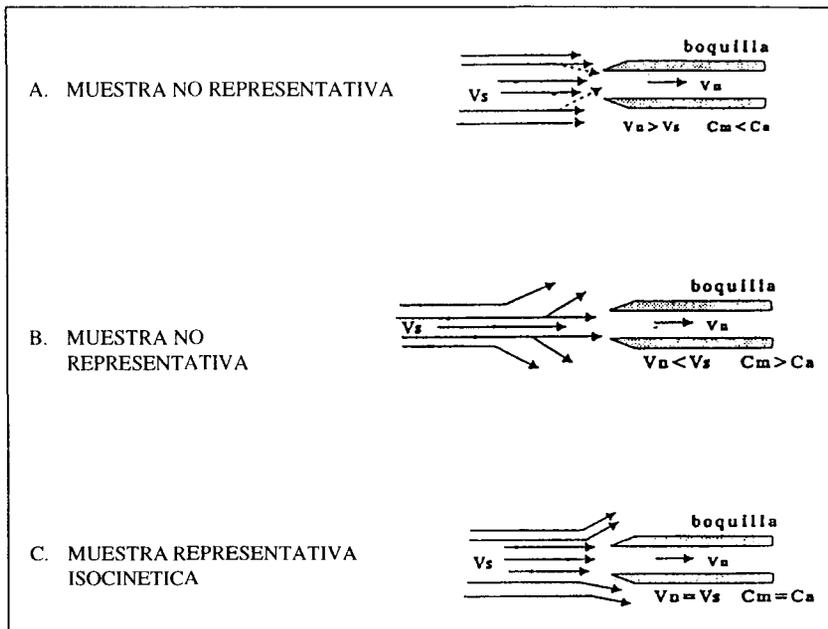


Figura 7. Toma de muestra en chimenea

$C_m$ : Concentración de polvo de la muestra

$C_a$ : Concentración de polvo de la boquilla

$V_n$ : Velocidad de ingreso de los gases a la boquilla del tren de muestreo

$V_s$ : Velocidad de los gases en el ducto

Tabla 3. Valores de caudal en el medidor volumétrico, (l/min) para distintas condiciones de medición

$v$ m/sec		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30							
$d = \phi 4$	$\theta_s$ °C																																					
	150	0.46	0.95	1.44	1.92	2.40	2.88	3.36	3.84	4.32	4.80	5.28	5.76	6.24	6.72	7.20	7.68	8.16	8.64	9.12	9.60	10.1	10.6	11.1	11.6	12.1	12.6	13.1	13.6	14.1	14.6							
	250	0.39	0.78	1.17	1.56	1.95	2.34	2.73	3.12	3.51	3.90	4.29	4.68	5.07	5.46	5.85	6.24	6.63	7.02	7.41	7.80	8.19	8.58	8.97	9.36	9.73	10.1	10.5	10.9	11.3	11.7							
$\pi \dot{m}^2$	350	0.33	0.66	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97	3.30	3.63	3.96	4.29	4.62	4.95	5.28	5.61	5.94	6.27	6.60	6.93	7.26	7.59	7.92	8.25	8.58	8.91	9.24	9.57	9.90							
	$d = \phi 6$	$\theta_s$ °C																																				
		150	1.08	2.16	3.24	4.32	5.40	6.48	7.56	8.64	9.72	10.8	11.9	13.0	14.1	15.2	16.2	17.3	18.4	19.5	20.6	21.7	22.7	23.8	24.9	26.0	27.1	28.2	29.3	30.3	31.4	32.5						
250		0.88	1.76	2.64	3.52	4.40	5.28	6.16	7.04	7.92	8.80	9.68	10.6	11.5	12.4	13.3	14.0	14.9	15.8	16.7	17.6	18.5	19.3	20.1	21.0	21.9	22.8	23.6	24.5	25.4	26.3							
$\pi \dot{m}^2$	350	0.73	1.46	2.19	2.92	3.65	4.38	5.11	5.84	6.57	7.30	8.03	8.76	9.49	10.2	11.0	11.8	12.5	13.2	14.0	14.7	15.4	16.2	16.9	17.6	18.4	19.1	19.8	20.6	21.3	22.0							
	$d = \phi 8$	$\theta_s$ °C																																				
		150	1.92	3.84	5.76	7.68	9.60	11.5	13.4	15.3	17.3	19.3	21.2	23.1	25.0	27.0	28.9	30.8	32.8	34.7	36.6	38.5	40.1	42.4	44.3													
250		1.56	3.12	4.68	6.24	7.80	9.36	10.9	12.5	14.0	15.6	17.1	18.7	20.2	21.8	23.4	24.9	26.5	28.0	29.6	31.1	32.7	34.3	35.8														
$\pi \dot{m}^2$	350	1.31	2.62	3.93	5.24	6.55	7.86	9.17	10.5	11.8	13.1	14.4	15.7	17.0	18.3	19.6	20.9	22.2	23.5	24.8	26.1	27.4	28.7	30.1														
	$d = \phi 10$	$\theta_s$ °C																																				
		150	3.01	6.02	9.03	12.0	15.1	18.0	21.1	24.1	27.1	30.1	33.1	36.1	39.1	42.1	45.1																					
250		2.43	4.86	7.29	9.72	12.2	14.6	17.0	19.5	21.9	24.3	26.8	29.2	31.6	34.1	36.5																						
$\pi \dot{m}^2$	350	2.04	4.08	6.12	8.16	10.2	12.3	14.3	16.3	18.4	20.4	22.5	24.5	26.5	28.6	30.6																						
	$d = \phi 12$	$\theta_s$ °C																																				
		150	4.35	8.69	13.0	17.3	21.7	26.0	30.3	34.5	39.0	43.3	47.7																									
250		3.57	7.00	10.5	14.0	17.5	21.0	24.5	28.0	31.5	35.0	38.5																										
$\pi \dot{m}^2$	350	2.94	5.88	8.82	11.8	14.7	17.6	20.6	23.5	26.5	29.4	32.3																										
	$d = \phi 14$	$\theta_s$ °C																																				
		150	5.89	11.8	17.7	23.6	29.5	35.4	41.3	47.2																												
250		4.76	9.52	14.3	19.1	23.8	28.6	33.3	38.1																													
$\pi \dot{m}^2$	350	4.00	8.00	12.0	16.0	20.0	24.0	28.0	32.0																													
	$d = \phi 16$	$\theta_s$ °C																																				
		150	7.76	15.4	23.1	30.8	38.5	46.2																														
250		6.25	12.5	18.7	24.9	31.1	37.3																															
$\pi \dot{m}^2$	350	5.29	10.5	15.7	20.9	26.1	31.3																															

donde:

$d$ = diámetro de la boquilla

$a$ = área transversal de la boquilla

$\theta_s$ = temperatura del gas en la chimenea

$v$ = velocidad del gas en el punto de medición

La velocidad del gas en el ducto se halla con un tubo de Pitot conectado a un manómetro diferencial inclinado, tal como se muestra en la Fig. 8.

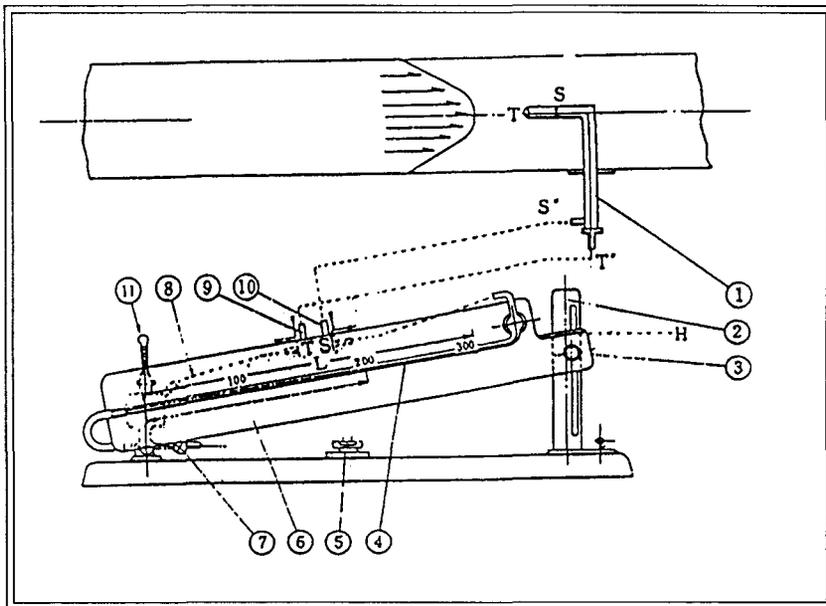


Figura 8. Tubo de Pitot y Manómetro diferencial

1. Tubo Pitot
2. Soporte para graduación de la escala (esc).
3. Perilla de ajuste del manómetro en la escala adecuada.
4. Tubo de medición graduado.
5. Regulador de nivel.
6. Soporte.
7. Valvula de escape del líquido manométrico.
8. Conducto interno de desplazamiento del líquido manométrico.
9. y 10. Terminales hacia el tubo Pitot
11. Tapón del recipiente del líquido manométrico.

La ecuación que se utiliza para hallar esta velocidad es la siguiente: [3]

$$V = c \sqrt{\frac{2gh}{\gamma}} \text{ (m/seg)}$$

donde:

- c: Es el coeficiente del tubo de Pitot. El tubo viene calibrado de fábrica con su coeficiente determinado. En nuestro caso su valor es 0,85.
- g: Es el valor de la aceleración de la gravedad en el lugar, 9,81m/seg<sup>2</sup> (a nivel del mar).
- h: Es el factor dado por el manómetro.  $h = h'/escp$ , donde h' es la altura del nivel del líquido, esc es la escala del manómetro a la cual se ha tomado la lectura y p es la densidad del líquido manométrico, teniendo presente que la densidad cambia con la temperatura.
- $\gamma$ : Es la densidad del gas (que se asume como aire). Su valor es de 1,3 kg/m<sup>3</sup> a condiciones estándar (0°C y 760 mm Hg). Este valor es corregido por temperatura y presión. Por lo tanto:

$$\gamma = 1,3 \left[ \frac{273}{273 + \theta_{\text{gas}}} \right] \left[ \frac{Pa + Ps}{760} \right]$$

donde:  $\theta_{\text{gas}}$  es la temperatura del gas (en °C) en el punto de muestreo (la temperatura máxima de trabajo del equipo es de 500°C), Pa es la presión atmosférica en el sitio y Ps es la presión estática del gas en el ducto, ambas en mm de Hg.

Una vez obtenidas la velocidad y la temperatura del gas dentro del ducto, buscamos en la Tabla 3 el valor del caudal que debe circular por el tren de muestreo y que determinará la medición isocinética, considerando el diámetro de boquilla adecuado para el muestreo. Si los valores de velocidad y temperatura no se encontraran en la tabla habría que interpolar o extrapolar según el caso.

El diámetro de boquilla está dado en milímetros y se debe buscar una boquilla tal que el caudal a medir sea ni muy bajo ni muy alto.

La Tabla 3, ha sido confeccionada por el fabricante del equipo. En su elaboración se ha considerado parámetros como: Humedad promedio, temperatura ambiente, presión atmosférica, diámetro de boquilla, temperatura del gas en el ducto y presión estática.

Una vez obtenido el caudal de la Tabla 3 (en L/min), se prepara el tren de muestreo para iniciar el monitoreo.

Se coloca inicialmente un filtro de prueba para calibrar el medidor al caudal hallado en la tabla anterior. Esto quiere decir que hay que regular la bomba de modo que el caudal de los gases que pasan por el medidor sea el calculado.

Una vez hecho esto, se coloca en la sonda un filtro nuevo (previamente pesado) para empezar el muestreo.

El tiempo de muestreo puede ser de tres a cinco minutos por punto.

Una vez introducida la sonda se empieza a contar el tiempo, se enciende la bomba y el contómetro del medidor registra el volumen de gas que está ingresando.

Una vez concluido el tiempo de muestreo, se apaga la bomba, se gira la sonda de modo que la boquilla se encuentre en el sentido del flujo y se retira del punto de muestreo.

Se retira el filtro con mucho cuidado de no contaminarlo y se guarda para su posterior pesaje [3,4].

Una vez pesado se realiza el siguiente cálculo:

Variables:

A = Área de la sección (m<sup>2</sup>).

V<sub>m</sub> = Volumen medido por el medidor volumétrico (Litros)

W<sub>p</sub> = Peso del material particulado recogido (diferencia de pesadas del filtro, en mg).

- V = Velocidad del gas (m/seg).  
 $\theta_{gas}$  = Temperatura del gas dentro del ducto ( $^{\circ}$ C).  
 Pa = Presión atmosférica (mm Hg).  
 Ps = Presión estática (mm Hg).  
 Cpm = Concentración del material particulado (mg/Nm<sup>3</sup>)\*.  
 Q = Caudal (Nm<sup>3</sup>/seg).

$$C_{pm} = \frac{W_p}{\left(\frac{Vm}{1000}\right) \left(\frac{288}{273 + \theta_{gas}}\right) \left(\frac{Pa + Ps}{760}\right)}$$

El procedimiento se repite en cada uno de los puntos establecidos por la norma, previamente analizada, dentro de una sección del ducto. La concentración final es el promedio de todas las concentraciones halladas en cada uno de los puntos.

El caudal a condiciones normales (15 $^{\circ}$ C y 1atm de presión) del gas se calcula de la siguiente manera:

$$Q = AV \left[ \frac{288}{273 + \theta_{gas}} \right] \left[ \frac{Pa + Ps}{760} \right]$$

#### AGRADECIMIENTOS

*Al Ing. Fernando Jiménez por la confianza depositada en nosotros en el hecho de permitirnos investigar y operar el equipo de monitoreo de partículas.*

---

\* El símbolo Nm<sup>3</sup> significa m<sup>3</sup>a condiciones normales.

## BIBLIOGRAFIA

1. Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones, Sub- Sector Minería de la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Energía y Minas, Lima, 1994.
2. Norma (Americana) ASTM D-3154-91.
3. Norma (Japonesa) JIS-Z-8808.
4. Norma (Americana) ASTM D-3685-92.