

# MONITOREO Y CONTROL DE VIBRACIONES POR EFECTO DE VOLADURAS EN EL TÚNEL SUMAPAZ, CONCESIÓN BOGOTÁ-GIRARDOT

(Monitoring and control of vibrations due to blasting in Sumapaz tunnel, granting Bogotá-Girardot)

Pinto Morales Luis Humberto\*, Fuentes Fuentes María del Carmen\*\*, Hernández Julián Andrés\*\*\*

\* I.GEOSOFTMINE LTDA. pintomoraleshumberto@yahoo.com

\*\*Escuela de Ingeniería Geológica, Grupo INGEOFISICA-UPTC. marcaf\_geo@yahoo.com

\*\*\*Escuela de Ingeniería Geológica, Grupo INGEOFISICA-UPTC. ingeotec\_25@hotmail.com

(Recibido: el 27 de Febrero de 2013 y aceptado 22 de Octubre de 2013)

<p><b>Resumen:</b></p> <p>Este artículo aborda los tópicos más relevantes del tema de vibraciones del terreno, desde su generación y monitoreo, hasta el control de sus efectos. Se hace énfasis en la utilización e interpretación de los datos dinámicos obtenidos en campo, dado que los métodos teóricos y los ensayos de laboratorio a veces no son suficientes para la solución de problemas geotécnicos aplicados; por ejemplo, en el caso de la evaluación de la incidencia de las voladuras en el túnel de Sumapaz, en el sector Boquerón, departamento de Cundinamarca, Colombia.</p> <p>El trabajo es el resultado de estudios efectuados por la empresa I.GEOSOTMINE LTDA., en coordinación con el grupo de investigación INGEOFÍSICA de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, dentro de la exploración del subsuelo, encaminados al monitoreo y control de voladuras provocadas por explosivos y por microtrepidaciones, en varias regiones colombianas.</p>	<p><b>Abstract:</b></p> <p>This article discusses the most relevant topics of the subject of vibration of the ground, from its generation and monitoring to the control of their effects. We emphasize on the use and interpretation of the dynamic data field, since the theoretical methods and testing laboratory at times are not sufficient to solve applied geotechnical problems; for example, in the case of the assessment of the impact of the blasting in the Sumapaz tunnel, Boquerón area, department of Cundinamarca, Colombia.</p> <p>The work is the result of studies carried out by company I.GEOSOTMINE LTDA., in coordination with the Research Group INGEOFISICA of Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, on the exploration of the subsoil, aimed at the monitoring and control of blasting caused by explosive and micro-trepidation, in several Colombian regions.</p>
<p><b>Palabras clave:</b> vibraciones, dinámica, voladuras.</p>	<p><b>Keywords:</b> vibrations, dynamic, blasting.</p>

## 1. INTRODUCCIÓN

Las oscilaciones dinámicas transmitidas a través de los terrenos, se dan por causas naturales (sismos), o por acciones humanas (detonaciones, impactos, etc.). Ocurren por medio de vibraciones que se propagan durante varios intervalos de tiempo en forma de ondas, hasta que se atenúan completamente. El origen de las vibraciones está en las aplicaciones de fuerzas externas en los terrenos, las cuales pueden ser puntuales o de aplicación continua, con intensidades que pueden variar en el tiempo.

Sarsby (2000) clasifica las vibraciones en tres clases:

*I. Continuas*, cuando un nivel de vibración es aproximadamente constante o emitido durante un tiempo prolongado (en el caso de máquinas como compresores o bombas en funcionamiento regular).

*II. Transientes*, cuando resultan de un impacto súbito, seguido de un tiempo de reposo prolongado (por ejemplo compactación dinámica de terrenos o detonaciones de una carga explosiva).

*III. Intermitentes*, cuando se da una suma de sucesión de eventos vibratorios, cada uno de los cuales tiene una pequeña duración, separados por intervalos de tiempo que minimizan la magnitud de vibración (como la detonación de cargas explosivas con microrretardo, perforaciones por percusión, etc.).

Los problemas ocasionados por estos fenómenos se pueden clasificar en dos niveles:

Perturbaciones causadas a personas que se encuentran en las proximidades (incluyendo las que ocupan los edificios que vibran), y los daños a estructuras o equipos.

Una mayor o menor intensidad de los efectos de las vibraciones depende, entre otros factores, de las características de los terrenos afectados, cuyo estudio abarca capítulos especializados de disciplinas geotécnicas, comúnmente conocidos como dinámica de rocas y suelos.

Es importante desarrollar un análisis geotécnico detallado de los sitios de monitoreo, a fin de obtener parámetros que nos den una idea de cómo va a reaccionar el macizo ante un evento sísmico (voladura). Por esta razón, se debe considerar atentamente la influencia de las discontinuidades (fallas, fracturas, juntas, diaclasas, etc.), que una vez puestas a vibrar, generan fenómenos de reflexión y refracción de ondas que poseen propiedades elásticas y dinámicas totalmente diferentes a las estáticas, lo cual conduce a comportamientos imprevistos.

## 2. LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra situada en Sumapaz, localidad número 20, de carácter rural, ubicada al extremo sur del casco urbano del Distrito Capital de Bogotá.

La localidad de Sumapaz fue creada mediante el Acuerdo 9 de 1986, del Consejo del Distrito Especial de Bogotá, teniendo en cuenta el régimen político y administrativo de la ciudad de Bogotá, establecido en el capítulo cuatro, del título XI de la Constitución Política de 1991. Ocupa un área total de 727,44 km<sup>2</sup>.



Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Geológicamente, el área de estudio está en la cordillera Oriental de Colombia, y en ella se encuentra el páramo de Sumapaz, con una altura que supera los 4000 msnm. La parte occidental de la región, con una topografía más suave y tranquila, está constituida por rocas sedimentarias del Terciario (Paleoceno-Oligoceno), las cuales, en su mayor parte, están cubiertas por materiales de origen glacial, que han originado los extensos pantanos altos que allí predominan. En la parte oriental son dominantes las rocas metamórficas del Paleozoico y sedimentarias antiguas del Devónico.

El túnel de Sumapaz está ubicado entre los municipios de Icononzo y Melgar. Es una de las obras que forman parte del proyecto vial doble calzada Bogotá-Girardot (ver fotos 1 y 2). Este túnel permite reducir en alrededor de 40 minutos o más, el tiempo de desplazamiento entre Bogotá y Girardot. Su extensión es de 4,1 kilómetros.



Foto 1. Construcción del túnel del Sumapaz. Boca del túnel en Boquerón. Fuente: <http://www.bogota.gov.co>



Foto 2. Vista interior del túnel de Sumapaz. Fuente: <http://www.bogota.gov.co>

Dentro del túnel, los dos carriles son de 3.65 metros, con una berma de 1.80 metros y franjas de seguridad a cada lado de 0.50 metros y andenes perimetrales de 1.25 metros. La obra cuenta con tecnología de punta en los sistemas de ventilación longitudinal, en los detectores de monóxido de carbono, de detección de incendios, de monitoreo, y con toda la señalización normativa requerida.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

En la ejecución del proyecto se realizó el siguiente conjunto de actividades:

- ✓ Recopilación bibliográfica.
- ✓ Levantamiento geológico del área.
- ✓ Monitoreo y control de voladuras en un espacio de seis meses.
- ✓ Procesamiento e interpretación de los datos con *softwares* especializados.
- ✓ Elaboración de informe.

El equipo empleado para el monitoreo de las voladuras que se hicieron en la etapa de trabajo fue un sismómetro Minimate Plus de fabricación canadiense, (ver foto 3), el cual, además de obtener el registro producido por la voladura, permite estudiar el efecto de la onda aérea y sonora.



Foto 3. Vista de la posición de trabajo del sismómetro.

Las ondas aéreas son vibraciones producto de la sobrepresión del aire que va asociada a la detonación de una carga explosiva, mientras que el ruido es la parte audible e infrasónica del espectro (desde 20 Hz a 20K Hz). Las ondas aéreas presentan valores generalmente por debajo de los 20 Hz, contienen una considerable cantidad de energía de baja frecuencia que puede llegar a producir daños directamente sobre las estructuras, pero, por lo general, son más comunes las vibraciones de alta frecuencia que se manifiestan como ruido sobre las edificaciones cercanas.

Los registros de vibraciones se hacen a partir de modernos geófonos piezoeléctricos triortogonales, recomendándose un nivel de vibración típico de las situaciones de referencia, para un acoplamiento de rutina en la monitorización de las voladuras realizadas. Una vibración debe ser medida en las tres componentes perpendiculares entre sí, y considerar el pico máximo de las tres (ver Figura 2).

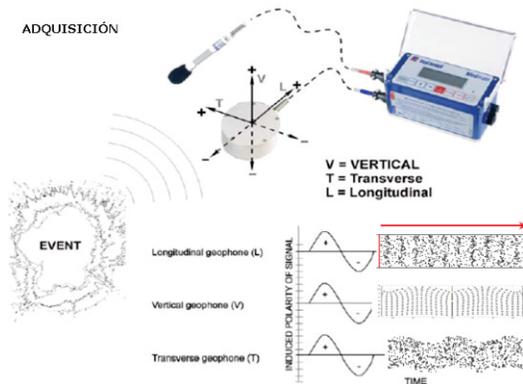


Figura 2. Esquema del procedimiento a seguir durante la adquisición y registro de las ondas de choque generadas por las voladuras.

Kramer (1996) señala que las tres principales características de las vibraciones son: su amplitud; (expresada en forma de desplazamientos, velocidades o aceleraciones); y su frecuencia de duración.

De esta forma, están relacionados: el desplazamiento, la velocidad  $v$ , y la aceleración  $a$ , mediante las expresiones siguientes, desarrollando relaciones directas entre ellas, involucrando una frecuencia  $f$ , que permita adoptar un modelo simplificado sinusoidal y armónico.

$$v = 2\pi f\delta \tag{1}$$

$$a = 2\pi f v = 4\pi f\delta \tag{2}$$

En términos de dinámica y considerando válida la Ley de Hooke, las tensiones y deformaciones se pueden relacionar a través del módulo de Young, por la expresión:

$$\sigma = E \varepsilon \tag{3}$$

Kolsky (1963) demostró que una deformación dinámica puede ser obtenida de:

$$\varepsilon = v / c_p \tag{4}$$

Donde  $v$ , es la velocidad de propagación longitudinal y  $C_p$ , es la velocidad de propagación de las ondas P.

Para la propagación unidireccional,  $C_p$  está dada por:

$$C_p = (E/\rho)^{0.5} \tag{5}$$

Y en las tres dimensiones:

$$C_p = [E(1-\nu)/\rho(1-\nu-2\nu)]^{0.5} = [G(2-2\nu)/\rho(1-2\nu)]^{0.5}$$

Donde  $\rho$ , es la masa volumétrica del terreno,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $G$  el modulo de Young.

Sustituyendo  $\varepsilon$  en la expresión de la Ley de Hooke, resulta:

$$\sigma = \rho c_p v \tag{6}$$

Que es una relación importante, y envuelve una propiedad dinámica esencial de los terrenos, y su impedancia característica  $\rho c_p$ .

Para las ondas transversales, la velocidad de propagación está dada por:

$$C_s = (G/\rho)^{0.5} = [E/2\rho(1+\nu)]^{0.5} \tag{7}$$

Existe una expresión semejante para las tensiones de corte dinámicas:

$$\tau = \rho c_s v_s \tag{8}$$

donde  $v_s$  presenta una velocidad de vibración transversal, dada por:

$$v_s = \gamma/c_s \tag{9}$$

Aquí  $\gamma$  es la deformación tangencial dinámica.

Diversos autores (Wiss, 1967, Nicholls, 1971), indican que hay una relación directa entre la velocidad máxima de vibración resultante de varias componentes P, S y R y los daños de estructuras, en función de altas tensiones dinámicas que pueden alcanzar. También se ha explicado que las estructuras formadas por materiales de mayor impedancia sufren más daños que otros de baja impedancia (madera, por ejemplo), cuando están sujetas a las mismas velocidades de vibración.

El objetivo principal de la interpretación de los datos tomados, es la comparación del registro obtenido con los criterios alternativos y límites de prevención para establecer si las perturbaciones originadas por cada voladura superan o no el umbral de daño estipulado por las normas vigentes. Si el nivel de vibraciones registrado fuera menor que el criterio de prevención, podría incrementarse progresivamente la carga operante hasta que las intensidades de vibración fueran iguales al valor máximo.

Actualmente, varios países tienen sus propias normas para el control de voladuras, sin embargo, las más aplicadas son la americana y la alemana elaboradas con base en las reclamaciones de las personas que habitan próximas a las áreas mineras, las cuales sienten sus efectos.

En este estudio se hizo un total de 30 monitoreos, los cuales se procesaron e interpretaron teniendo en cuenta las siguientes normas que se utilizan para comparar los niveles de velocidad obtenidos en las voladuras:

- Norma americana USBM y OSMRE (ver Figura 3).

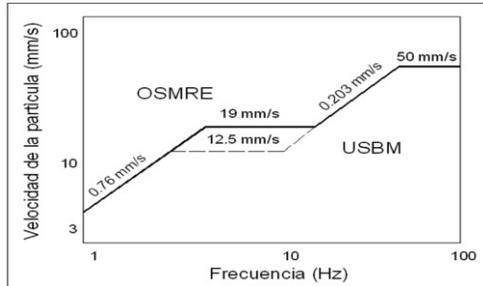


Figura 3. Gráfico de la norma americana USBM y OSMRE.

La USBM elaboró un gráfico utilizando una combinación de velocidad y desplazamiento, en el cual se presentan los niveles seguros de vibración para las residencias.

- Norma alemana DIN 4150 (ver Figura 4).

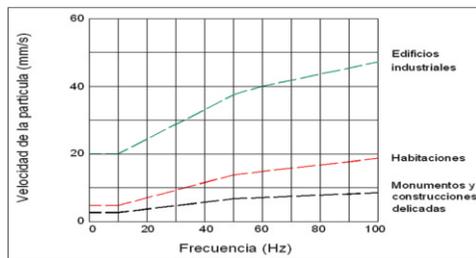


Figura 4. Gráfico de la norma alemana DIN 4150.

La norma alemana DIN 4150 (1986, revisada en el 2000), ofrece valores límites de velocidad de vibración de la partícula en mm/s, considerando el tipo de construcción civil con el intervalo de frecuencia en Hz. Las tres clases de edificaciones definidas por la norma son: edificios estructurales, habitaciones, monumentos y construcciones delicadas.

- Norma española UNE-22-381-93 (ver Figura 5).

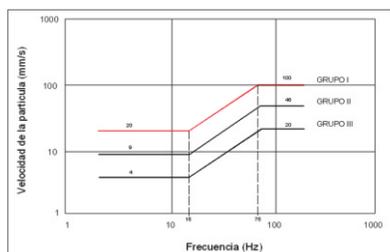


Figura 5. Gráfico de la norma española UNE- 22- 381- 93.

En esta norma, los umbrales de perturbación se establecen en función de la frecuencia principal de vibración y tipo de estructura por proteger utilizando como parámetro de medida la velocidad de la partícula, aunque en el intervalo de frecuencias de 15 a 75 Hz se utilice el parámetro de desplazamiento. Distingue los siguientes grupos de estructuras:

**Grupo I.** Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.

**Grupo II.** Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa legal vigente. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico, que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones.

**Grupo III.** Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener.

- Norma sismorresistente en Colombia NSR-98 (ver Figura 6).

Esta norma establece el umbral de daño en un gráfico comparativo de la aceleración espectral en función del período de oscilación de la partícula.

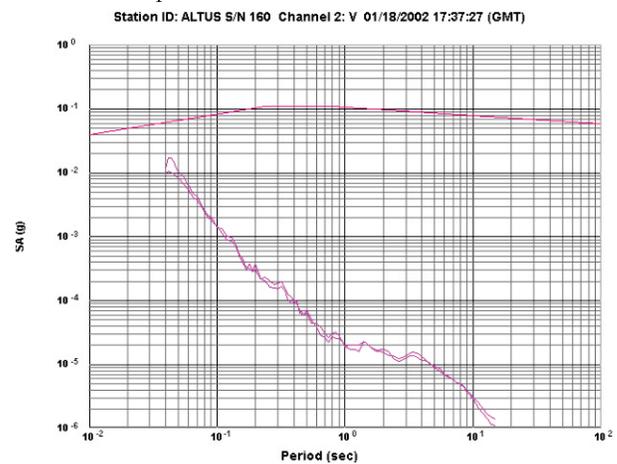


Figura 6. Gráfico de la aceleración espectral en función del período de oscilación de la partícula.

- Norma colombiana de vibraciones por voladuras RCOLVV.09 (ver Figura 7).

Esta norma es utilizada para evaluar vibraciones producidas por voladuras en canteras que pueden durar varios años. Eventualmente se aplica a demoliciones, maquinarias, tráfico de carreteras y ferroviario; teniendo en cuenta las frecuencias principales (Hz), asociadas a la máxima velocidad pico (PPV mm/s), con énfasis en la resultante y velocidad vertical pico ( $V_z$ , mm/s), para edificaciones históricas (Pinto & Fuentes, 2007).

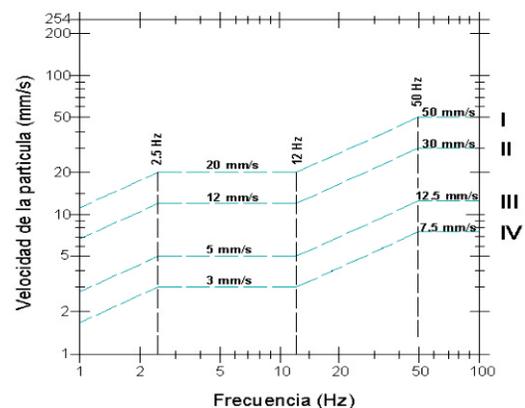


Figura 7. Espectro de umbral de daño de la guía RCOLVV.09.

### 4. RESULTADOS

A continuación se muestran figuras representativas de los resultados del monitoreo (ver figuras 8, 9, 10, 11 y 12).

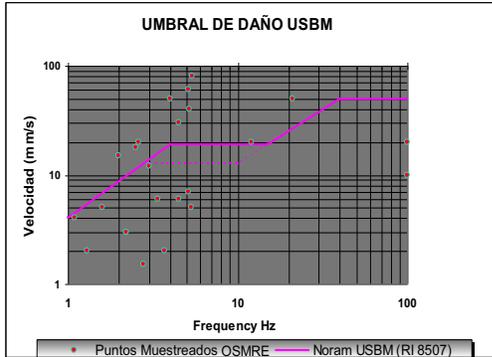


Figura 8. Gráfico de velocidad vs frecuencia.

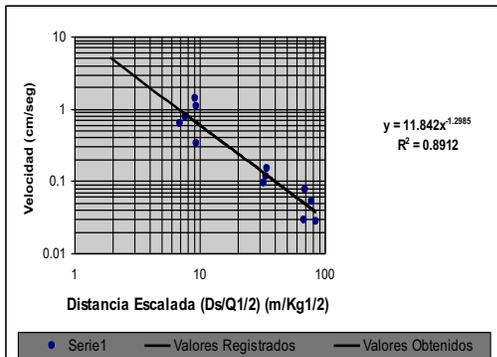


Figura 9. Gráfico de velocidad vs distancia.

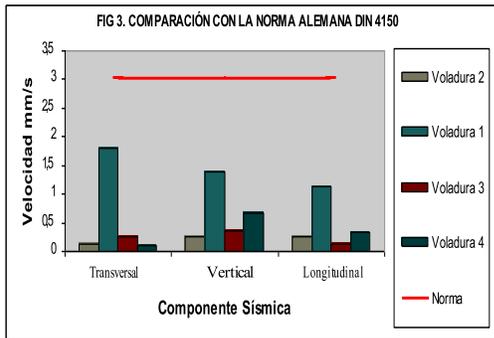


Figura 10. Gráfico de diferentes voladuras en las tres componentes comparadas con el umbral de daño de la norma alemana.

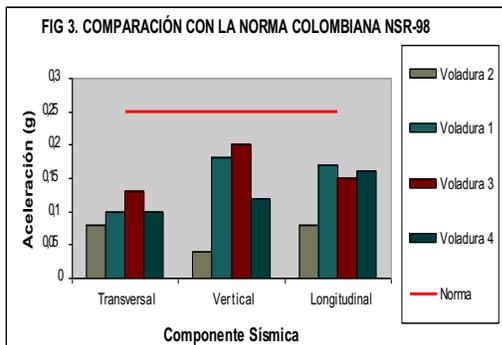


Figura 11. Gráfico de diferentes voladuras en las tres componentes comparadas con el umbral de daño de la norma colombiana.

Tabla 1. Comparación de los valores obtenidos con los umbrales de las diferentes normas.

NORMAS	UMBRAL VIBRACION	UMBRAL SOBREPRESIÓN (dB)	VIBRACIÓN OBTENIDA
AMERICANA USBM (m/s)	50 (mm/s)	136	0.762 (mm/s) 120
ALEMANA DIN 4150 (mm/s)	50 (mm/s)	136	0.762 (mm/s) 120
ESPAÑOLA UNE 22-381 (mm/s)	50 (mm/s)	136	0.762 (mm/s) 120
COLOMBIANA NSR-98 (g)	0.12 g	136	0.0265 (g) 120.9

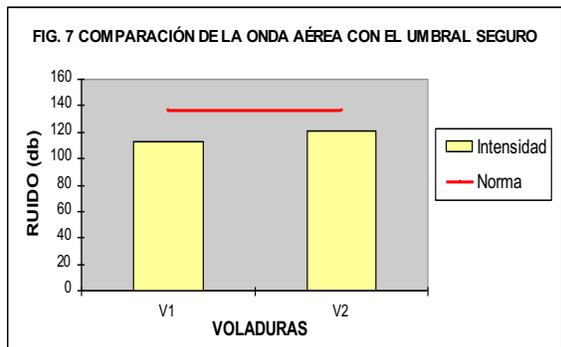


Figura 12. Gráfico de comparación de la onda aérea con el umbral seguro.

Como se observa, la onda de sobrepresión es relativamente alta, por lo tanto, es más la molestia que produce el ruido que las vibraciones. De igual manera, esta no supera el umbral vigente, por lo tanto se concluye que es más la molestia que produce el ruido generado por la explosión, que las vibraciones inducidas.

#### Análisis por tráfico vehicular

Las vibraciones producidas por tráfico vehicular generan velocidades que oscilan entre 0.01 y 0.1 mm/s, las cuales no presentan ningún tipo de riesgo de daño sobre las estructuras más cercanas al túnel.

#### Análisis por voladuras

Las voladuras generan velocidades mas altas que las que produce el tráfico vehicular, las cuales oscilan entre 0.8 y 2.1 mm/s; sin embargo, inducen pequeñas deformaciones que no pueden generar daños a las estructuras cercanas a los portales del túnel, a las distancias actuales (frontón-estructura). (Figura 13).

Se observan las amplitudes (mm), de las tres componentes en función del tiempo (seg.), incluyendo un cuadro de los valores picos de aceleración, velocidad y desplazamiento, así como la resultante (PVS), que es frecuentemente utilizado como valor máximo de vibración que alcanza la estructura donde se instaló el transductor externo (geófono triaxial).

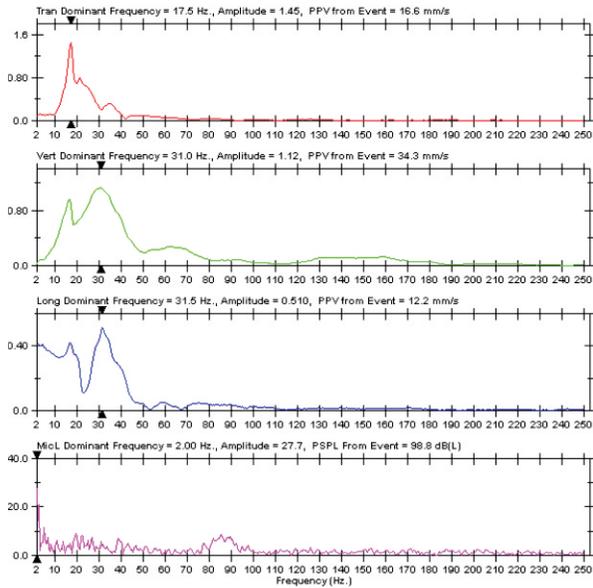


Figura 13. Ejemplo de un gráfico que muestra las amplitudes en las tres componentes L, V, T y el de la onda de sobrepresión.

En la Figura 14 y la Tabla 2, se muestra un resumen de resultados obtenidos en un registro de la resultante de la velocidad vibratoria vs frecuencia.

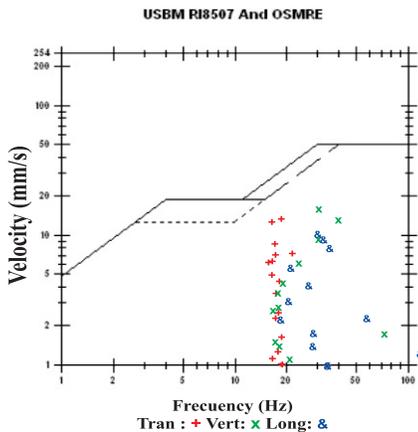


Figura 14. Gráfico de diferentes voladuras en las tres componentes comparadas con el umbral de daño de la norma alemana.

Tabla 2. Parámetros de las tres señales.

	Tran	Vert	Long	
PPV	13.5	16.3	10.3	mm/s
ZC Freq	19	30	30	Hz
Time (Rel.to Trig)	0.026	0.014	0.065	sec
Peak Acceleration	0.186	0.557	0.199	g
Peak Displacement	0.128	0.0917	0.0541	mm
Sensorcheck	Passed	Passed	Passed	
Peak Vector Sum 17.1 mm 7s at 0.016 sec				

## 5. CONCLUSIONES

- Las vibraciones generadas por las voladuras realizadas en el túnel y sus cercanías, no representan ningún tipo de amenaza contra las viviendas más cercanas a los sitios de la explosión. Esto comprueba la veracidad de los datos obtenidos y de la interpretación, empleando los espectros de las normas señaladas en el texto.

## 6. RECOMENDACIONES

### Recomendaciones para reducir los niveles de vibración

Aunque cada caso debe ser objeto de un análisis particular, se enumeran a continuación las principales medidas que pueden tomarse para aminorar las vibraciones generadas por las voladuras:

- Minimizar la carga de explosivo por unidad de microrretardo.
- Reducir el diámetro de perforación.
- Acortar la longitud de los barrenos.
- Seleccionar las cargas dentro de los barrenos e iniciarlas en tiempos distintos.
- Utilizar el mayor número de detonadores o tiempos de retardo posibles, con explosiones secuenciales o relés de microrretardo si se supera la serie comercial de detonadores eléctricos.
- Reducir el número de barrenos con detonadores instantáneos, ya que estos presentan menor dispersión que los números más altos de la serie.
- Elegir un tiempo de retardo entre barrenos y filas efectivas, que evite una fuerte superposición de ondas y permita un buen desplazamiento de la roca.
- Disponer la secuencia de iniciación de modo que esta progrese desde el extremo más próximo a la estructura por proteger, alejándose de la misma.
- Utilizar el consumo específico adecuado, ya que una disminución de este puede aumentar el confinamiento de las cargas y por consiguiente la intensidad de las vibraciones. Obviamente, un consumo excesivo da lugar a una sobrecarga innecesaria acompañada de grandes efectos perturbadores.
- Disponer el esquema con una relación “H/b > 2”.
- Controlar la perforación para que las mallas coincidan con las nominales.
- Emplear sobreperforaciones con las longitudes mínimas necesarias para un buen arranque.
- Disponer los frentes con la mayor superficie libre posible.
- Crear pantallas o discontinuidades entre la estructura por proteger y los macizos por volar.

### Recomendaciones para reducir el nivel de onda aérea

- Minimizar la carga de explosivo por unidad de microrretardo.
- Elegir tiempos de retardo de modo que la voladura progrese a lo largo del frente a una velocidad inferior a la del sonido en el aire (< 340 m/s).
- Aumentar el confinamiento de las cargas de explosivo con longitudes de retacado grandes “> 25D”, pero no excesivas, y emplear material inerte adecuado.
- Evitar el empleo de cordón detonante, y cuando este sea necesario, cubrirlo con arena fina con un espesor mínimo de 7 a 10 cm.
- No disparar las voladuras cuando la dirección del viento sea crítica.

- Seleccionar esquemas y secuencias que eviten el reforzamiento de ondas.
- Inspeccionar el estado de los frentes antes de las voladuras, para corregir las cargas en los barrenos con piedras (burden), menores que las nominales.
- Disponer pantallas de tierra o vegetales (pantallas vivas), entre las voladuras y los puntos receptores.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa IGEOFTMINE por la adquisición de los datos y a investigadores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, pues, sin su intervención, no hubiera sido posible la interpretación y análisis de los datos obtenidos.

## 8. REFERENCIAS

- Allard, P. (1986). *Etude des vibrations Engendrées par les Tirs de Mines*. Scetaroute. Février.
- Bollinger, G. A. (1971). *Blast Vibration Analysis*.
- Esteves, J. M. (1978). *Control of Vibrations caused by Blasting, Memoria 498*. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil.
- Gama, D. C. (2004). *Vibrações dos terrenos: da geração ao controle*. I Semana Iberoamericana de Minas, Portugal, (pp.147-152).
- Hinzen, K. G. et al. (1987). A New Approach to predict and reduced Blast Vibration by Modelling of Accelerograms and Using a New Electronic Initiation System. S:E:E:.
- López, C. (1996). *Manual de voladura. Manual de minería en túnel y a cielo abierto*. Madrid: ETSIM.
- MANUAL DE RESTAURACIÓN de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. (1994). España: I.T.G.E.
- NORMAS COLOMBIANAS de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-98).
- Ospina, M. (2003). El páramo de Sumapaz un ecosistema estratégico para Bogotá. Bogotá: Sociedad Geográfica de Colombia, 20 p.
- Pinto, L. H. & Fuentes, M. C. (2007). Propuesta Guía de regulación colombiana para el control de vibraciones por voladuras de rocas en áreas urbanas. RCOLVV.09, 10 p.
- Sarby, R. (2000). *Environmental Geotechnics*. London: Thomas Telford, 584 p.
- Sarria, A. (1995). *Ingeniería sísmica. Métodos geofísicos con aplicaciones a la ingeniería civil*.
- Tenreiro, R. & Rafca, C. (1988). *Fundamentos de la prospección sísmica*. La Habana, Cuba: