

Efecto de las voladuras sobre el comportamiento estructural de viviendas cercanas a sitios de explotación minera en Colombia

Effect of blasting on the structural performance of houses near mining sites in Colombia

Luis Humberto Pinto-Morales¹, Maria del Carmen Fuentes-Fuentes^{2*}

¹Petroblast S.A.S, Boyacá, Colombia

²Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Boyacá, Colombia.

*Autor para la correspondencia: marcaf_geo@yahoo.com

Resumen

El propósito del trabajo fue analizar el comportamiento estructural de viviendas ubicadas alrededor de los sitios de explotación minera donde se realizan voladuras. En el monitoreo y control de las voladuras se emplearon receptores triaxiales para determinar de manera puntual si los valores de vibración generados dentro de las viviendas producen daños en las edificaciones de acuerdo con estándares locales e internacionales. Los resultados se obtuvieron a partir del procesamiento de los datos por medio de la Transformada de Fourier y de la Función de Transferencia, calculando la frecuencia fundamental o de resonancia sobre la vivienda y el espectro de velocidad relativa, PSRV. Se obtiene que para los parámetros de velocidad y distancia empleados las velocidades de partículas para señales transversales, verticales y longitudinales generadas por las voladuras están por debajo de los umbrales seguros (3,0 mm/s) recomendados por las normativas, por lo que no se producen daños en las estructuras de las viviendas bajo estudio.

Palabras clave: voladuras; vibraciones; espectro principal de velocidad relativa; velocidad pico de partículas.

Abstract

The purpose of this work was to analyze the structural performance of houses located around mining exploitation sites where blasting take place. Triaxial receivers were used in monitoring and controlling the blasting to determine in a timely manner if vibration values generated inside the houses cause damage to the buildings in accordance with local and international standards. The results were obtained from data processing by means of the Fourier Transform and the Transfer Function, calculating the fundamental or resonance frequency on the house and the relative velocity spectrum, PSRV. For speed and distance parameters used, it was obtained that particle velocities for transverse, vertical and longitudinal signals generated by blasting are below the safe verge (3.0 mm / s) recommended by the regulations, so the structure of houses under study are not affected by explosions at the mining sites.

Keywords: blasting; vibrations; main spectrum of relative velocity; peak speed particle.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando una carga explosiva detona dentro del medio rocoso, la explosión genera intensas tensiones dinámicas con agrietamiento radial debido a la aceleración repentina de la masa rocosa. Las ondas de tensión transmitidas al medio geológico circundante crean un movimiento ondulatorio capaz de inducir esfuerzos y deformaciones a las estructuras cercanas.

La mayoría de las viviendas cercanas a los sitios donde se realizan voladuras en Colombia están construidas en mampostería simple, principalmente en bloque hueco con columnetas de confinamiento en concreto estructural, cintas de amarre superior, con techo inclinado en teja de dos aguas, diseño tipo SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje); y no cumplen con diseños sismorresistentes según la norma NSR-10 (Figura 1). Esto está dado porque los lugares exploratorios son ubicados fuera de la ciudad y en veredas donde las casas son antiguas y no ha existido un control minucioso de estas labores que tienen influencia negativa en el medio ambiente y geológico (Figura 2).

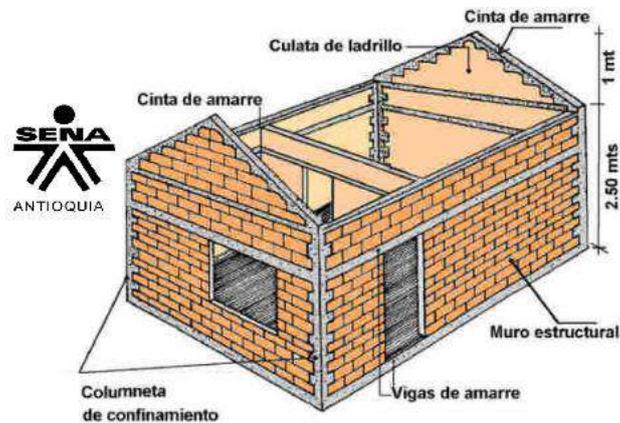


Figura 1. Vivienda de un piso con cubierta en teja. Fuente: Manual de construcción SENA, Antioquia.



Figura 2. Vivienda típica cercana a los sitios donde se realizan las voladuras.

Actualmente, el estudio de los efectos de las vibraciones es una tarea principal en todo trabajo de explotación minera y por ello las empresas I. Geosoftmine S. A. y Petroblast S.A.S. realizan estudios de monitoreo e interpretación de los datos durante los últimos veinte años, con la participación de investigadores del grupo INGEOFISICA.

Los monitoreos se han efectuado en varias canteras de explotación minera subterránea en departamentos colombianos como: Boyacá, Cundinamarca, Santander, Norte de Santander, Antioquia, Casanare y Meta. Actualmente, las explotaciones desarrollan un diseño y planeamiento de las voladuras que es revisada previamente antes de colocar los equipos que van a detectar los eventos. El presente artículo expone resultados obtenidos en el departamento de Cundinamarca, en municipios cercanos a la ciudad de Bogotá, Colombia.

1.1. Fundamentos teóricos de las vibraciones por voladuras

Las voladuras generan diferentes tipos de ondas que se propagan concéntricamente en el terreno y en el aire. Son difíciles de identificar, aunque por sus niveles de energía se sabe que las ondas Rayleigh son las de

mayor amplitud e importancia para distancias medias y largas (>100 m), del punto de la voladura; mientras que a distancias cortas (30 m) las ondas compresionales pueden ser las que generan mayores deformaciones en una estructura (Barkley 1983). Las principales ondas que se propagan por la corteza terrestre incluyen dos clases, las de tipo volumétrico y las de tipo superficial (Langefors y Kihlstrom 1978), a saber:

Ondas P, longitudinales o de compresión: son aquellas que provocan la vibración de las partículas en la misma dirección del radio de la onda, siendo análogas a las ondas sonoras.

Ondas S, transversales o de corte: con vibración de la partícula perpendicular al radio de la onda, teniendo una velocidad inferior a la de las ondas P, y no se propagan en fluidos.

Deformaciones inducidas por ondas de tipo superficial, Ondas R, o de Rayleigh: se propagan a lo largo de la superficie de la tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad, transportando la mayor parte de la energía sísmica (semejantes a las ondas que se crean cuando cae un objeto sobre la superficie de un lago).

Ondas L, o de Love: resultantes del movimiento plano horizontal de las partículas, sin componente vertical.

El movimiento ondulatorio se caracteriza por la propagación de vibraciones, no existe movimiento efectivo de masas ni de volúmenes, tampoco se realiza transporte de materia, sino que, tan solo consta de una transferencia de energía desde un punto a otro. El movimiento vibratorio se asemeja a un movimiento sinusoidal armónico, definido por la siguiente ecuación:

$$X(t) = A * \sin(\omega t + \phi) = A * \sin(2\pi f t + \phi) \quad (1)$$

Donde:

X: Desplazamiento en unidades de longitud

t: Tiempo en segundos

A: Amplitud

f: Frecuencia natural del movimiento, en hertzios

ω : Frecuencia angular del movimiento ($\omega = 2\pi f$), en radianes/seg

ϕ : Fase inicial, oscilación en el tiempo cero de la partícula en movimiento.

La velocidad instantánea (v) y la aceleración (a) son, respectivamente, la primera y segunda derivada de la ecuación (1).

$$V = dx/dt = 2\Pi f * A \cos \omega t + \omega * A \sin (\sin (\omega t + \Pi/2)) \quad (2)$$

$$a = dv/dt = (2\Pi f)^2 * A \cos \omega t + \omega^2 * A \sin (\sin (\omega t + \Pi)) \quad (3)$$

Teóricamente, se puede apreciar que el desplazamiento, la velocidad y la aceleración están desfasados en $\Pi/2$ sucesivamente.

1.2. Respuesta espectral

En estudios anteriores se ha analizado la respuesta de una estructura específica (caracterizada por tener valores fijos para la frecuencia natural y amortiguamiento crítico) utilizando un movimiento del terreno en particular: historia temporal de la aceleración absoluta del terreno. Sin embargo, para distinguir los diversos tipos de movimientos de respuesta experimentados por las estructuras, que están directamente ligados a los diferentes potenciales de agrietamiento es necesario comparar el efecto de la onda sobre una amplia variedad de estructuras; por ello, el espectro de respuesta proporciona un mecanismo gráfico muy utilizado para realizar esta comparación.

El espectro de respuesta está definido como el gráfico de las máximas respuestas (incluye máximo desplazamiento, velocidad o aceleración) de los distintos sistemas de un grado de libertad, es decir, con diferentes frecuencias naturales para una misma onda vibratoria. Un diagrama de este tipo puede ser calculado a partir del desplazamiento relativo máximo.

En la historia de tiempo calculada para el desplazamiento relativo habrá un máximo (D). Si ese desplazamiento relativo máximo es multiplicado por la frecuencia circular natural de la estructura (ω), el producto resultante es:

$$PV = \omega * \delta_{\text{máx.}} \quad (4)$$

$$PV = 2\Pi f * \delta_{\text{máx.}} \quad (5)$$

Donde:

PV: es la pseudo-velocidad.

Otros autores (Dowding, Murray y Amatzidis 1981) la llamaron respuesta pseudoespectral. Esta pseudo-velocidad es una buena aproximación de la velocidad relativa (PSRV), más aún si el impulso asociado es aproximadamente sinusoidal (Figuras 3 y 4).

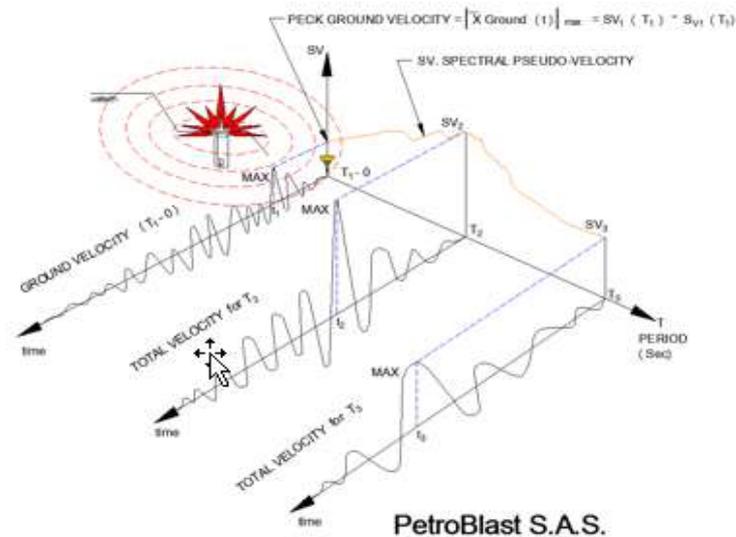


Figura 3. Tiempos de propagación de ondas y generación del espectro de velocidad, PSRV.

Algunos softwares permiten calcular estos espectros y pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, utilizando las transformadas; en este caso particular se empleó la Transformada de Fourier. De esta forma, se pasa de un modelo físico a un modelo matemático y se obtiene una representación gráfica (Bollinger 1971) (Figura 4).

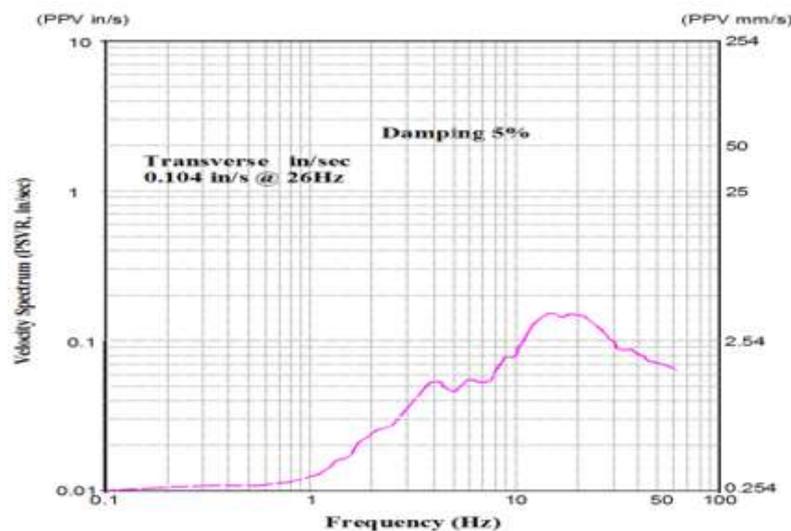


Figura 4. Espectro de velocidad.

2. METODOLOGÍA

Primeramente se definieron los sitios de monitoreo (Figura 5 a y b), donde serían ubicados los equipos (Scherpenisse y Adamson 2004). Posteriormente, se estableció el tipo de vivienda a controlar; en este caso viviendas de un piso construidas en bloque, con cubierta de teja y situadas cercanas a las voladuras.

Los equipos se ubicaron dentro de las viviendas y fuera de estas; se instalaron dos (marca White) dentro de la vivienda, uno cercano a la pared en el piso (S1- piso esquina) y uno en la pared más cercana a la fuente (S2- pared a 2 m del piso). Un tercer sismógrafo (Minimate Plus) fue ubicado fuera de la vivienda, en el terreno natural, con la finalidad de conocer las frecuencias con la que llegan las ondas producidas por la voladura.

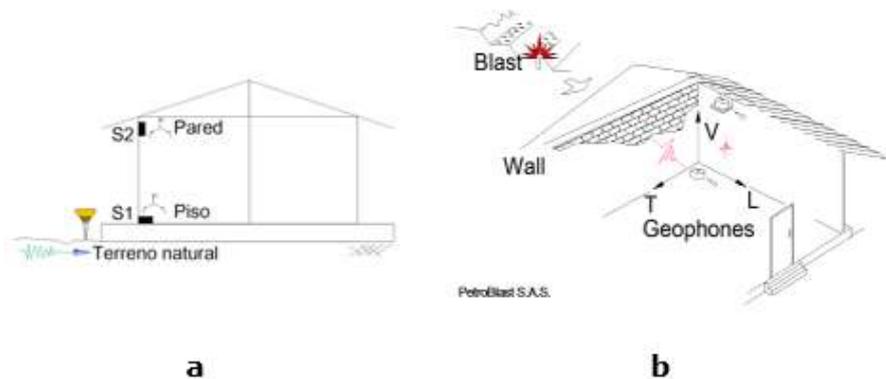


Figura 5. Distribución de los sensores y dirección respecto a la voladura. **a.** Distribución en la vivienda. **b.** Localización en dirección de la voladura.

Se utilizó un arreglo triaxial de sensores, cuyas direcciones quedaron referidas a la fuente de vibración de la siguiente manera: un registro horizontal en la dirección normal a la fuente, uno paralelo a la dirección de la fuente y uno vertical, de los cuales se analizaron las componentes más críticas y que influyen directamente en la estabilidad de la vivienda; el canal vertical y el canal transversal son utilizados para calcular la frecuencia natural de la vivienda en el procesamiento de datos en la función de transferencia. La Figura 6 muestra los equipos empleados.



Figura 6. Equipos empleados. **a.** Sismógrafos de registro. **b.** Sismógrafo marca White.

Las voladuras se realizaron generalmente en areniscas, se detonaron 150 barrenos a una distancia promedio de 450 m de las viviendas, con las

especificaciones que se muestran en la Tabla 1. Un ejemplo del diseño y ubicación de los puntos detonantes de las voladuras se grafica en la Figura 7.

Tabla 1. Parámetros de voladura

Carga de columna	ANFO
Carga de Fondo	PENTOFEX 337 g
Retardos de fondo y superior	HANDIDET 17/1 000 ms
Malla	3,6 x 4,0
Diámetro de perforación	4 pulgadas
Altura del banco	10 m
Retacado	2,6 m
Número de barrenos	150
Carga operante	50 kg

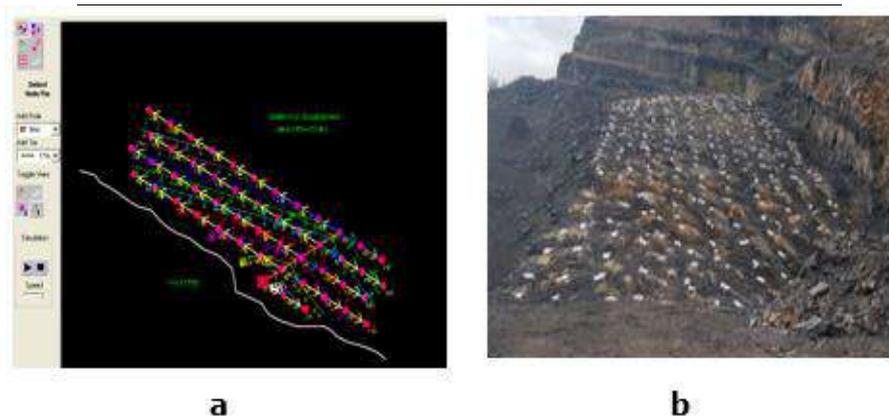


Figura 7. Diseño y ubicación de las voladuras. **a.** Diseño, **b.** Sitio de las voladuras.

Los datos registrados se promediaron para cada punto y para cada casa analizada y se calcularon los valores de velocidad y de frecuencia máxima influyentes para la casa (Duvall y Fogelson 1962). El tratamiento de los datos registrados tuvo los siguientes objetivos:

- Relacionar umbrales seguros de velocidad de partícula pico (mm/seg) y calcular los pseudoespectros de velocidad relativa (PSRV) en las tres direcciones principales, para piso y paredes, en viviendas de un piso construidas principalmente en mampostería simple en bloque y teja de dos aguas.
- Realizar pruebas de velocidad de partícula (mm/s) con la finalidad de calcular la frecuencia natural de vibración en viviendas de un piso.

- Comparar valores límites de velocidad de vibración de los PSRV, con límites estipulados en regulaciones y criterios como la colombiana, mexicana y USBM RI8507.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesamiento de los datos por medio de la transformada de Fourier para cada equipo y para cada casa analizada permitió obtener los espectros de velocidad (*pseudo spectrum velocity, PSV*) y de amplitud relativa (*pseudo spectrum relative velocity, PSRV*), asociados a cada componente individual de frecuencia. La Tabla 2 muestra un ejemplo de los datos registrados en un equipo y la Tabla 3 los resultados de los tres sismógrafos en una vivienda. En la Figura 8 se expone un ejemplo gráfico del procesamiento de los datos para una posición de un equipo.

Tabla 2. Datos registrados

Sismógrafo	Sitio	Distancia (m)	Velocidad (mm/s)			Frecuencia (Hz)		
			T	V	L	T	V	L
S1	Piso	450	2,508	2,381	2,508	5,88	6,13	6,0
S2	Pared	450	3,429	1,651	3,810	2,88	4,13	2,63
S3	Terreno natural	447	1,8300	2,1100	3,32	18	21	22

T: transversal; V: vertical; L: longitudinal

Tabla 3. Resultados para una vivienda

Sismógrafo	Ubicación	Velocidad de vibración máxima (mm/s)	Frecuencia (Hz)
S1	Piso	0,508	6,13
S2	Pared	1,8	4,32
S3	Terreno natural	3,32	22,0

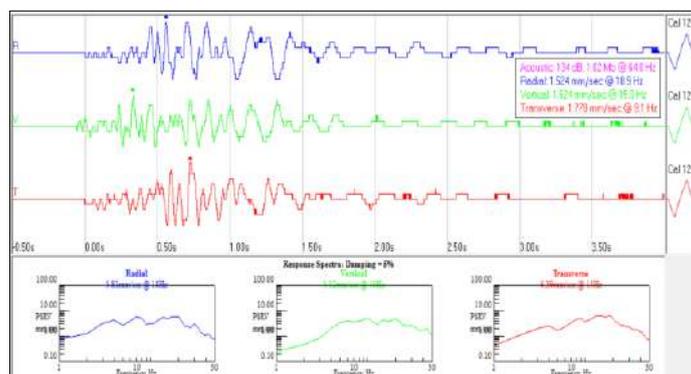


Figura 8. Espectro de velocidad PSRV para los tres canales.

El período estructural en una edificación es el tiempo que toma una oscilación en desplazarse para llevar a cabo un ciclo completo; a su vez, la frecuencia es el número de ciclos que puede llevar a cabo una oscilación en una unidad de tiempo. Los períodos promedios obtenidos en casas de 1-2 pisos resultaron ser bajos, en el orden de décimas de segundos ($T=0,1s$; $f=10Hz$ a $T=0,3s$; $f=3,3Hz$). Para edificaciones de 3 a 5 pisos oscilan entre 0,3 s-0,5 s los períodos y las frecuencias entre 3,3 Hz-2,0 Hz, respectivamente (Figura 9).

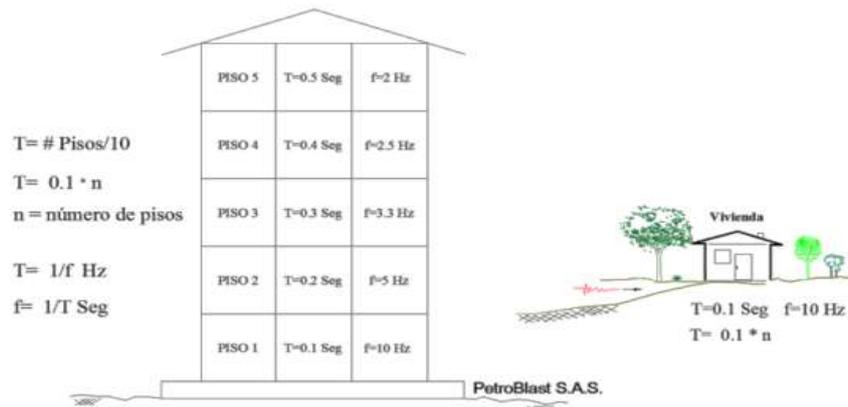


Figura 9. Cálculo teórico de frecuencias y periodos en una estructura.

Según Sarria (1996), los edificios de veinte pisos o más tienen periodos de vibración mayores a dos segundos. En términos de utilización de los datos para determinar los parámetros de atenuación de vibración de un sitio en específico, normalmente, el valor del pico es el único dato requerido. Sin embargo, en términos del daño potencial que la onda de vibración pueda causar a las estructuras en la roca o en construcciones debe esperarse que el promedio de la vibración sea un valor importante.

La máxima absorción de energía por parte de una vivienda o estructura puede darse por el efecto de resonancia, que básicamente se presenta cuando coinciden las frecuencias de las ondas que produce la fuente (voladura) y la frecuencia natural de la vivienda (Figura 10), en este caso existe la probabilidad de causar algún tipo de daño a la vivienda (Pinto-Morales y Fuentes-Fuentes 2000, 2007, 2008, 2013, 2017).

Los registros de piso y de pared se integraron para determinar la frecuencia de resonancia o periodo fundamental de la vivienda, que se puede obtener aplicando la función de transferencia (Edwards y Northwood 1960). En la Figura 11 (desde **a** hasta **e**) se muestran ejemplos de los registros obtenidos por estructuras durante las investigaciones.

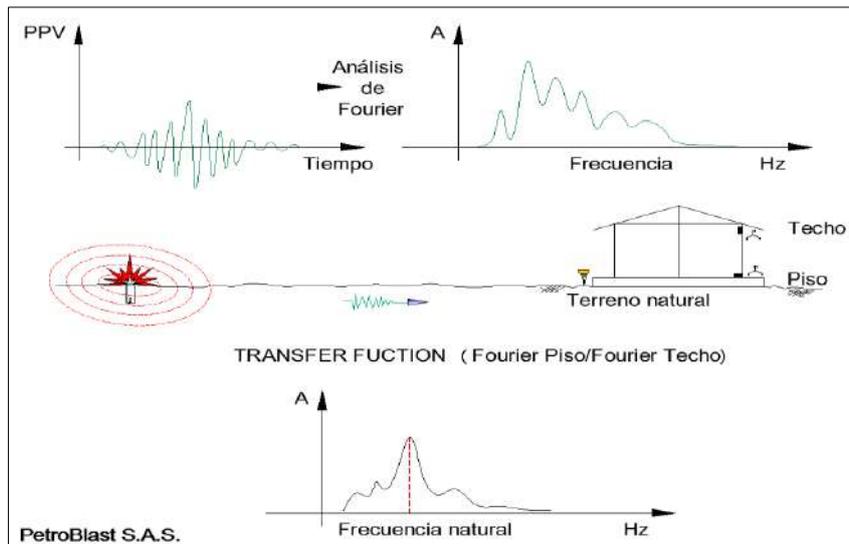


Figura 10. Cálculo de la frecuencia natural de la vivienda.

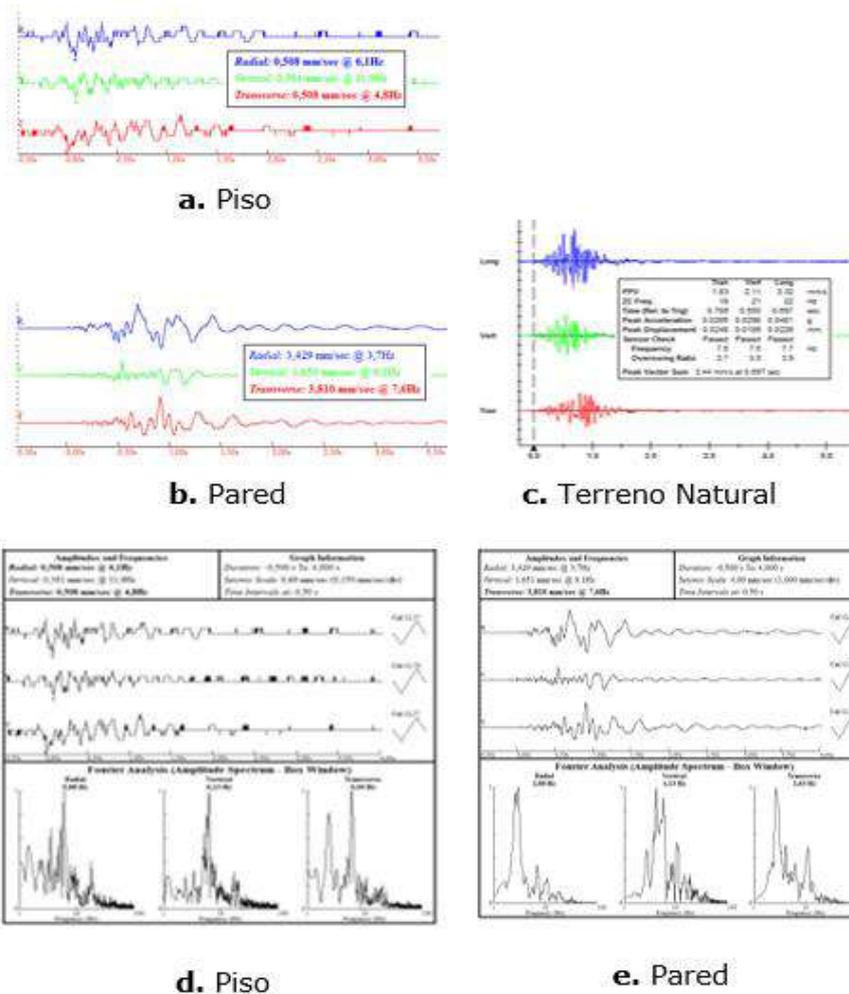


Figura 11. Registros obtenidos por estructuras.

Los valores obtenidos se localizan entre 6 Hz y 9 Hz, encontrándose dentro del rango permitido pero con valores más bajos que el promedio, debido tal

vez a que la mampostería no está fabricada de ladrillo macizo, sino de bloques, que son huecos.

3.1. Umbrales de seguridad y espectros pronósticos de velocidad

Al comparar los valores obtenidos con los límites de daño en viviendas, tomando como referencia criterios y normas nacionales e internacionales como la de Colombia (RCOLVV.09), de México y la USBM RI8507, teniendo en cuenta los criterios de prevención y los PSVR obtenidos con un amortiguamiento del 5 %, se pudo constatar lo siguiente:

La guía de regulación colombiana RCOLVV.09 en la clasificación del tipo de estructura estipula umbrales seguros para cuatro tipos de construcciones, ajustado a las necesidades del medio. Los límites admisibles de vibración equivalen a patrones ambientales, establecidos para evitar efectos dañinos a la salud humana y controlar daños a las construcciones (Figura 12 y Tabla 4). Las especificaciones por categorías son:

- TIPO I. Edificaciones pesadas, naves industriales con estructura de hormigón armado o metálicas.
- TIPO II. Edificios de viviendas y oficinas, edificios de comercio o centros comerciales.
- TIPO III. Viviendas estándar de uno y dos pisos con refuerzo estructural.
- TIPO IV. Estructuras particularmente delicadas, edificaciones históricas en condición débil, viviendas de uno y dos pisos sin ningún tipo de refuerzo estructural susceptibles a vibraciones.

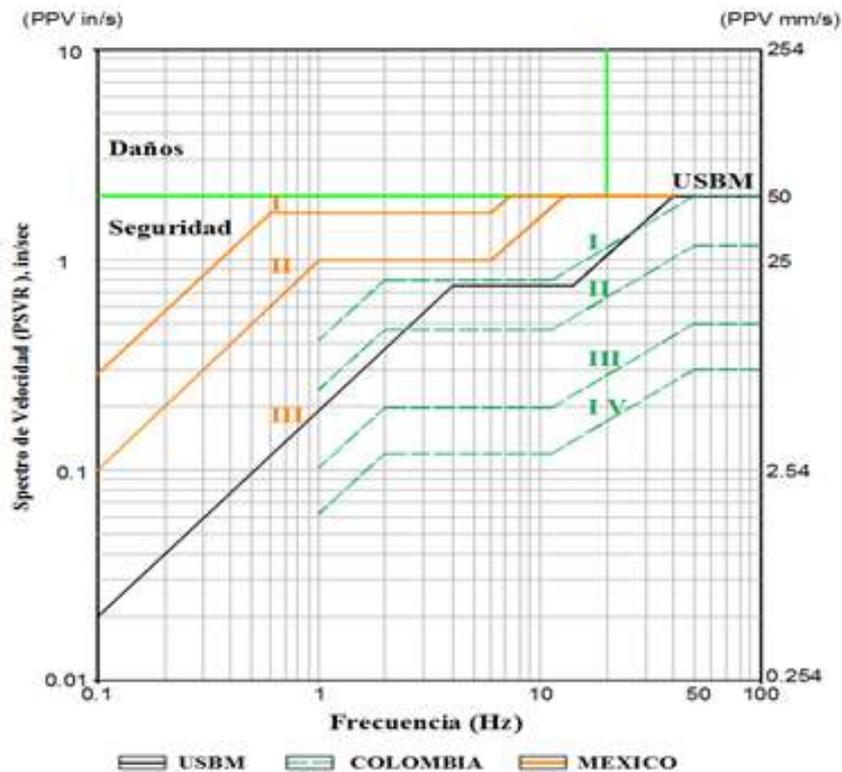


Figura 12. Límites de regulaciones y guías de vibraciones (Pinto-Morales y Fuentes-Fuentes 2008).

Tabla 4. Niveles de vibración de la guía de regulación colombiana, RCOLVV.09 (Pinto-Morales y Fuentes-Fuentes 2008)

Frecuencias principales (Hz)					Tipo de estructura
< 2.5	2.5 - 12	12 - 50	50 - 100	Hz	
11 - 20	20	20 - 50	50	mm/s	I
6.5 - 12	12	12 - 30	30	mm/s	II
2.8 - 5	5	5 - 12.5	12.5	mm/s	III
1.6 - 3	3	3 - 7.5	7.5	mm/s	IV

Los criterios de seguridad para prevención de daños por voladuras según los tipos de edificación de la ciudad de México (Fogelson 197; Siskind 1980, 2003 y 2005) establecen:

- TIPO I. Edificaciones resistentes de estructura de concreto armado o metálica, muros estructurales, contra vientos, etc.
- TIPO II. Edificios medianamente resistentes, generalmente de pocos niveles, pero sin los elementos estructurales citados en el punto anterior.

- TIPO III. Edificios poco resistentes y sensibles a las vibraciones, probablemente dañados, monumentos antiguos o de interés histórico, centro de cómputo.

Teniendo en cuenta el límite de referencia para el control de vibraciones sobre viviendas de un piso, susceptibles a vibraciones generadas por voladuras de rocas (RCOLVV.09), que establece límites seguros para viviendas y estructuras habitacionales vulnerables a vibraciones (edificios históricos), entre 3,0 mm/s y 7,5 mm/s para frecuencias entre 10 Hz y 50 Hz, las viviendas se ajustan a la clasificación tipo III; las cuales presentan buen comportamiento frente a vibraciones generadas por voladuras, con niveles de vibración entre 5,0 mm/s y 12,5 mm/s, con un límite superior. Igualmente, los valores obtenidos están por debajo de la norma mexicana y la USBM RI8507.

De manera general, las viviendas no cumplen con diseños mínimos de sismorresistencia, algunas presentan columnetas estructurales pero no poseen cinta de amarre superior, la cual es muy importante porque confina la vivienda y previene agrietamientos, principalmente de paredes. Por ello se recomienda utilizar la metodología creada por el SENA, atendiendo a su sencillez y fácil comprensión.

4. CONCLUSIONES

- La mayoría de las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por estremecimientos generados por vibraciones utilizan la velocidad de vibración y el espectro de velocidad relativa (PSRV) como variables básicas.
- Bajo los parámetros de velocidad y distancia descritos anteriormente las velocidades de partículas para señales transversales, verticales y longitudinales, generadas por las voladuras, están por debajo de los umbrales seguros recomendados por normativas, por lo que no originan daños en las viviendas al estar los valores por debajo de los 3,0 mm/s.
- Las viviendas que no cumplen con diseños sismorresistentes mínimos pueden soportar vibraciones menores a 3,0 mm/s y se pueden ajustar a la clasificación tipo IV de la guía de regulación colombiana (RCOLVV.09); en la regulación mexicana correspondería al tipo III.

5. REFERENCIAS

Barkley, R. C. 1983: *Vibraciones de Tierra y aire causadas por la explosión superficial*. N.T.I.S.

- Bollinger, G. A. 1971: *Blast vibration analysis*. Carbondale: Southern Illinois University Press. 132 p. ISBN 0809305100.
- Dowding, C. H.; Murray, P. D. y Amatzidis, D. K. 1981: Dynamic properties of structures subjected to blasting vibrations. *Journal of the Structural Division*, 107(7): 1233-1249.
- Duvall, W. I. y Fogelson, D. E. 1962: *Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations*. Vol. 5968. US Department of the Interior, Bureau of Mines.
- Scherpenisse, C. y Adamson, W. R. 2004: *Asesoría técnica en monitoreo de vibraciones para el modelamiento y control de daño*. ASP. Blastronics.
- Edwards, A. T. y Northwood, T. D. 1960: *Experimental studies of the effects of blasting on structures*. Division of Building Research, National Research Council.
- Fogelson, D. E. 1971: U.S. Bureau of Mines research on vibration from blasting. *Revue de l'Industrie Minérale*, n. spécial, p. 158-165.
- Langefors, U. y Kihlstrom, B. 1978: *The modern technique of rock blasting*. 3ra ed. Estocolmo: Almqvist & Wiksell. 438 p.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2000: Estudio sismológico por efecto de vibraciones en Nobsa-Boyacá. Proyecto Dirección de Investigaciones, UPTC. Tunja, Boyacá, p. 250.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2007: Determinación de los modelos de velocidad de partículas en voladuras. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 4(1): 13- 18.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2008: Propuesta de guía de regulación colombiana para el control de vibraciones por voladuras de rocas en áreas urbanas. RCOLVV.09. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 7(2): 26-38.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. 2013: Monitoreo y control de vibraciones por efectos de voladuras en el túnel de Sumapaz, Concesión Bogotá-Girardot. *Revista Ingeniería, investigación y desarrollo*, 13(2): 15- 22.
- Pinto-Morales, L. H. y Fuentes-Fuentes, M. C. diciembre 2017: Estudio de vibraciones generadas por vibrocamiones para la compañía VECTOR GEOPHYSICAL en el proyecto sísmico VSM 2D 2017. Agencia Nacional de Hidrocarburos-ANH. Coyaima, Departamento del Tolima. p. 73.
- Sarria, A. 1996: *Ingeniería Sísmica*. UNIANDES. 510 p.
- SENA. Manual de construcción. SENA, Antioquia.
- Siskind, D. E. 1980: Report of Investigation 5968. U. S. Bureau of Mines. Washington. 19 p.

Siskind, D. E. 2003: Respuesta de la estructura y daños producidos por la vibración del suelo por voladura superficial. Informe de investigación 8507. Bureau of Mines U.S. Washington. 74 p.

Siskind, D. E. 1980: Buró de Minas U. S. Resultado de investigaciones con vibración por voladuras. Informe 8506.

Siskind D. E. 2005: Buró de Minas U. S. Resultado de investigaciones con vibración por voladuras a distancia y evaluación del impacto comunitario. Informe 9455.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Ambos autores contribuyeron por igual.

ORCID

LHPM, <https://orcid.org/0000-0001-5606-0326>

MCFF, <https://orcid.org/0000-0002-0599-613X>

Recibido: 14/12/2020

Aceptado: 09/02/2020