

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL DEL RUIDO Y LA VIBRACIÓN  
GENERADOS EN TRONADURAS**

**SEBASTIÁN ELIAS MAULEN RAMOS**

Santiago-Chile

2014

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL DEL RUIDO Y LA VIBRACIÓN  
GENERADOS EN TRONADURAS**

**SEBASTIÁN ELIAS MAULEN RAMOS**

**Profesor Guía:**

Ing. Roberto Quezada Barrera

**Profesor Patrocinante:**

Ms. Oscar Ricardo Pesse Löhr

**Propósito:**

Trabajo de titulación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico.

Santiago-Chile

2014

# PROPUESTA DE GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL RUIDO Y LA VIBRACIÓN GENERADOS EN TRONADURAS

**Sebastián Elías Maulen Ramos**

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Ing. Roberto Quezada Barrera del Ministerio de Medio Ambiente de Chile, y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del candidato.

Dra. Yolanda Vargas Hernández

---

Dr. Luis Gaete Garretón

---

Dr. Patricio Pérez Jara

---

Ms. Ricardo Pesse Löhr

---

Ing. Roberto Quezada Barrera

---

---

Director(a) Departamento de Física.

## **DERECHOS DE AUTOR**

© Sebastián Elías Maulen Ramos

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, deseo agradecer a mis padres por su paciencia e incondicional apoyo. También deseo expresar mi agradecimiento al profesor Ricardo Pesse Lohr, del departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo y por todos los conocimientos que me transmitió, antes y durante el desarrollo del mismo. Por último, expreso mi agradecimiento al Sr. Roberto Quezada Barrera y a toda la sección de Acústica y Ondas Electromagnéticas del Ministerio de Medio Ambiente, por los conocimientos, observaciones y comentarios que permitieron desarrollar este trabajo y por haberme recibido en sus dependencias.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>Capítulo 1.- Introducción</b> .....	1
1.1 Definición del problema.....	1
1.2 justificación del trabajo .....	1
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2Objetivos específicos .....	6
<b>Capítulo 2.- Introducción Teórica</b> .....	7
2.1 Vibración.....	7
2.1.1 Ondas de cuerpo.....	9
2.1.2 Ondas de superficie.....	11
2.2 Sobrepresión de aire.....	14
2.2.1 Pulso de presión de roca (PPR).....	15
2.2.2 Pulso de presión de aire (PPA).....	15
2.2.3 Pulso de liberación de gas (PLG).....	16
2.2.4 Pulso de liberación del taco (PLT) .....	16
2.3 Factores que determinan la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión.....	17
2.3.1 Diseño de la tronadura.....	19
2.3.2 Tipo y cantidad de explosivo.....	21
2.3.3 Tipo y cantidad de taco.....	21
2.3.4 Método de inicio y disparo.....	22
2.3.5 Distancia entre la tronadura y el receptor.....	22
2.3.6 Topografía .....	22
2.3.7 Propiedades geológicas del terreno.....	23
2.3.8 Factores meteorológicos.....	25

<b>Capítulo 3.- Descripción general de los instrumentos y métodos usados para medir ruido y vibración.....</b>	<b>26</b>
3.1 Generalidades.....	26
3.2 Medición de vibraciones.....	29
3.2.1 Acelerómetro.....	30
3.2.2 Geófono o velocímetro.....	31
3.3 Medición de ruido.....	32
3.4 Prácticas y métodos estándares.....	34
3.5 conclusiones de este capítulo.....	41
<b>Capítulo 4.- Modelos predictivos.....</b>	<b>43</b>
4.1 Modelos para vibración.....	43
4.2 Modelos para sobrepresión de aire.....	56
4.3 Conclusiones de este capítulo.....	62
<b>Capítulo 5.- Normativas internacionales para el control de los efectos del ruido y la vibración sobre estructuras y personas.....</b>	<b>64</b>
5.1 Criterio para clasificar y estimar daños sobre estructuras .....	64
5.2 Normativas para el control de vibraciones en estructuras.....	65
5.2.1 Norma Alemana: DIN 4150-3.....	66
5.2.2 Norma Americana: USBM RI8507.....	67
5.2.3 Norma Española: UNE 22-381-93 .....	68
5.2.4 Norma Suiza: SN 640-312 <sup>a</sup> .....	70
5.2.5 Norma Sueca: SS 4604866 .....	71
5.2.6 Norma inglesa: BS 7385-2 .....	74
5.2.7 Norma Escocesa: PAN 50 .....	75
5.2.8 Norma Australiana: AS 2187-2 .....	76

5.3 Normativas para el control de vibraciones en personas.....	76
5.3.1 Norma Alemana: DIN 4150-2 .....	77
5.3.2 Norma Británica: BS 6472-2.....	78
5.3.3 Recomendación del Consejo Ambiental de Australia y Nueva Zelandia (ANZEC).....	79
5.4 Normativas para el control de sobrepresión de aire en estructuras .....	80
5.5 Normativas para el control de sobrepresión de aire en personas .....	82
5.5.1 Norma Australiana: AS 2187-2.....	82
5.5.2 Recomendación Americana.....	83
5.5.3 Recomendación Canadiense.....	83
5.6 Conclusiones de este capítulo.....	84
<b>Capítulo 6.- Propuesta de Guía para la evaluación del impacto ambiental de la vibración generada por tronaduras.....</b>	<b>88</b>
6.1 Alcances.....	88
6.2 Medición y predicción .....	88
6.3 Control de los efectos sobre estructuras .....	93
6.4 Control de los efectos sobre personas .....	96
6.5 Mitigación de impactos .....	99
<b>Capítulo 7.- Propuesta de guía para la evaluación del impacto ambiental del ruido generado generados por tronaduras.....</b>	<b>102</b>
7.1 Alcances.....	102
7.2 Medición y predicción .....	102
7.3 Control de los efectos sobre estructuras y personas.....	104
7.4 Mitigación de impactos .....	105
<b>Capítulo 8.- Conclusiones.....</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>111</b>

<b>Anexos</b> .....	114
Anexo A – Análisis de proyectos ingresados al SEIA.....	115
Anexo B – Propiedades de los explosivos .....	124
Anexo C – Principales tipos de explosivos .....	128
Anexo D – Factores que controlan la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión de aire en tronaduras.....	131
Anexo E – Mecanismo de fragmentación de la roca en tronaduras .....	132
Anexo F – Determinación de la curva de predicción .....	138
Anexo G – Ejemplos de fichas de registro para tronaduras .....	142
Anexo H – Densidad aparente de diversos materiales .....	144
Anexo I – Velocidad de propagación de ondas sísmicas en distintos tipos de rocas .....	145
Anexo J – Resultados de la investigación desarrollada por el instituto de mecánica de roca de la india, 2005 .....	146

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Rango de valores para los principales parámetros del fenómeno vibratorio.....	8
Tabla 3-1: Margen de error según clase de sonómetro.....	33
Tabla 3-2: Relación entre diversos criterios y métodos de montaje .....	39
Tabla 4-1: Valores de $k_f$ .....	48
Tabla 4-2: Arquitectura de la dos RNA consideradas por Khandelwal .....	52
Tabla 4-3: Resultados del estudio de Monjezi & Hasanipanah.....	54
Tabla 5-1: Límites norma DIN 4150-3 (1999) .....	66
Tabla 5-2: Límites RI8507 para viviendas revestidas de adobe.....	67
Tabla 5-3: Límites RI8507 para viviendas revestidas de yeso .....	67
Tabla 5-4: Límites normaUNE 22-381-93.....	69
Tabla 5-5: Límites norma SN 640 312 <sup>a</sup> .....	71
Tabla 5-6: Valores típicos de $v_0$ según el tipo de terreno.....	72
Tabla 5-7: Valores típicos de $F_b$ según tipo de edificación.....	72
Tabla 5-8: Valores típicos de $F_m$ según tipo de edificación.....	73
Tabla 5-9: Límites norma BS 7385-2.....	74
Tabla 5-10: Límites normaPAN 50.....	75
Tabla 5-11: Límites normaAS 2187-2.....	76
Tabla 5-12: Límites normaDIN 4150-2.....	78
Tabla 5-13: Límites normaBS 6472.....	78
Tabla 5-14: Algunos efectos de la sobrepresión de aire sobre estructuras (Siskind & Summers).....	81
Tabla 5-15: Límites nivel de sobrepresión según respuesta del aparato de medición.....	81
Tabla 6-1: Límites de la propuesta n°1 (DIN 4150-3).....	94

Tabla 6-2: Limites de la propuesta n°2 (SN 640 312a).....	95
Tabla 6-3: Limites de la propuesta n°3 (BS 7385-2).....	95
Tabla 6-4: Limites de la propuesta n°1 (DIN 4150-2).....	98
Tabla 6-5: Limites de la propuesta n°2(BS 6472-2).....	98
Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados .....	115
Tabla D-1: Factores para ruido y vibración, y su grado de importancia .....	131
Tabla F-1: Registro tronaduras de prueba (fuente: BS 6472-2) .....	138
Tabla F-2: Valores de las variables x e y .....	139
Tabla F-3: Desarrollo de datos para el análisis por regresión .....	141
Tabla H-1: Densidad aparente de distintos materiales .....	144
Tabla I-1: Velocidad de propagación en distintos materiales .....	145
Tabla J-1: Resultados (fuente: instituto de mecánica de roca de la india) .....	146

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Gráfico que ilustra cómo se evaluó el ruido producido por tronadura en los proyectos analizados.....	3
Figura 1-2: Gráfico que ilustra cómo se evaluó la vibración producida por tronaduras en los proyectos analizados .....	4
Figura 2-1: Onda P o primaria.....	9
Figura 2.2. Onda S o secundaria.....	10
Figura 2-3: Onda R (Rayleigh).....	11
Figura 2-4: Onda Q (Love).....	11
Figura 2-5: Comparación entre ondas R y C.....	12
Figura 2-6: Ondas de cuerpo y ondas de superficie en una tronadura .....	12
Figura 2-7: Registro de una tronadura (mina Hunter Valley, USA) .....	13
Figura 2-8: Comportamiento de una sobrepresión de aire generada por una tronadura.....	14
Figura 2-9: Registro de PPR y PPA.....	16
Figura 2-10: Registro de PLG y PLT .....	17
Figura 2-11: Terminología básica para tronaduras en minería.....	18
Figura 2-12: Taco de aire.....	18
Figura 2-13: Los diferentes frentes de ondas generados por la tronadura se superponen en una dirección particular.....	20
Figura 2-14: Al reducir el tiempo de retardo en 8 ms se produce reforzamiento en dos zonas.....	20
Figura 2-15: Una colina actúa como barrera ante el paso de los frentes de onda, reduciendo los niveles de sobrepresión.....	23

Figura 2-16: Rango típico de frecuencias en minas de carbón.....	24
Figura 2-17: Rango típico de frecuencias en canteras.....	24
Figura 2-18: Rango típico de frecuencias en obras públicas .....	24
Figura 2-19: Algunos factores meteorológicos.....	25
Figura 3-1: Esquema básico de un sistema para medir ruido o vibración.....	27
Figura 3-2: Respuesta en voltaje de un transductor.....	28
Figura 3-3: Respuesta ideal de un transductor en un rango de frecuencia .....	29
Figura 3-4: Dos tipos de acelerómetros. El de la izquierda está diseñado para generar un esfuerzo de compresión sobre el cristal, mientras que el de la derecha provoca un esfuerzo de corte sobre el mismo.....	30
Figura 3-5: La foto de la izquierda muestra un geófono como tal, mientras que en la derecha se muestra un esquema del mismo.....	31
Figura 3-6: Esquema básico de un sonómetro .....	32
Figura 3-7: Métodos para colocar el sensor cuando la magnitud de las vibraciones es baja.....	35
Figura 3-8: Métodos para colocar el sensor cuando la magnitud de las vibraciones es alta.....	36
Figura 3-9: Resultados según tipo de montaje de los sensores .....	36
Figura 3-10: Algunas prácticas que se deben evitar en la instalación de sensores.....	37
Figura 3-11: Sonda usada para registrar vibraciones.....	38
Figura 3-12: Cable unido firmemente a la superficie para evitar ruido eléctrico.....	39
Figura 3-13: Diferencia en los tiempos de arribo entre las distintas ondas de vibración y la onda de sobrepresión.....	40
Figura 4-1: Rectas para distintos intervalos de confianza.....	45
Figura 4-2: Esquema del algoritmo usado para entrenar la RNA.....	49
Figura 4-3: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por 2 tipos de RNA y 7 modelos de distancia reducida (Khandelwal) .....	52

Figura 4-4: Esquema de la RNA considerada por Monjezi & Hasanipanah .....	53
Figura 4-5: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por una RNA y 5 modelos de distancia reducida (Kostic et al) .....	55
Figura 4-6: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por una RNA y 5 modelos de distancia reducida (Hhandelwal & Singh) .....	55
Figura 4-7: Modelo de distancia reducida aplicado a tronaduras (Terrock) .....	56
Figura 4-8: Curvas elípticas de nivel de sobrepresión.....	58
Figura 4-9: Grafico que permite determinar la reducción de los niveles de sobrepresión a causa de la topografía.....	59
Figura 4-10: Topografía de la mina Launceston (fase 1) .....	60
Figura 4-11: Curvas de nivel de sobrepresión en mina Launceston (fase 1).....	60
Figura 5-1: Grafico que presenta los límites establecidos en DIN 4150-3 .....	66
Figura 5-2: Grafico que presenta los límites establecidos en RI8507 .....	68
Figura 5-3: Grafico que presenta los límites establecidos en UNE 22-381-93 ....	70
Figura 5-4: Factor distancia $F_d$ en función de la distancia y el tipo de terreno .....	73
Figura 5-5: Grafico que presenta los límites establecidos en BS-7385.....	74
Figura 5-6: Esquema desarrollado por Oriard para estimar la respuesta humana a una vibración.....	77
Figura 5-7: Probabilidad de rotura de cristales en relación al nivel de sobrepresión de aire.....	80
Figura 6-1: Ubicación recomendada de los sensores para evaluar (a) el daño sobre una estructura, o (b) la molestia en los ocupantes .....	90
Figura 6-2: Alternativas recomendadas para el montaje de sensores en el caso de vibraciones de alta magnitud: (a) Enterrar y cubrir el sensor, (b) Pegarlo usando pegamento industrial y (c) usar pernos.....	90
Figura 6-3: Prácticas que deben evitarse:(1) No clavar lo suficiente las estacas (2) pegar el sensor a roca suelta y (3) pegar el sensor a concreto delgado .....	91
Figura 6-4: Gráfico con los límites de la propuesta n°1.....	94
Figura 6-5: Gráfico con los límites de la propuesta n°3 .....	96

Figura 6-6: Ejemplo de secuencia de iniciación que ayuda a reducir el impacto sobre los receptores.....	100
Figura E-1: Material pulverizado y fracturado alrededor de un pozo .....	133
Figura E-2: Ondas reflejadas en la cara libre .....	133
Figura E-3: Perfil de desplazamiento homogéneo .....	134
Figura E-4: Perfil de desplazamiento no homogéneo .....	135
Figura E-5: Perfil no homogéneo (burden excesivo) .....	136
Figura E-6: Material expulsado con fuerza (flyrock) .....	136
Figura E-7: Fases del proceso de fragmentación de la roca (tronadura real) ....	137
Figura G-1: Ejemplo de registro n°1 .....	142
Figura G-2: Ejemplo de registro n°2 .....	143

## RESUMEN

La tronadura es una técnica que permite romper o fracturar un cuerpo sólido mediante el uso de explosivos. En comparación con métodos mecánicos, como excavadoras y martillos hidráulicos, una tronadura permite llevar a cabo una tarea específica en el menor tiempo posible. Por esta razón el uso de esta técnica, tanto en la industria minera como en la construcción de diversas obras civiles, se considera fundamental.

Sin embargo, las tronaduras generan ruidos y vibraciones que pueden resultar perjudiciales tanto para estructuras como para personas. Los efectos sobre una estructura van desde el retumbar de los vidrios, hasta la rotura de los mismos o la aparición de grietas de tamaño considerable. Por otro lado, los efectos sobre las personas van desde una simple molestia, hasta provocar insomnio e irritabilidad general, afectando seriamente la calidad de vida. Esto, sumado al hecho de que los proyectos que normalmente hacen uso de esta técnica están incrementándose, tanto en número como en alcance, hace imprescindible evaluar su impacto ambiental. Debido a que nuestro país no cuenta con una norma para este propósito se desarrolló un trabajo de investigación, el cual considero los aspectos más importantes del ruido y la vibración generados en tronaduras, como la teoría relacionada con su generación y transmisión, el instrumental y la metodología necesaria para su medición, los modelos disponibles para su predicción y los valores límites establecidos para su control.

Los resultados de este trabajo de investigación fueron dos propuestas de guía para la evaluación del impacto ambiental sobre estructuras y personas, una para la vibración generada por tronaduras y otra para el ruido generado por las mismas. Estas guías contienen las indicaciones necesarias para llevar a cabo una evaluación formal, esto es, definición de alcances, medición de parámetros, predicción de magnitud o niveles, y límites máximos permitidos. Las guías señaladas también incluyen prácticas o técnicas para reducir el impacto ambiental de ruidos y vibraciones en tronaduras.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Definición del problema

Una tronadura se define como el proceso o acción de fragmentar o fracturar la roca, el suelo o el hormigón mediante el uso de explosivos. En la actualidad el uso de tronaduras se considera imprescindible, tanto en la industria minera como en la construcción de diversas obras civiles. Esto se debe a que esta técnica permite fracturar o desplazar material en el menor tiempo posible, sobrepasando ampliamente los resultados alcanzados con métodos mecánicos, como excavadoras hidráulicas, martillos hidráulicos, etc.

Sin embargo, los ruidos y vibraciones generados por una tronadura pueden resultar perjudiciales tanto para las estructuras como para las personas que se encuentren en las cercanías del lugar donde dicha tronadura se lleva a cabo. El potencial que tiene una tronadura para generar daños depende de muchos factores, algunos de los cuales son propios de ella (diseño, tipo de explosivo usado) y, por lo tanto, controlables, mientras que otros son ajenos a la misma (distancia al receptor, condiciones geológicas y meteorológicas) y, como tal, no controlables.

Los efectos en una estructura pueden ser tan leves como el retumbar de un vidrio u objetos que caen desde paredes o muebles, o tan serios como la aparición de grietas de tamaño considerable, rotura de vidrios e incluso un debilitamiento general de la estructura por fatiga. Por otro lado, los efectos sobre las personas pueden ir desde una simple molestia por el ruido que produce el retumbar de los vidrios, hasta provocar insomnio e irritabilidad general.

### 1.2 Justificación de este trabajo.

Debido a los efectos adversos generados por las tronaduras, tanto en personas como en estructuras, se hace evidente la necesidad de contar con una normativa que permita controlar los ruidos y las vibraciones generados por estas.

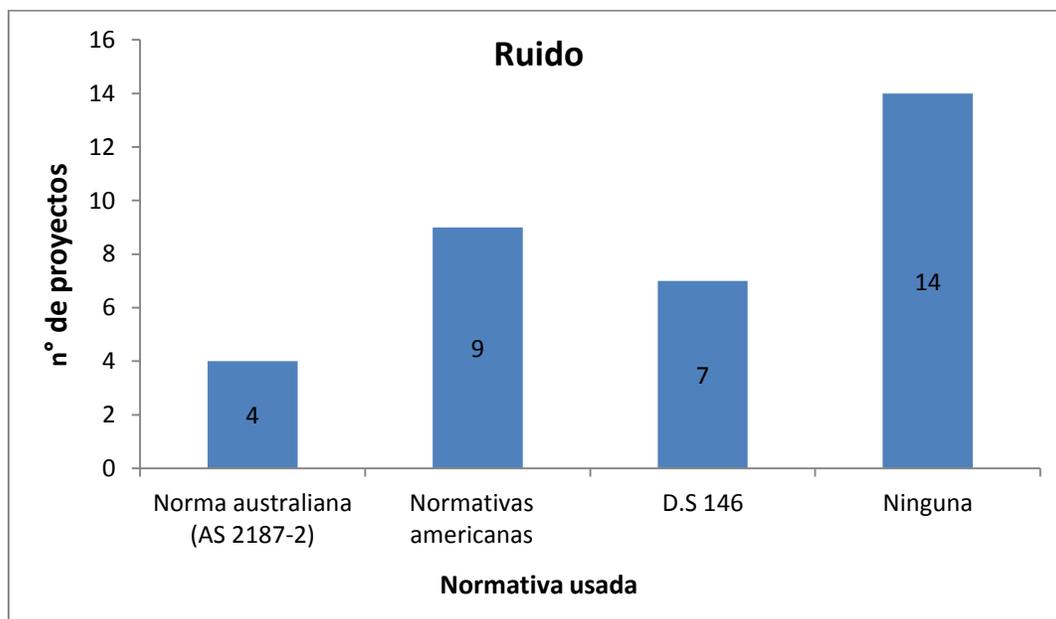
En este sentido, primero se realizó un análisis del marco jurídico-ambiental de nuestro país, para así establecer como se abordan, de manera general, estos fenómenos. En la ley N°19.300 “sobre bases generales del medioambiente”, artículo n°2, literal (d), se reconoce que tanto el ruido como la vibración, bajo ciertas condiciones (duración, concentración nivel, etc.), pueden ser considerados como un contaminante. Por otro lado, y relacionados en forma directa con el control del ruido y vibración, encontramos el DS 38/2011, “norma de emisión de ruidos para fuentes que indica”, y el DS 594/2000, “reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en el lugar de trabajo”. Sin embargo, ambos cuerpos legales resultan ser inapropiados para el control del ruido y vibración generados por una tronadura. Por un lado, el artículo n°5, literal (f) del DS 38 indica explícitamente que este no es aplicable el ruido generado por tronaduras. Por otro lado, el DS 594, que evalúa la exposición a vibraciones tanto del cuerpo entero como solo del segmento mano-brazo, considera periodos de tiempo en el rango de horas, mientras que las tronaduras son fenómenos impulsivos, en el rango de los segundos. En otras palabras, este decreto considera la exposición prolongada a vibraciones producidas por maquinarias en el lugar de trabajo.

En resumen, podemos afirmar que nuestro país **NO** cuenta con alguna norma que permitan controlar los ruidos y vibraciones generados por una tronadura. Esto se debe a que, en un comienzo, la actividad minera a gran escala en nuestro país se había desarrollado en zonas alejadas de asentamientos humanos. Sin embargo, debido al aumento tanto de la población como de los proyectos mineros (en términos de cantidad y dimensiones), el contacto entre estos, y los correspondientes conflictos, se han vuelto inevitables.

En estos casos, o sea, cuando no existe en el país una normativa que permita evaluar los efectos de un contaminante, el artículo n°11 del DS 40/2013, “reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA)”, establece el uso, como referencia, de las normas de calidad ambiental vigentes en los siguientes países: *Alemania, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, España, México, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Países bajos, Italia, Japón, Suecia y Suiza*. Entonces, y con el objetivo de determinar cómo se aborda en nuestro país la

problemática de ruido y vibración generados por tronadura, se realizó un análisis de proyectos ingresados al SEIA en el periodo 2008 – 2013. Para llevar a cabo este análisis se consideraron el tipo de proyecto que por lo general involucran tronaduras, esto es, proyectos de desarrollo minero, embalses, líneas de transmisión eléctrica, acueductos, etc.

Se analizaron los estudios de impacto ambiental (EIA) de 58 proyectos\*. Lo primero fue establecer que proyectos contemplaban el uso del tronaduras en algún momento de su desarrollo. Del total de 58 proyectos, 34 (58,62%) si consideraron uso de tronaduras, mientras que 24 (41,38%)no lo hicieron, y solo analizaron los ruidos o vibraciones producidos por faenas de construcción o vehículos.El siguiente paso fue determinar cuántos,de los proyectos que si consideraron uso de tronaduras, evaluaron el ruido o la vibración generados por estas y que normativa se usó para este propósito. El grafico de la figura 1-1 muestra cómo, en los 34 proyectos que consideraron uso de tronaduras en algún momento de su desarrollo, se evaluó el contaminante ruido.



**Figura 1-1: Gráfico que ilustra cómo se evaluó el ruido producido por tronadura en los proyectos analizados.**

\* Un análisis detallado de cada proyecto analizado se puede encontrar en el anexo A de este trabajo.

Como vemos, del total de 34 proyectos, 14 de ellos (41%) no evaluaron el ruido producido por tronaduras, o sea, a pesar de reconocer el uso de tronaduras en algún momento de su desarrollo, no se incluyó en el respectivo EIA una evaluación del ruido producido por estas. Por otro lado, en 7 de los proyectos se recurrió a la versión anterior del DS 38 (DS 146), la cual, naturalmente, tampoco resulta adecuada para evaluar el ruido producido por tronaduras. En resumen, de los 34 proyectos considerados para este caso, 21 de ellos (cerca del 60%) no evaluaron el ruido producido por tronaduras o lo hicieron de forma incorrecta.

El gráfico de la figura 1.2 ilustra cómo, en los 34 proyectos que consideraron uso de tronaduras, se evaluó el contaminante vibración. En este caso, de los 34 proyectos considerados, 17 de ellos (50%) no evaluaron las vibraciones generadas por tronaduras. En 3 de ellos se recurrió a criterios particulares, encontrados en estudios o literatura científica relacionada con las vibraciones, o sea, criterios no establecidos en alguna norma de calidad ambiental vigente en cualquiera de los países señalados en el artículo n°11 del reglamento del SEIA. También es posible observar que La normativa Alemana, DIN 4150-3 (1999), fue la opción más recurrente para realizar la evaluación correspondiente.

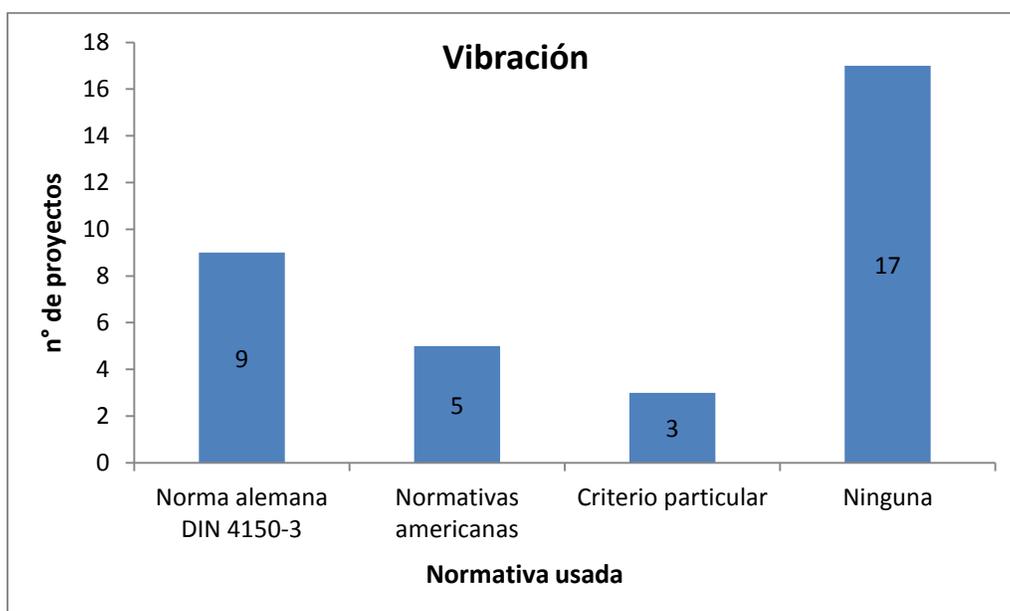


Figura 1-2: Gráfico que ilustra cómo se evaluó la vibración producida por tronaduras en los proyectos analizados.

Como podemos ver, en un gran número de casos la evaluación de los ruidos o las vibraciones generadas por tronadura simplemente no se lleva a cabo o se realiza de forma incorrecta. Más aun, cuando la evaluación si se realiza esta solo es parcial, ya que solo considera el efecto sobre personas (en el caso del ruido) o estructuras (en el caso de la vibración), pero nunca ambos. De esta forma, la utilidad de una guía que permita controlar los efectos, tanto en personas como estructuras, de los ruidos y vibraciones generados por una tronadura, se ve reafirmada.

En el año 2011 el señor Carlos Orlandi, presidente de la asociación chilena de ingenieros explosivistas, realizó la siguiente declaración: *“Los proyectos que requieren la utilización de tronaduras y se encuentran próximos a zonas urbanas, se han efectuado sin la existencia de una normativa que establezca sus niveles máximos de vibraciones y ruido. Producto de este escenario, los contratistas deben recurrir a estándares internacionales con la finalidad de comparar dichos criterios con los valores registrados en terreno...durante los próximos años, Chile demandará la construcción de nuevas obras, y con ello el uso de tronaduras para el movimiento de materiales debido a sus bajos costos asociados.”\**

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 objetivo general**

Elaborar una propuesta de guía que permita medir y predecir la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión de aire generados por tronaduras, y controlar sus efectos, tanto en estructuras como personas.

Esta guía deberá ser aplicable a cualquier tipo de proyecto que contemple el uso de tronaduras, ya sea en la fase de construcción, operación o cierre, y deberá considerar, entre otros aspectos, el montaje de los sensores, modelos predictivos, valores límites y medidas de mitigación.

---

\*<http://www.mch.cl/reportajes/norma-chilena-para-vibraciones/#>

### 1.3.2 objetivos específicos

- ❖ Familiarizarse con los aspectos teóricos y prácticos de la generación, transmisión, medición y predicción del ruido y vibración generados por una tronadura.
- ❖ Buscar y analizar normas, reglamentos o recomendaciones internacionales enfocadas al control de ruido y vibración generados por tronaduras, prestando especial énfasis a los descriptores seleccionados y a los valores establecidos como límites.
- ❖ Buscar y describir métodos que permitan reducir o mitigar los impactos sobre estructuras o personas del ruido y la vibración generados en una tronadura.

El trabajo se desarrollara de la siguiente manera. La propuesta de guía, a la que se hace mención como objetivo general, se dividirá en 2 partes, una que considerara ruido y otra para vibración. Estas serán construidas a partir de las conclusiones de los capítulos 3, 4 y 5 de este trabajo.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

Cuando la carga explosiva de una tronadura es detonada, parte considerable de la energía se desperdicia, ya sea en forma de vibración, ondas de sobrepresión de aire (ruido), rocas voladoras, polvo o gases nocivos. A continuación se indican los aspectos teóricos relacionados con la generación y propagación de vibraciones y ruidos en tronaduras.

#### 2.1 vibración

Una vibración puede ser definida como un movimiento repetido en torno a un punto de equilibrio. El estudio de las vibraciones se ve facilitado si están se consideran como ondas sinusoidales, caracterizadas por los siguientes parámetros:

- *Amplitud (A)*: máximo desplazamiento en relación al punto de equilibrio.
- *Periodo (T)*: tiempo requerido para completar una oscilación.
- *Frecuencia (f)*: número de oscilaciones por unidad de tiempo. Se mide en Hertz (Hz). Corresponde al inverso del periodo.

$$f = 1/T$$

- *Desplazamiento de partícula (d)*: desplazamiento de las partículas del medio al ser excitadas por la energía de la onda. Viene dado por la siguiente expresión:

$$d = A \sin \omega t \quad ; \quad \omega(\text{velocidad angular}) = 2\pi f$$

- *Velocidad de partícula (v)*: razón que describe cuanto se desplazan en un intervalo de tiempo las partículas del medio al ser excitadas por la energía de la onda. Viene dada por la siguiente expresión:

$$v = A\omega \cos \omega t$$

Es importante diferenciar entre este parámetro y la “velocidad de onda”, la cual corresponde a la velocidad con la que se propaga la onda o perturbación por el medio. Comúnmente la velocidad de onda es varios órdenes de magnitud mayor que la velocidad de partícula.

- *Aceleración de partícula (a)*: razón que describe como varía en el tiempo la velocidad de las partículas del medio al ser excitadas por la energía de la onda. Viene dada por la siguiente expresión:

$$a = A\omega^2 \sin \omega t$$

El rango de estos parámetros depende de varios factores, como la distancia a la fuente, la cantidad de explosivos detonados por intervalo de tiempo, etc. Estos factores se cubren con mayor profundidad más adelante en este trabajo, pero por el momento cabe señalar que la gran cantidad de combinaciones posibles entre estos factores genera un amplio rango de valores posibles, como se indica en la siguiente tabla:

Parámetro	Rango	unidades
<i>desplazamiento de partícula</i>	<i>0.0001 – 10</i>	<i>mm</i>
<i>velocidad de partícula</i>	<i>0.0001 - 1.000</i>	<i>mm/s</i>
<i>aceleración de partícula</i>	<i>10 - 100.000</i>	<i>mm/s<sup>2</sup></i>
<i>Frecuencia</i>	<i>0.5 – 200</i>	<i>Hz</i>
<i>duración pulso</i>	<i>0.1 – 2</i>	<i>S</i>

**Tabla 2-1: Rango de valores para los principales parámetros del fenómeno vibratorio.**

Para describir el movimiento de forma completa es necesario medir la magnitud de las componentes longitudinal, transversal y vertical, ya sea del vector desplazamiento, velocidad o aceleración. Cabe señalar que, como se verá más adelante, la mayoría de las normas internacionales que guardan relación con el manejo de vibraciones se basan en la variable velocidad. A cierta distancia de la tronadura, la energía liberada por esta decrece hasta un nivel en el cual tanto la fracturación como el movimiento de material ya no son posibles, así entonces la

energía continua viajando a través de la roca en forma de una vibración elástica, también denominada *onda sísmica*.

## Ondas sísmicas

Cabe señalar que, aunque las ecuaciones clásicas para ondas elásticas no son completamente adecuadas para caracterizar las vibraciones generadas por una tronadura (debido a fenómenos de superposición de ondas, atenuación y dispersión entre otras cosas), estas siguen siendo, hasta la fecha, el mejor modelo simplificado para analizar este fenómeno.

Las ondas sísmicas se transmiten rápidamente a través del medio sólido, el cual regresa a su configuración inicial después del paso de estas. La masa de roca puede ser considerada un medio elástico formado por multitud de partículas individuales. Existen varios tipos de ondas sísmicas. Basadas en sus propiedades se pueden dividir en 2 tipos: *ondas de cuerpo* y *ondas de superficie*.

### 2.1.1 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo son ondas que pasan a través de la masa de roca. Pueden ser subdivididas en:

- a) *Ondas P (primaria)*: corresponde a una onda de compresión, esto es, altera el volumen de un elemento de volumen, pero no su forma. En este caso las partículas oscilan en la dirección de propagación de la onda.

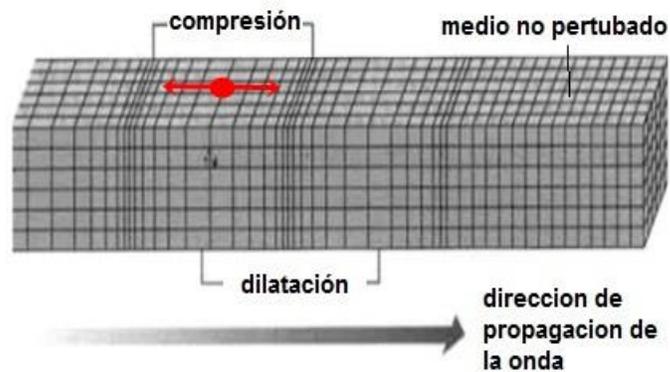


Figura 2-1: Onda P o primaria.

b) *Ondas S (secundaria)*: Corresponde a una onda de corte que solo resulta en un cambio de forma. En este caso las partículas del medio oscilan de manera perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

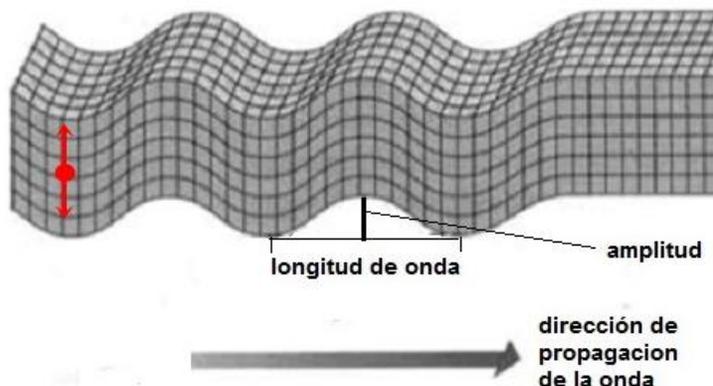


Figura 2.2. Onda S o secundaria.

Las velocidades de propagación de las ondas P y S pueden ser estimadas a partir de parámetros que caracterizan la elasticidad del material según las siguientes expresiones:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_r(1-2\nu)(1+\nu)}}; \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho_r(1+\nu)}}$$

Donde E es el módulo de Young,  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $\rho_r$  es la densidad del material. Las ondas P son las que más rápido se transmiten por el medio rocoso, razón por la cual son las primeras en ser registradas (de ahí su nombre). Las ondas S viajan con aproximadamente un 50 o 60 % de la velocidad de las ondas P, por esto son detectadas después de ellas.

Las ondas de cuerpo se propagan hacia afuera en forma esférica hasta que se intersectan en un límite del terreno, como puede ser otra capa de roca o la misma superficie del suelo. En este punto de intersección se producen otro tipo de ondas, conocidas como *ondas de superficie*.

### 2.1.2 ondas de superficie

Las ondas de superficie son ondas que, como su nombre lo indica, viajan a lo largo de la superficie. Pueden ser subdivididas en:

- a) *Ondas R (Rayleigh)*: Es una onda longitudinal que produce en las partículas un movimiento elíptico retrogrado. Su velocidad es solo 10% menor al de las ondas S.

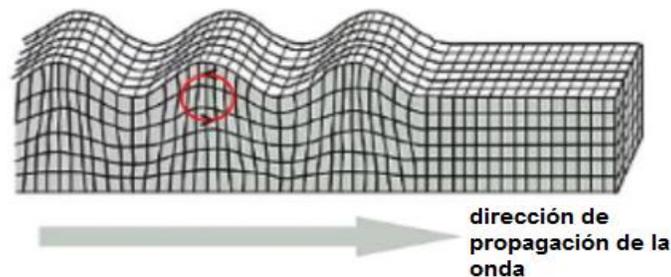


Figura 2-3: Onda R (Rayleigh).

- b) *Ondas Q (Love)*: Es una onda transversal que causa un movimiento oscilatorio que puede ser circular o elíptico. No posee componente vertical y su velocidad es aproximadamente la misma de las ondas R.

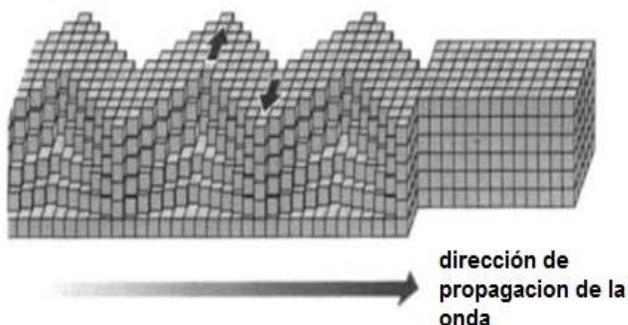


Figura 2-4: Onda Q (Love).

- c) *Ondas acopladas (C)*: Es una onda que tiene componentes tanto en la dirección horizontal como en la vertical. Produce un movimiento oscilatorio de tipo elíptico e inclinado. El término “acoplada” implica movimientos combinados de ondas P y S.

La figura 2-5 compara las ondas C con las ondas R, mientras que la figura 2-9 muestra todos los tipos de ondas ya descritos en un mismo diagrama

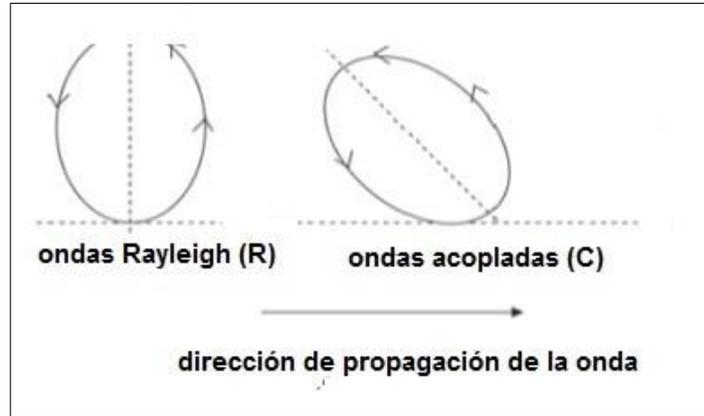


Figura 2-5: Comparación entre ondas R y C.

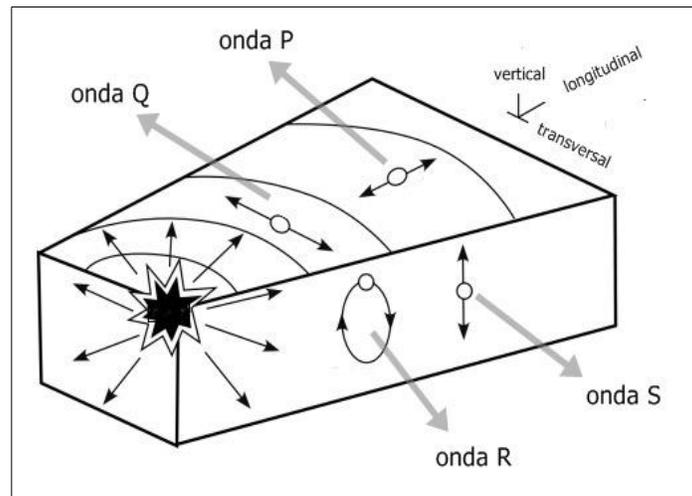


Figura 2-6: Ondas de cuerpo y ondas de superficie en una tronadura.

A distancias cortas, todas las ondas descritas, tanto de cuerpo como de superficie, llegan aproximadamente al mismo tiempo. Sin embargo, al alejarnos de la fuente las diferencias de velocidades entre los distintos tipos de ondas se manifiestan y comienza a notarse una clara separación entre ellas. La figura 2-7 muestra un registro de vibraciones realizado en la mina "Hunter Valley" de Australia e ilustra precisamente dicho fenómeno.

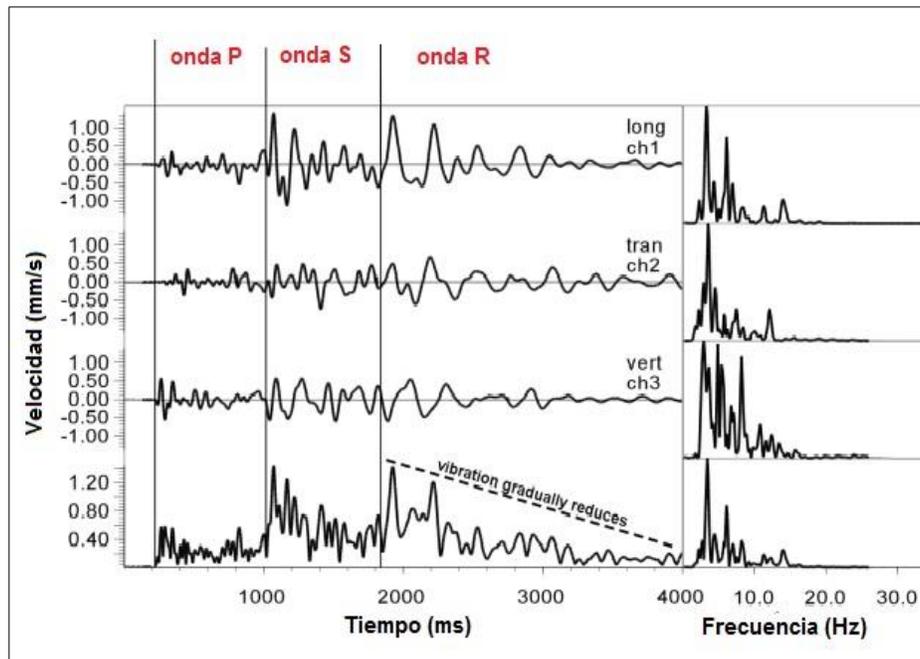


Figura 2-7: Registro de una tronadura (mina Hunter Valley, USA).

Este registro se obtuvo a 1800 m de una tronadura consistente en un solo pozo con 1000 kg de explosivos. Como vemos, la onda P es la primera en ser detectada, seguida por las ondas S y R respectivamente. Después de unos 4s la vibración prácticamente desaparece. Sin embargo, la mayoría de las tronaduras consisten en una serie de explosiones separadas por milisegundos, debido a esto (como también a diferencias en los caminos recorridos) el registro que se obtiene de cada una de ellas consiste en una superposición de diferentes frentes y tipos de onda.

La velocidad con la que desaparece una onda depende en gran medida de la naturaleza de los materiales a través de los cuales pasa. Por su naturaleza, las ondas sísmicas se transmiten mejor a través de medios elásticos, isótropos y homogéneos, características que no poseen, por ejemplo, la arcilla o la arena, las cuales transforman rápidamente la energía de una onda en calor a través de fricción. Un macizo rocoso tampoco puede considerarse un medio elástico, isótropo y homogéneo perfecto, ya que en la propagación de las vibraciones ocurren varios efectos inelásticos que causan pérdidas de energía, pero considerarlo como tal constituye, como ya se indicó, una buena aproximación.

## 2.2 Sobrepresión de aire (Ruido).

Una sobrepresión de aire se define como cualquier presión mayor a la presión atmosférica. Para el caso de una tronadura, esta es producida ya sea por la acción directa de los productos de una explosión o por la acción indirecta de los materiales sujetos a la fuerza de dicha explosión.

La sobrepresión producida por la tronadura interactúa con el aire circundante e incrementa la presión de este hasta alcanzar un peak. La presión regresa entonces a su valor normal (atmosférico), luego alcanza valores negativos y finalmente vuelve a estabilizarse.

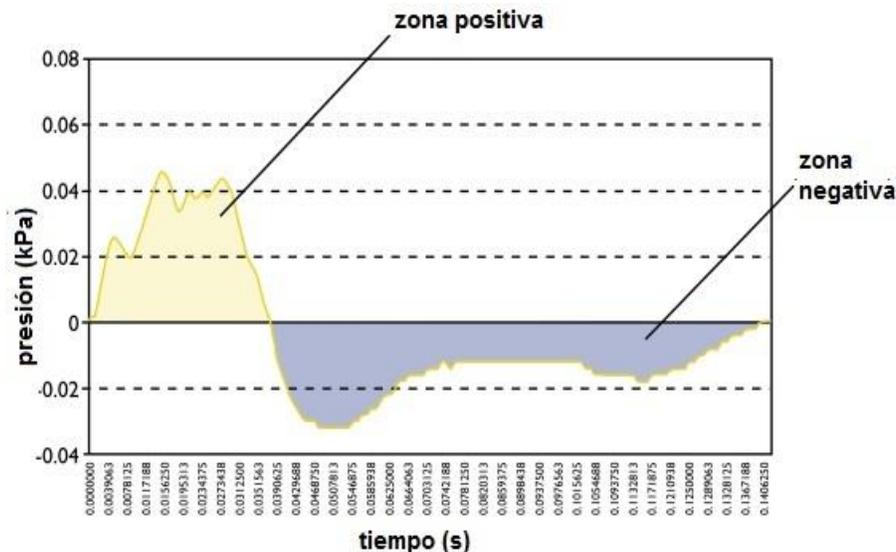


Figura 2-8: Comportamiento de una sobrepresión de aire provocada por una tronadura.

El camino que recorre esta perturbación depende de varios factores, como la temperatura del aire, la velocidad y dirección del viento y la presencia de obstáculos (edificios, formaciones rocosas, vegetación). La sobrepresión generada por una tronadura contiene ondas con frecuencias que se encuentran en el rango 2 – 200 Hz. Las ondas cuya frecuencia es igual o mayor a 20 Hz son percibidas como ruido, mientras que las que tienen frecuencias menores a 20 Hz son inaudibles, pero provocan la vibración de estructuras y objetos como vidrios, puertas y muebles. Estas ondas de baja frecuencia transportan la mayor parte de la energía que contiene la sobrepresión de aire generada por la tronadura.

Muchas de las quejas relacionadas con el uso de tronadura se atribuyen erróneamente a vibraciones de suelo, cuando en realidad son causadas por este tipo de ondas de baja frecuencia.

La sobrepresión de aire se puede medir ya sea en unidades de presión (psi, pascales, etc.) o en decibeles (dB), en cuyo caso se denomina nivel de presión sonora (NPS) y viene dado por la siguiente expresión:

$$NPS = 20 \log P/P_0$$

Donde  $P$  es la sobrepresión medida y  $P_0$  una presión de referencia. Esta presión de referencia corresponde al sonido de más baja magnitud que resulta audible y tiene un valor de  $2 \times 10^{-5}$  pascales.

A partir del trabajo de varios autores se han identificado los principales mecanismos que provocan la sobrepresión de aire en una voladura, estos son: *Pulso de presión de aire (PPA)*, *pulso de presión de roca (PPR)*, *pulso de liberación de gas (PLG)* y *pulso de liberación de derivados (PLT)*.

### **2.2.1 Pulso de presión de roca (PPR)**

Es causado por la vibración vertical del suelo, o sea, la vibración del suelo induce una vibración en el aire (como también lo hace un tambor). Es, naturalmente, una fuente inevitable de sobrepresión. El nivel de presión inducida en el aire es directamente proporcional al nivel de vibración vertical. Debido a la rapidez con la que se propaga la vibración a través del medio el PPR es la primera señal en ser detectada.

### **2.2.2 Pulso de presión de aire (PPA)**

Se produce principalmente por el movimiento de rocas fracturadas desplazadas por gases de alta presión propios de la tronadura. Al igual que el PPR su carácter es inevitable. Como la roca fracturada se desplaza muy lentamente esta sobrepresión aparece después que el PPR en los registros. La figura 2-9 muestra un gráfico donde aparecen los dos tipos de pulsos ya descritos.

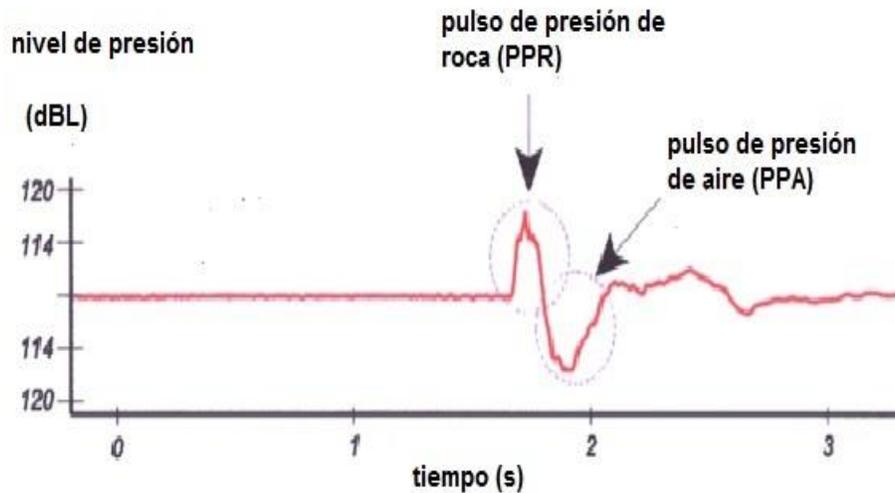


Figura 2-9: Registro de PPR y PPA.

La amplitud de ambos componentes, PPR y PPA, varía según las características geológicas del lugar y la geometría de la tronadura. En algunos casos el PPR es el componente principal de la onda de sobrepresión de aire, mientras que en otros casos resulta ser el PPA.

### 2.2.3 Pulsos de liberación de gas (PLG)

Se produce por gases que escapan a través de cavidades o fracturas en la masa rocosa. A diferencia de las dos primeras componentes, su carácter es de “evitable” (a través de un buen diseño de la tronadura). Debido a la alta presión y velocidad de los gases que escapan, este tipo de pulso presenta una elevada frecuencia y es, por lo general, la principal causa de molestias para las personas.

### 2.2.4 Pulso de liberación del taco (PLT)

Se produce por gases que escapan a través de la mezcla de derivados usados como taco en las columnas de la tronadura. En los registros, tanto el PLT como el PLG aparecen superpuestos al PPA y PPR, esto significa que cualquier liberación de gas incrementa el NPS obtenido (en casos extremos, causados principalmente por un mal diseño de la tronadura, este incremento puede ser de hasta 20 dB). La figura 2-10 muestra un gráfico donde aparecen los dos tipos de pulsos recientemente descritos.

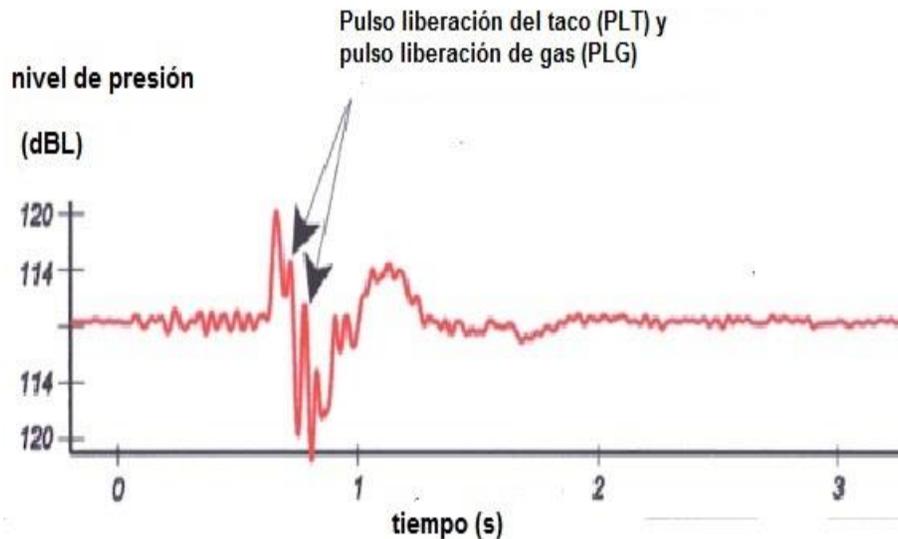


Figura 2-10: Registro de PLG y PLT.

### 2.3 Factores que determinan la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión de aire

Antes de seguir conviene explicar algunos términos que forman parte de las operaciones con tronadura, especialmente en minería. En su forma más básica, el diseño de una tronadura consiste de una serie de pozos o barrenos, los cuales son rellenos con explosivos y sellados con un taco de material inerte para confinar los gases y evitar así una proyección excesiva. Este diseño también debe considerar la distancia que hay entre cada pozo y la cara libre del macizo rocoso (*Burden*), como también la distancia de separación o espaciamiento que hay entre pozos subsecuentes, como se muestra en la figura 2-11. El concepto de *acoplamiento* hace referencia al grado de contacto entre el explosivo colocado en la columna y la roca que lo rodea, de esta manera, cuando el diámetro de la carga explosiva es menor que el diámetro del pozo se dice que la carga está desacoplada. La *concentración de carga lineal* indica la cantidad de explosivo a lo largo de una columna y se mide en kg/m. Por otro lado el *factor de volumen* se refiere a la cantidad de explosivo usado para fracturar o romper un volumen de roca (se mide en kg/m<sup>3</sup>).

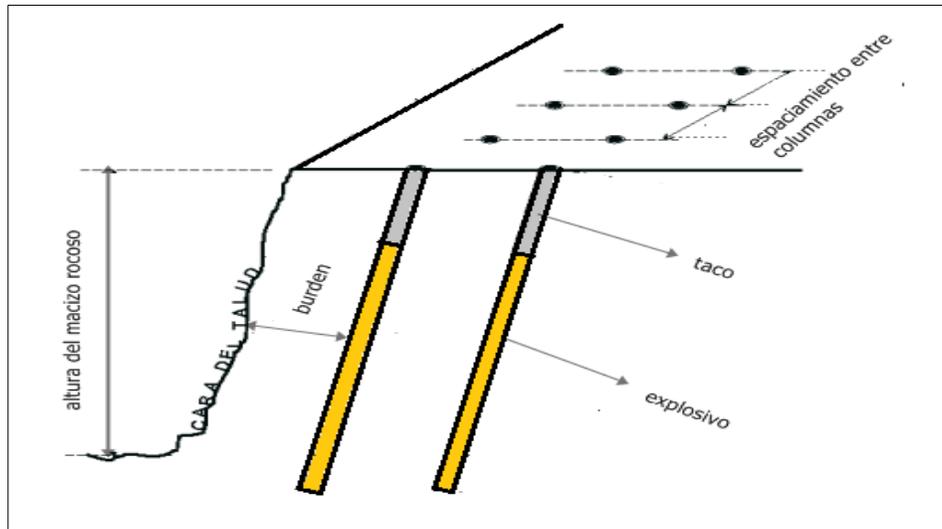


Figura 2-11: Terminología básica para tronaduras en minería.

También tenemos el *iniciador*, el cual corresponde a una carga que tiene la función de iniciar la reacción explosiva en el pozo. Es común encontrar *tacos de aire*, los cuales consisten en la combinación de un taco regular y una sección vacía de la columna, como se ve en la figura 2-12. Su función es reducir el impacto de la explosión en la roca adyacente.

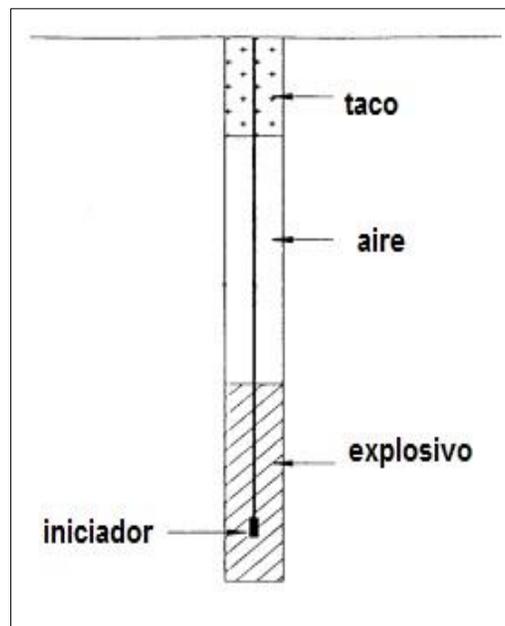


Figura 2-12: Taco de aire.

Volviendo a los factores que influyen en la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión de aire, encontramos que estos pueden ser agrupados en dos categorías: *controlables* y *no controlables*. Los factores controlables incluyen el diseño de la tronadura, tipo y cantidad de explosivo, tipo y cantidad de material usado como taco y los métodos de inicio y disparo. Por otro lado, los factores no controlables incluyen la distancia de separación entre la tronadura y los potenciales receptores, la topografía, las características geológicas y las condiciones meteorológicas. A continuación se explican brevemente estos factores.

### **2.3.1 Diseño de la tronadura**

El burden influye fuertemente tanto las vibraciones como los niveles de sobrepresión de aire generados por una tronadura. Un burden demasiado grande implica un aumento en la magnitud de las vibraciones. Esto ocurre porque la energía explosiva contenida en el pozo no resulta ser suficiente como para romper la roca y es, por lo tanto, convertida en otras formas de energía, como vibraciones. Por otro lado, si el burden es muy pequeño la energía explosiva rompe la roca, pero aún queda un resto de energía, la cual se transfiere en forma de gases. Al salir, estos gases pueden generar altos niveles de sobrepresión de aire.

El espaciamiento entre pozos y los tiempo de retardo entre ellos es otro importante factor que determina los niveles de sobrepresión de aire. Cuando la carga contenida en un pozo explota, se genera un frente de onda que se expande en todas direcciones. Ahora, cuando existen dos o más pozos puede ocurrir que, bajo un determinado espaciamiento y tiempo de retardo, los frentes de ondas se sobrepongan (interferencia constructiva), provocando un aumento o reforzamiento de nivel de presión sonora en una determinada dirección. La figura 2-13 ilustra el patrón de sobreposición generado por una tronadura de cuatro filas con cuatro pozos cada una, un burden de 8 metros, espaciamiento de 9 metros y un retardo de 25 ms. Como se puede observar, la sobreposición ocurrió en una zona particular, en la cual se registraron niveles de sobrepresión que sobrepasaron en hasta 20 dB los valores registrados en zonas sin ese fenómeno.

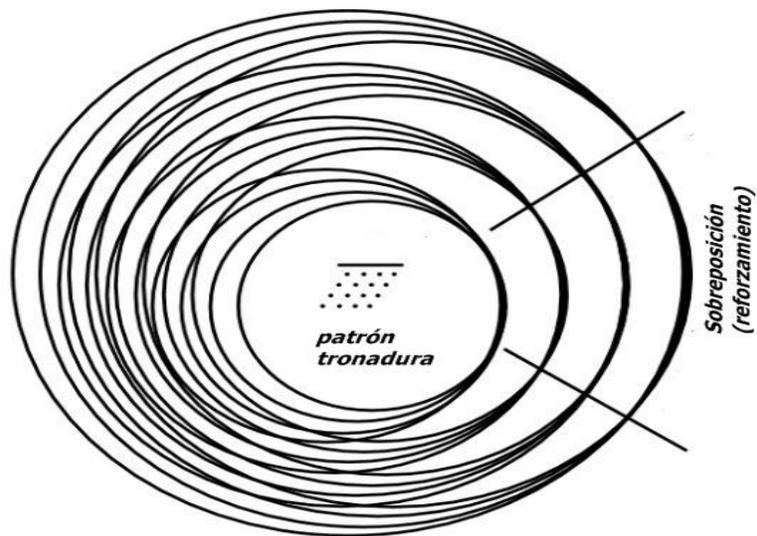


Figura 2-13: Los diferentes frentes de ondas generados por la tronadura se superponen en una dirección particular.

Por otro lado, al reducir el tiempo de retardo de 25 a 17 ms se observó sobreposición en dos direcciones, como lo muestra la siguiente figura.

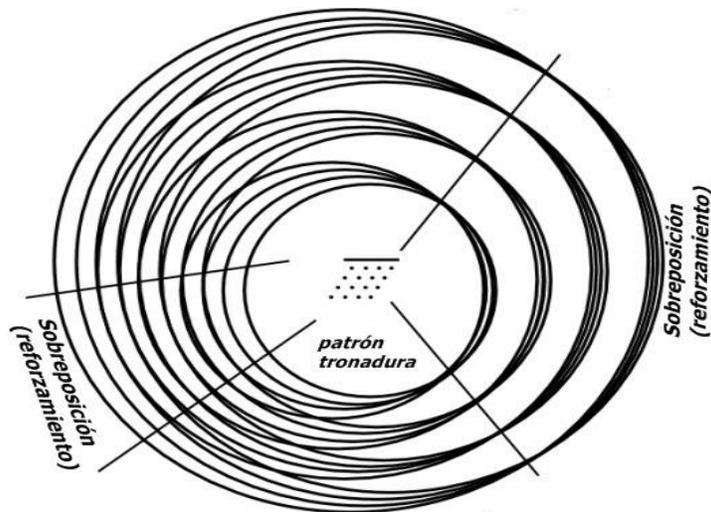


Figura 2-14: Al reducir el tiempo de retardo en 8 ms se produce reforzamiento en 2 zonas.

Naturalmente, el fenómeno de sobreposición también puede observarse en las vibraciones que se propagan a través del suelo. Sin embargo, sus características no solo están determinadas por el diseño de la tronadura (separación entre pozos y tiempo de retardo entre ellos), como ocurre con las ondas de sobrepresión, sino

que también depende del tipo de terreno. Por otro lado, si el intervalo de retraso entre filas es inadecuado, entonces el burden de la primera fila no puede desplazarse lo suficiente como para que la fila subsiguiente disponga de una cara libre, por lo tanto las cargas estarán más confinadas y aumentaran los niveles de vibración.

El diámetro del pozo también se debe tener en consideración, ya que la cantidad de explosivo que se usa es proporcional al cuadrado de dicho diámetro. De esta forma, un aumento del diámetro puede resultar en que se termine con una carga excesiva.

La profundidad del pozo también debe ser la ideal, ya que pozos muy profundos aumentan los niveles de vibración. Esto ocurre porque al aumentar la profundidad cada vez menos energía se usa en la fracturación de la roca y más se transfiere en forma de vibración. Por último, se ha observado que pozos inclinados permiten una mejor distribución de la energía, con la consecuente reducción de los niveles de vibración.

### **2.3.2 Tipo y cantidad de explosivo**

La magnitud, tanto de las vibraciones como de las ondas de sobrepresión, es directamente proporcional a la cantidad de explosivo usado en cada pozo. Explosivos que producen más energía gaseosa que energía de rompimiento, como los ANFO\*, tienen una mayor posibilidad de generar eyección de gases, incrementando así los niveles de sobrepresión de aire. Por otro lado, explosivos de tipo gelatina o lodo producen mayores niveles de vibración.

### **2.3.3 Tipo y tamaño de taco**

El tipo y la cantidad de taco influyen en los niveles de sobrepresión de aire generados por la tronadura. Si no se usa la cantidad y el tipo apropiado de taco puede ocurrir que parte de este se pierda durante la detonación, permitiendo el escape de gases y evitando que su energía se use efectivamente para romper la roca.

---

\* El anexo C de este trabajo cubre en más detalle los diferentes explosivos usados en tronaduras.

### **2.3.4 Métodos de inicio y disparo**

Diversos estudios han demostrado que cuando el inicio de la reacción explosiva se realiza en el fondo del pozo se generan menores niveles de sobrepresión de aire, pero la magnitud de las vibraciones resulta ser mayor. El cordel que se usa a veces en trabajos de minería superficial para detonar la carga es una importante fuente de ondas de presión de alta frecuencia. Para evitar este fenómeno se acostumbra cubrir dicho cordel con arena, aunque también es posible usar otros sistemas de iniciación, como el *cordel de detonación de baja energía* (LEDC), o incluso sistemas no eléctricos (Nonel).

### **2.3.5 Distancia entre la tronadura y el receptor**

La magnitud de las vibraciones disminuye con la distancia. Se ha establecido que esta disminución obedece a una ley del tipo  $1/D^\alpha$ , donde  $\alpha$  es una constante\*. La distancia también atenúa las ondas de altas frecuencias, comportándose así como un filtro. Debido a esto, en el campo lejano dominan vibraciones de baja frecuencia.

La disminución de los niveles de sobrepresión con la distancia obedece a una ley similar. Se sabe que el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional disminuye en 6 dB al duplicar la distancia desde la fuente. Para el caso de tronaduras, se ha establecido que al doblar la distancia, y si no intervienen condiciones meteorológicas o topográficas, la disminución es de 7 a 10 dB.

### **2.3.6 Topografía**

Colinas o formaciones rocosas pueden reducir notablemente los niveles de sobrepresión en una zona, actuando prácticamente como escudos o barreras. La magnitud de dicha reducción depende de la altura efectiva de dichas formaciones y del ángulo de incidencia que existe entre la tronadura y el lugar de medición (figura 2-15)

---

\* Este tema se discute en mayor profundidad en el próximo capítulo.

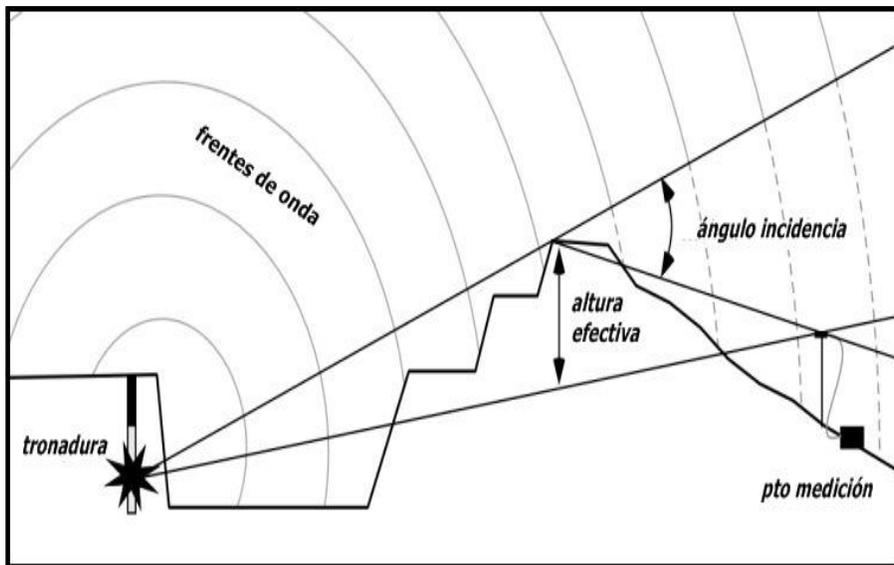


Figura 2-15: Una colina actúa como barrera ante el paso de los frentes de onda, reduciendo los niveles de sobrepresión.

### 2.3.7 Propiedades geológicas del terreno.

Cerca de una tronadura, las características de las vibraciones están, en gran medida, determinadas por el diseño mismo de la tronadura. Sin embargo, al alejarnos de la tronadura las propiedades geológicas del terreno, como la fuerza, densidad y la porosidad de la roca, comienzan a ser el principal factor que determina las características de las vibraciones.

Cuando las ondas de vibración se desplazan lo hacen a través de masas de roca que no son homogéneas, debido a esto en las discontinuidades entre estratos se produce una dispersión de dichas ondas, bajando los niveles de vibración. Otro método de disipación es la fricción, cuyo efecto es más notable mientras mayor sea la porosidad y compactación del terreno. Es importante señalar que a veces las componentes laterales de una onda de vibración se pierden al cruzar una discontinuidad.

Estudios realizados por Stagg y Dowding (1980) demostraron que las frecuencias de las vibraciones producidas por tronaduras en minas de carbón son inferiores a las generadas en canteras y obras públicas, como se muestra en los siguientes gráficos.

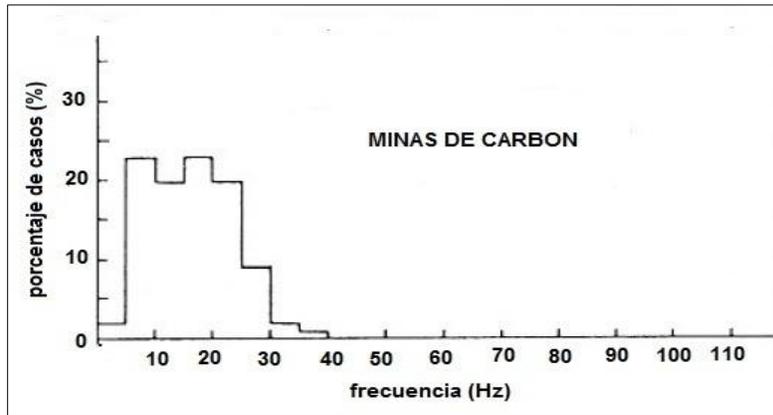


Figura 2-16: Rango típico de frecuencias en minas de carbón.

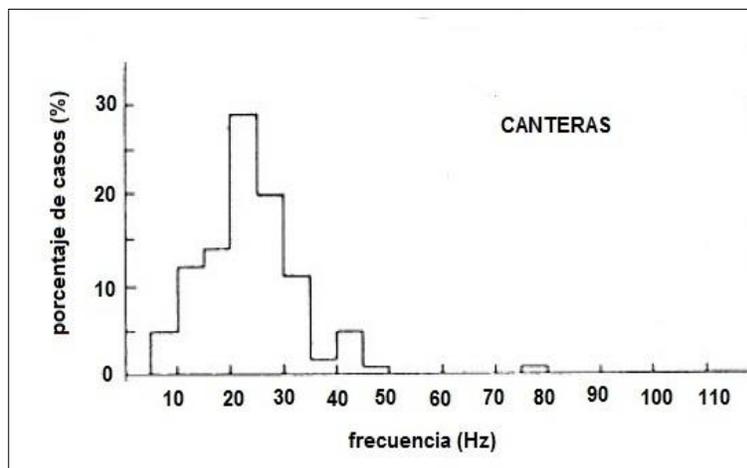


Figura 2-17: Rango típico de frecuencias en canteras.

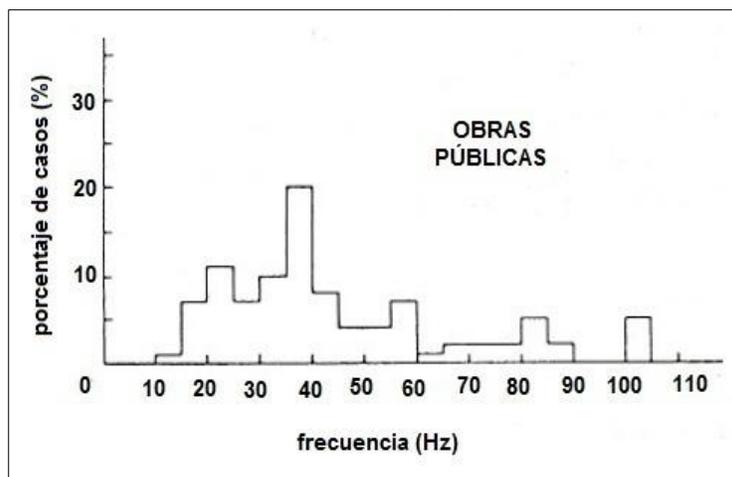


Figura 2-18: Rango típico de frecuencias en obras públicas.

### 2.3.8 Condiciones meteorológicas

Debido a que una onda de sobrepresión de aire se transmite por la atmosfera, resulta natural que su magnitud dependa de factores meteorológicos, tales como temperatura, humedad, velocidad, dirección del viento, etc. En condiciones ideales, el nivel de sobrepresión de aire se reducirá en 6 dB al doblar la distancia entre la fuente y el lugar de la medición. Sin embargo, en condiciones reales, la complejidad en las variaciones de los factores meteorológicos no permite establecer un valor fijo. Se tiene entonces que en algunos sectores puede haber una reducción menor a 6 dB, y en otros una reducción mayor. Por otro lado, ciertas condiciones, como vientos moderadamente fuertes o una inversión térmica, pueden amplificar el nivel de sobrepresión en una determinada zona del campo lejano. Para visualizar este fenómeno es conveniente considerar a los frentes de onda como “rayos de sonido”, como se muestra en la figura 2.19. En estas circunstancias, se pueden llegar a registrar incrementos de entre 10 y 20 dB(L) a distancias superiores a 1 km. Se debe tener en consideración que este tipo de fenómeno está asociado principalmente a tronaduras de gran escala (de varias filas y columnas), siendo poco probable que ocurra para tronaduras de un solo pozo.

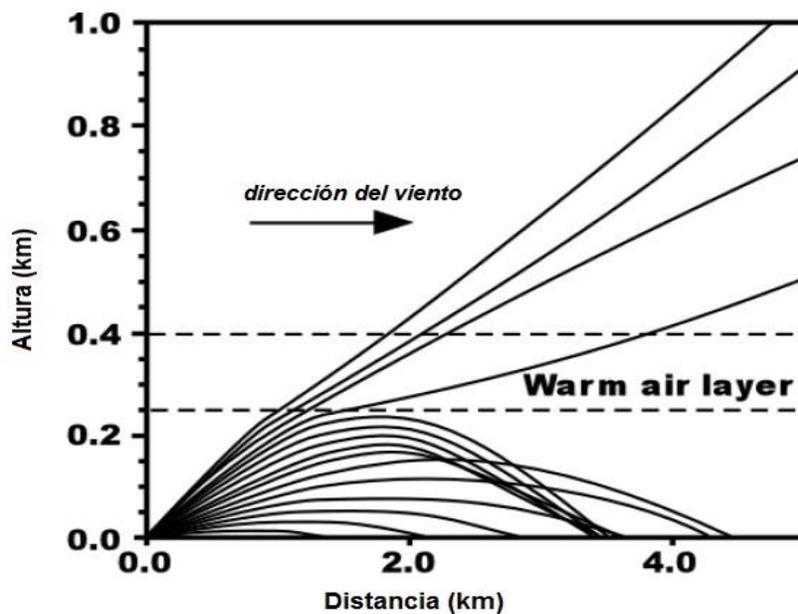


Figura 2-19: Factores meteorológicos.

## CAPITULO 3

### Descripción general de los instrumentos y métodos usados para medir ruido y vibración.

Este capítulo comienza con una breve descripción de los instrumentos que por lo general se usan para medir ruido y vibración. Luego se procede a indicar las prácticas o procedimientos más recomendados a la hora de realizar las mediciones correspondientes para cada caso. Finalmente se presentan una serie de conclusiones, las cuales serán consideradas en la propuesta final de guía.

#### 3.1 Generalidades

Un sistema diseñado para medir ruido o vibración debería estar formado por 5 elementos. El primer y más importante de ellos es el *transductor*, el cual convierte una señal determinada en otra de diferente tipo. En nuestro caso, el transductor se encarga de transformar una presión de aire o una vibración en una señal eléctrica. El micrófono es el principal transductor usado para registrar ruidos, mientras que el acelerómetro, y en menor medida el geófono, son los transductores preferidos para registrar vibraciones.

Por lo general, la señal producida por estos transductores no puede ser analizada directamente, así que el segundo elemento es un acondicionador de señales, el cual se usa para amplificar, atenuar o transformar la señal usando conversión *análogo-digital*.

El siguiente elemento es un *procesador de señales*, el cual puede consistir, entre otras cosas, de un filtro de bandas o un analizador de densidad de probabilidad. Por lo general el cuarto elemento corresponde a una unidad de almacenaje, la cual, como su nombre lo indica, guarda los datos registrados.

El último elemento es la unidad de lectura, la cual permite leer los datos. Una computadora puede realizar esta función, además de realizar otros análisis de la señal. La figura 3-1 muestra estos elementos integrados en un sistema de medición.

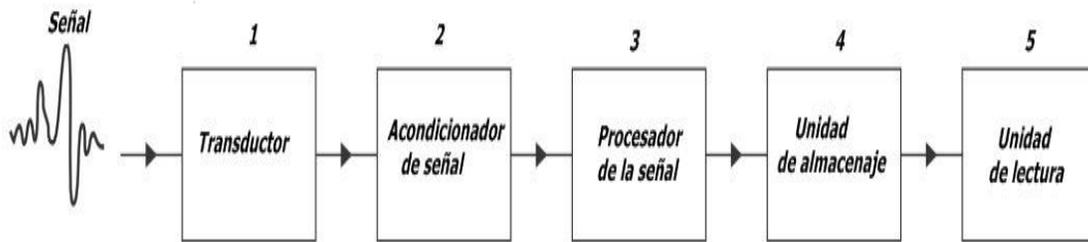


Figura 3-1: Esquema básico de un sistema para medir ruido o vibración.

Dado que el transductor es la parte más importante del sistema de medición conviene analizar sus características en mayor profundidad, partiendo por su sensibilidad ( $S$ ). Este parámetro se define como la razón entre la amplitud del voltaje de salida y la amplitud de la presión o aceleración de entrada, en otras palabras, la sensibilidad se expresa en  $[V/(N/m^2)]$  o  $[V/(m/s^2)]$ . Idealmente, la amplitud del voltaje de salida del transductor ( $V$ ), junto con los otros elementos del sistema, debería ser proporcional a la amplitud de la presión ( $p$ ) o de la aceleración ( $a$ ). En la realidad, sin embargo, esta proporcionalidad se da en un intervalo, cuyos límites (inferior y superior) están determinados por el tipo de transductor, como lo muestra la figura 3-2. En la medición de ruido, por ejemplo, el límite inferior está determinado por el punto en el cual el voltaje generado por la presión de aire comienza a ser inferior al ruido eléctrico. Por otro lado, cuando la presión de aire es muy alta el desplazamiento del diafragma dentro del micrófono se vuelve excesivo y el voltaje generado ya no es proporcional a dicho movimiento, o sea, la no-linealidad determina el límite superior (algo similar ocurre en los acelerómetros).

Este intervalo, donde la respuesta del transductor es constante, se conoce como *rango dinámico* ( $\Delta R$ ) y viene dado, tanto para un transductor que mide ruido o vibración, por las siguientes expresiones:

$$\Delta R = 20 \log \left( \frac{V/p}{V_0/p_0} \right) = 20 \log \left( \frac{V/V_0}{p/p_0} \right) \quad ; \quad \Delta R = 20 \log \left( \frac{V/a}{V_0/a_0} \right) = 20 \log \left( \frac{V/V_0}{a/a_0} \right)$$

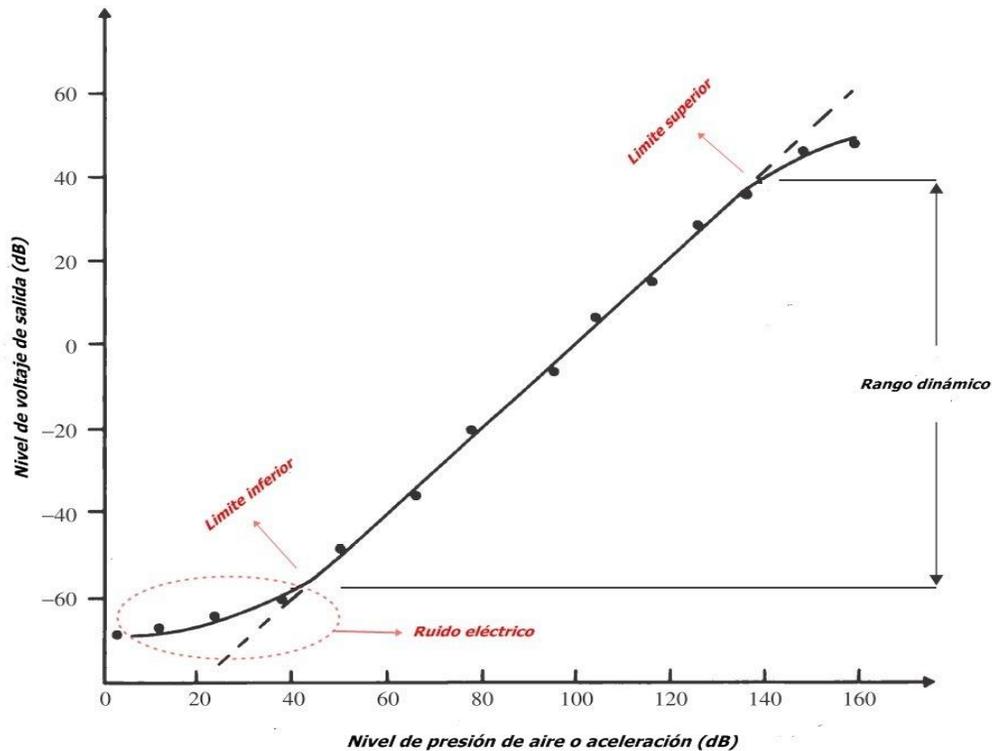
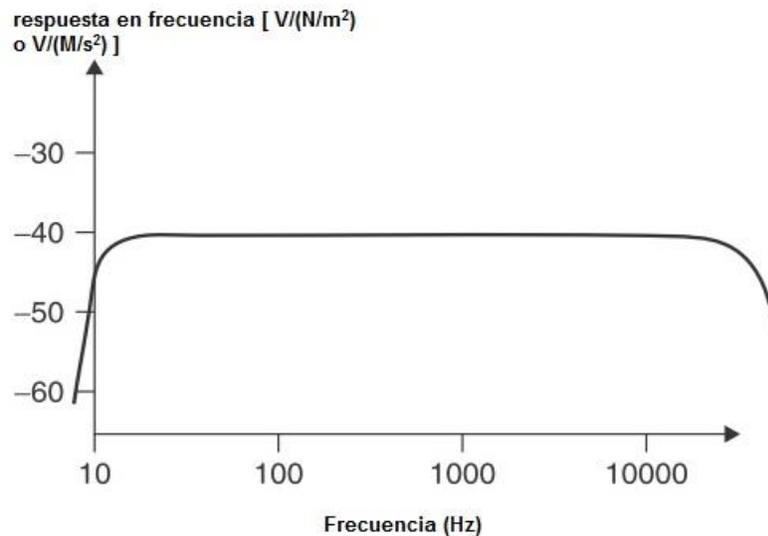


Figura 3-2: respuesta en voltaje de un transductor.

Los valores de referencia que aparecen en estas expresiones son, por lo general,  $V_0 = 1[V]$ ,  $p_0 = 20[\mu Pa]$  y  $a_0 = 1[\mu m/s^2]$ . El rango dinámico en el ejemplo de la figura 3-2 es de aproximadamente unos 100 dB. Cabe señalar que los micrófonos de buena calidad tienen un rango dinámico entre los 100 y 120 dB (muy similar al oído humano).

Al incrementar el diámetro del diafragma en un micrófono (o la masa inercial de un acelerómetro) la sensibilidad de estos, por lo general, también se incrementa. De esta forma se reduce el problema del ruido eléctrico, aumentando el rango dinámico del transductor.

La siguiente propiedad a considerar es la respuesta en frecuencia. Idealmente, la respuesta de un transductor debería ser plana en un intervalo de frecuencia, como lo muestra la figura 3-3. En la práctica esto no ocurre, debido entre otras cosas a fenómenos de resonancia del diafragma en el micrófono o de la masa inercial del acelerómetro.



**Figura 3-3: Respuesta ideal de un transductor en un rango de frecuencia.**

Existen dos problemas que afectan  $s^2$ a los transductores y que resaltan como los más importantes. El primero es que estos normalmente responden a otras variables, a parte de las cualesque están diseñados para registrar. Así tenemos que un micrófono, a pesar de que su propósito es medir los cambios de presión en el aire, puede ser ligeramente sensible a cambios en la temperatura, humedad, campos magnéticos e incluso vibraciones. El segundo problema es que, al introducir un transductor en un medio, resulta muy difícil no alterar dicho medio de alguna forma. Un acelerómetro, por ejemplo, añade masa al sistema, alterando su vibración, mientras que un micrófono refleja y refracta la onda sonora incidente.

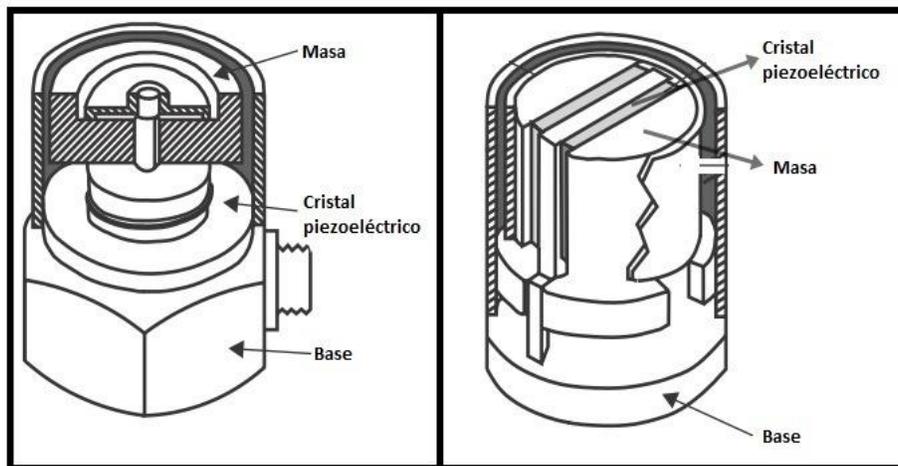
### **3.2 Medición de vibraciones.**

El paso de una onda de vibración por un material provoca que las partículas de este se muevan en tres dimensiones de forma compleja. Entonces, para definir el movimiento de forma completa es necesario medir sus tres componentes, esto es, longitudinal (X), transversal (Y) y vertical (Z).El problema radica en que la vibración no solo provoca el movimiento de la superficie, sino que también el del instrumento, dificultando que se establezca un punto fijo a partir de cual realizar la medición. Esta situación se soluciona estableciendo un punto de referencia que permanece fijo durante el evento.

Como ya vimos, la medición de vibraciones se realiza usando transductores, siendo los más usados los sensibles a la aceleración, conocidos como acelerómetros, y los sensibles a la velocidad, conocidos como geófonos o velocímetros.

### 3.2.1 Acelerómetro

El tipo de acelerómetro más usado es el piezoeléctrico. Este consiste en una pequeña masa unida a un cristal piezoeléctrico. La fuerza producida por la aceleración de esta masa causa un esfuerzo sobre el cristal, el cual a su vez genera un voltaje proporcional a dicho esfuerzo. La masa señalada puede estar colocada tanto para producir un esfuerzo de compresión como un esfuerzo corte.



**Figura 3-4: Dos tipos de acelerómetros. El de la izquierda está diseñado para generar un esfuerzo de compresión sobre el cristal, mientras que el de la derecha provoca un esfuerzo de corte sobre el mismo.**

Los acelerómetros operan en frecuencias inferiores a la de su resonancia natural, la cual puede ser tan baja como 1000 Hz o tan alta como 18 KHz, dependiendo principalmente del tamaño de estos. Responden en un amplio rango de frecuencias (0.001 – 25.000 Hz), pero el voltaje que genera la deformación de su cristal piezoeléctrico suele ser pequeño, por lo que debe ser amplificado externamente. Su peso varía desde los 0.2 g hasta los 500g. Siempre se debe tener en consideración que la masa de un acelerómetro (o cualquier sensor) puede alterar la magnitud de las vibraciones. Naturalmente, entre más pequeño

sea este menos se verá afectada la medición, aunque los acelerómetros pequeños tienen la desventaja de ser menos sensibles. Por otro lado, una temperatura de 200°C puede alterar en hasta un 10% la sensibilidad de un acelerómetro, pero si este se enfría con ayuda de algún mecanismo, entonces puede llegar a medir en superficies cuya temperatura alcance los 400 °C.

### 3.2.2 Geófono o velocímetro

Consiste de una bobina que se mueve dentro del campo magnético generado por un imán. La vibración del suelo provoca que la bobina se mueva dentro del campo magnético, lo que genera una corriente eléctrica de una magnitud proporcional a la velocidad con la que se mueve dicha bobina.

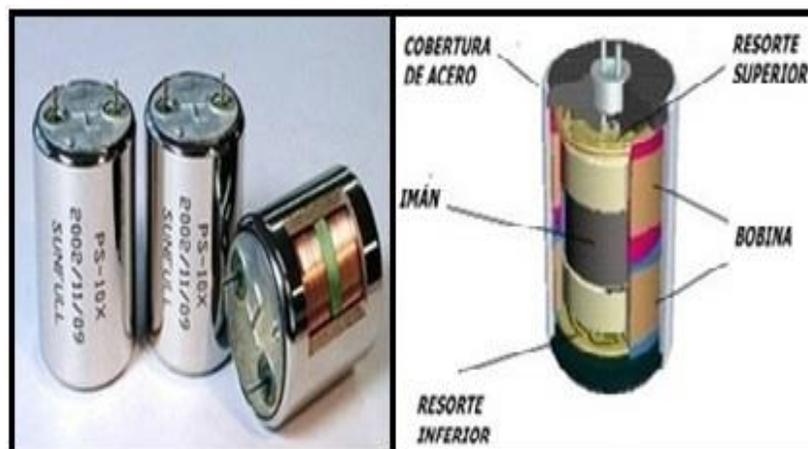


Figura 3-5: La foto de la izquierda muestra un geófono como tal, mientras que en la derecha se muestra un esquema del mismo.

El geófono opera en frecuencias superiores a la de su resonancia natural, que suele estar entre los 5 y 10 Hz. Debido a esto, cuando se miden vibraciones de muy baja frecuencia, su respuesta puede verse alterada y debe ser corregida. También se ha determinado que presentan problemas para frecuencias muy altas, sobre los 500 Hz. La mayoría de los geófonos comerciales tiene un rango dinámico de entre 1 y 100 mm/s. Algunos presentan un rango mayor, de entre 0.1 y 250 mm/s. Por lo general la sensibilidad de los velocímetros es del orden de unos 20 mV/mms<sup>-1</sup>. Entre sus ventajas podemos señalar su relativamente bajo costo y el hecho de que, por lo general, su señal de salida no

necesita ser amplificada antes de ser almacenada. Una de sus desventajas más notorias, aparte de su dificultad para responder en ciertos rangos de frecuencia, es que resultan ser algo delicados, por lo que si son mal manipulados pueden dañarse. Este tipo de sensor es el más usado para medir vibraciones producidas por tronaduras, ya que, como se verá más adelante, la velocidad es el parámetro en el cual se basan las normas internacionales para evaluar el potencial que tienen dichas vibraciones para provocar daños en estructuras y molestias en personas.

### 3.3 Medición de ruido

Existen varios equipos capaces de medir ruido, entre ellos el Sonómetro. Este mide los niveles de presión sonora (NPS) en decibelios (dB). Consiste de un micrófono, el cual convierte las ondas de presión de aire en una señal eléctrica, y un circuito que procesa dicha señal, como se indica en la figura 3-6. Dicho procesamiento consiste, entre otras cosas, en amplificar la señal para permitir la medición de niveles de presión muy bajos y realizar ponderaciones en frecuencia (para compensar la diferencia de sensibilidad del oído a diferentes frecuencias) o tiempo (velocidad con que se realizan un muestreo). Hasta hace poco existían cuatro clases de sonómetros (1, 2, 3 y 4), siendo su margen de error por bandas de frecuencia la característica que los diferenciaban. La norma IEC 61.672 (2003) redujo las clases a solo dos (1 y 2).

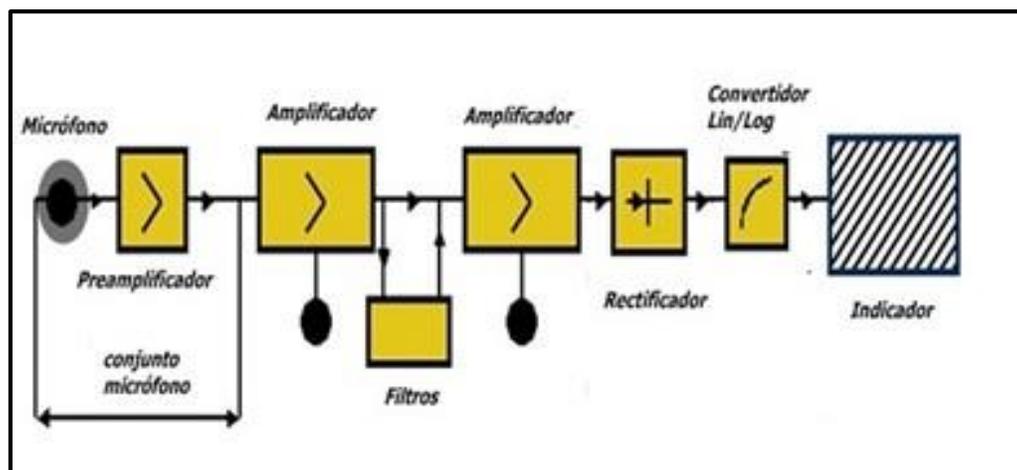


Figura 3-6: Esquema básico de un sonómetro.

La clase 1 se usa para trabajos de laboratorio y en la aplicación de normas, mientras que la clase 2 se usa para mediciones generales que no requieren mucha precisión. Naturalmente, los márgenes de error de la clase 1 son mucho menores que los de la clase 2, como se muestra en la siguiente tabla:

Frecuencia (Hz)	Margen de error (dB)	
	clase 1	clase 2
16	+2.5 ; - 4.5	+5.5 ; -4
31.5	± 2	± 3.5
63	± 1.5	± 2.5
125	± 1.5	± 2
250	± 1.4	± 1.9
500	± 1.4	± 1.9
1.000	± 1.1	± 1.4
2.000	± 1.6	± 2.6
4.000	± 1.6	± 3.6
8.000	+ 2.1 ; - 3.1	± 5.6
16.000	+ 3.5 ; -17	+ 6 ; -4

**Tabla 3-1: Margen de error según clase de sonómetro.**

Un sonómetro puede seleccionar cuatro curvas de ponderación de frecuencia: A, B, C y D. La curva A ( $dB(A)$ ) es la que más se asemeja a la respuesta del oído humano, sobre todo para sonidos de baja magnitud. La curva C ( $dB(C)$ ) se usa para sonidos de alta magnitud y es la más usada, junto con la curva A, para establecer niveles de contaminación acústica. Las curvas B ( $dB(B)$ ) y D ( $dB(D)$ ) se volvieron obsoletas desde la aparición de la norma IEC 61672. Por último, cuando no se usa ninguna curva de ponderación se dice que la medición se realizó en escala lineal o ponderación Z (cero frecuencia). Como ya se indicó, un sonómetro también puede realizar cuatro ponderaciones temporales: lenta (S, slow), rápida (F, fast), impulsiva (I, impulse) y pico (P, peak). Estas ponderaciones se basan en una función exponencial, con una constante de tiempo específica para cada una de ellas. La ponderación S tiene una constante de tiempo de 1s y se usa para medir ruidos que no varían mucho en el tiempo. Por otro lado, la ponderación F tiene una constante de 125 ms y se usa para medir ruidos fluctuantes. La ponderación I tiene una constante de tiempo de 35 ms y se usa para medir ruidos

de muy corta duración, mientras que la ponderación P se usa para ruidos de extremadamente corta duración(constante de tiempo de 50  $\mu$ s).

### **3.4 Prácticas y métodos estándares**

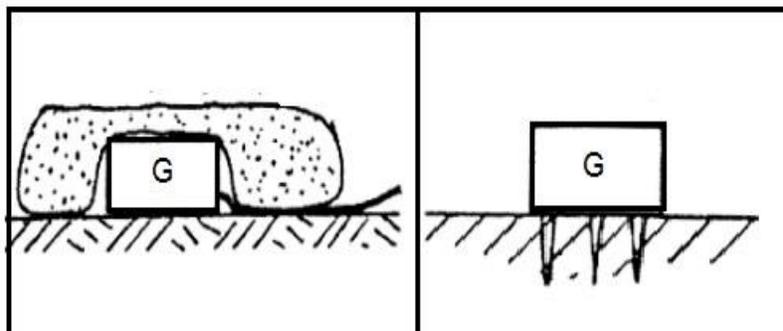
El primer paso corresponde a la selección de los instrumentos a utilizar. Naturalmente, estos deben cumplir con los requerimientos exigidos por las autoridades correspondientes. La normativa australiana (AS 2187-2), por ejemplo, establece que el equipo para medir vibraciones debe ser capaz de medir en el rango de frecuencia 5 - 250 Hz. Por otro lado, la normativa española (UNE 22-381-93) exige que estos respondan en el rango 2 – 200 Hz y que tengan la capacidad de detectar vibraciones en el rango 1 - 100 mm/s. La norma ISO 4866 señala que la relación señal-ruido, en los transductores usados para medir vibración, no debe ser menor a 5 dB y que si su valor se encuentra en el rango 5 - 10 dB la medición realizada debe ser corregida.

El equipo para medir la sobrepresión de aire también debe cumplir con ciertos requerimientos, como ser capaz de medir en un determinado filtro de ponderación y rango de frecuencia. La norma Australiana, por ejemplo, establece que este debe ser capaz de medir en escala lineal (dB(L)) y responder en el intervalo 2 - 250 Hz. Por otro lado, la norma Británica (BS 6472-2) señala que el equipo debe responder adecuadamente a ondas de baja frecuencia y que las mediciones deben realizarse sin ponderación (escala lineal, dB(L)).

El segundo paso corresponde a la instalación de los instrumentos de medición. Para medir vibraciones existen dos alternativas. La primera es colocar los sensores en el terreno próximo a la estructura que se desea proteger, mientras que la segunda es colocarlos dentro de dicha estructura. En el primer caso se está midiendo la magnitud con la que vibran las partículas del suelo en ese punto, mientras que en el segundo lo que se está midiendo es, de hecho, la respuesta de la estructura a la misma vibración. Si las mediciones se realizan tanto en el exterior como en el interior de la estructura entonces es posible, al comparar los canales correspondientes en un mismo rango de frecuencia, obtener la función de transferencia particular y así cuantificar la respuesta de la estructura.

Algunas normativas para el control de vibraciones, como la española, establecen que las mediciones deben realizarse al exterior de la estructura, mientras que otras, como la suiza (SN 640-312a), establecen que las mediciones deben llevarse a cabo dentro de la misma.

Sin importar donde se realicen las mediciones, el adecuado montaje de los sensores resulta ser crucial. Un sensor mal asegurado producirá lecturas erróneas de velocidad de partícula o frecuencia. Por un lado, la normativa española establece que para aceleraciones de baja magnitud (inferiores a 0.2g) es posible apoyar el sensor sobre un cubo de masa suficiente y con 3 patas de apoyo sobre la superficie, mientras que para aceleraciones mayores se recomienda colocar de manera permanente el sensor a la superficie, usando pernos (si el terreno es duro) o enterrarlo (si el terreno es blando). Por otro lado, la normativa australiana establece que para aceleraciones inferiores a 0.3g puede no ser necesario fijar el sensor a la superficie, sin embargo, para aceleraciones superiores a 1 g recomienda usar pernos o cemento. Terrock, una consultora especializada en el diseño y control de tronaduras, ha encontrado que apoyar libremente el sensor sobre la superficie no es apropiado y que para niveles bajos de magnitud el sensor debería, a lo menos, colocarse junto a sacos de arena o clavado al suelo con estacas (figura 3-7). Si se esperan niveles altos de vibración, los mismos autores recomiendan enterrar el sensor en el suelo y cubrirlo o pegarlo a una superficie dura, como roca o concreto (figura 3-8)



**Figura 3-7: Métodos para colocar el sensor cuando la magnitud de las vibraciones es baja.**

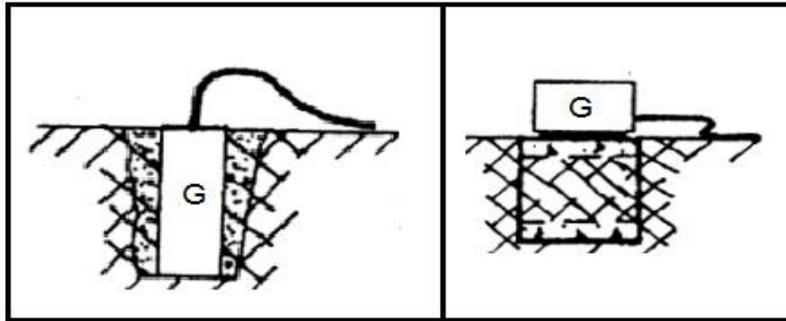


Figura 3-8: Métodos para colocar el sensor cuando las magnitud de las vibraciones es alta (Terrock).

Un estudio realizado por el instituto nacional de mecánica de rocas de la India\* comparo cuatro métodos para montar el sensor: enterrado, uso de estacas, montaje libre (sobre la superficie) y uso de saco. Dicho estudio analizo los valores de velocidad pico de partícula (PPV) registrados en 14 posiciones distintas, usando simultáneamente los 4 métodos de montaje señalados anteriormente, y producidos por 14 tronaduras de prueba. También, se asumió una nula influencia de las condiciones del suelo (humedad, tamaño de las partículas) sobre las mediciones realizadas en cada posición, debido principalmente a la cercanía entre los 4 sensores. Los resultados se muestran en el siguiente gráfico:

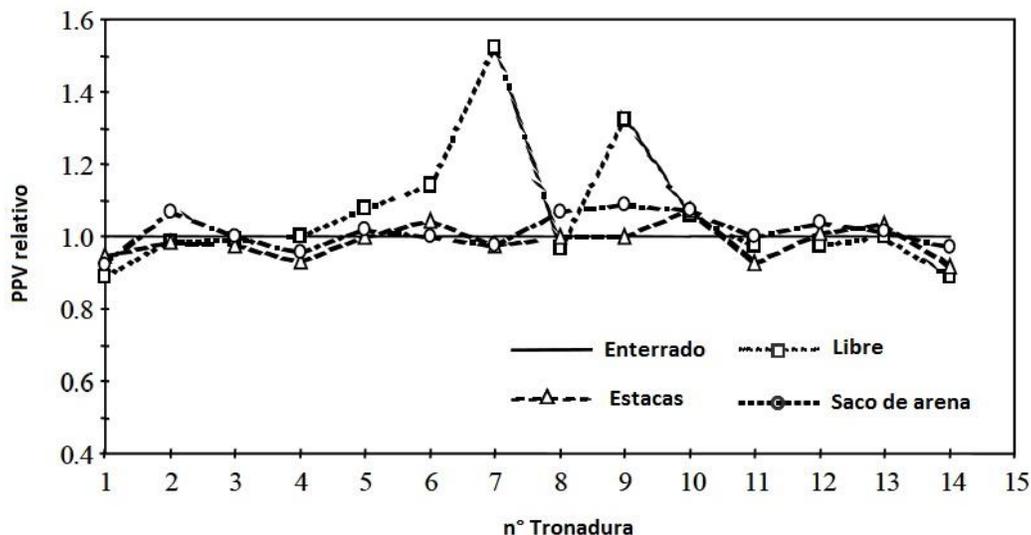


Figura 3-9: Resultados según tipo de montaje de los sensores (fuente: instituto nacional de mecánica de rocas, India).

\*Los valores presentados en dicho estudio se encuentran disponibles en el anexo J

En este grafico (3-9) se asume que los datos registrados por el sensor enterrado son los más precisos, por lo tanto, los datos entregados por los otros tres sensores se evalúan en relación a ellos. Como es posible observar, los datos entregados por el sensor colocado libremente sobre la superficie presentan la mayor dispersión, seguidos, en menor medida, por los datos del sensor cubierto con un saco.

La figura 3-10 ilustra 3 prácticas que, según la consultora ya señalada, deben evitarse: no clavar profundamente las estacas (1) y pegar el sensor a roca suelta (2) o concreto delgado (3).

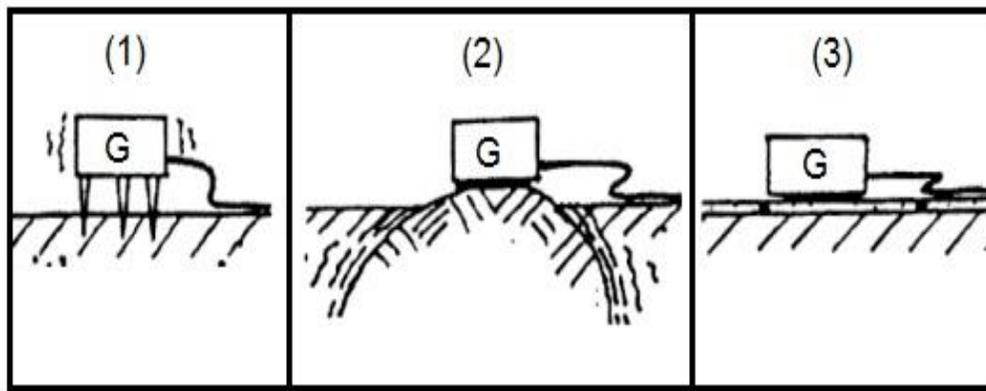


Figura 3-10: Algunas prácticas que se deben evitar en la instalación de sensores.

La norma ISO 4866 indica que, al medir vibraciones dentro de una estructura, es una práctica común colocar los sensores en el primer piso o en los cimientos. Sin embargo, dicha norma reconoce que cuando las vibraciones son producidas por fuentes particulares, como tronaduras o perforaciones (hincado de pilotes), estas pueden ser amplificadas dentro de una estructura (dependiendo de su altura), por lo que puede ser necesario realizar mediciones en puntos específicos dentro de la misma. De esta forma, se establece que si una estructura tiene más de cuatro pisos (aproximadamente 12m) se deben fijar puntos de medición cada cuatro pisos y en el piso superior, siendo posible fijar otros puntos en respuesta a peticiones de los ocupantes.

La norma también indica que el peso del sensor no debe ser superior al 10% del peso del elemento sobre el cual está montado (lo cual asegura un buen grado de

rigidez), y que en circunstancias especiales es aceptable usar algún tipo de pegamento industrial o uniones magnéticas. El uso de cinta adhesiva doble solo se recomienda para aceleraciones inferiores a  $1 \text{ m/s}^2$ .

La norma ISO 5348 se enfoca en el montaje de acelerómetros. En ella se aconseja, de forma general, examinar cuidadosamente la superficie donde se colocara el transductor, buscando señales de contaminación o irregularidades. La norma describe los principales métodos de montaje, como son, entre otros, el uso de pernos o clavos, cemento, cinta adhesiva y el uso de magnetos.

En relación al uso de pernos, se indica que una fina capa de aceite o grasa entre las superficies ayuda a lograr un buen grado de contacto. El uso de cemento se recomienda cuando no se pueden realizar perforaciones en la estructura bajo estudio, cuando la superficie elegida para colocar el transductor no es lo suficientemente plana o cuando el acelerómetro necesita cierto grado de aislación eléctrica. La norma aconseja el uso cementos duros, de la variedad catalítica o termoestable, argumentando que los de tipo solvente-secado tienden a permanecer suaves en su interior, por lo que bajan las frecuencias de resonancia.

Uno de los métodos descritos por esta norma es el uso de una sonda manual (figura 3-11). Naturalmente, los problemas de este método se relacionan con la dificultad de mantener una presión y dirección constante. La norma también incluye un cuadro resumen con los criterios que afectan la elección de un determinado método para montar acelerómetros (tabla 3-2).

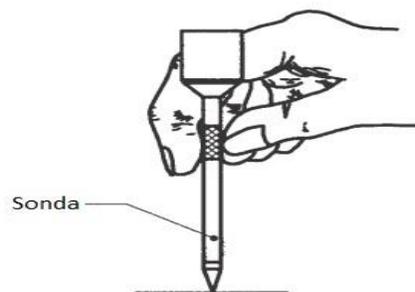


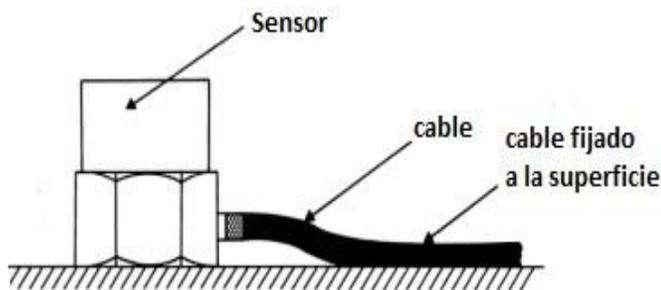
Figura 3-11: Sonda usada para registrar vibraciones.

Criterio
----------

Método de montaje	Frecuencia de resonancia	T°	Masa del transductor y rigidez del montaje	Factor de amplificación de resonancia	Preparación de la superficie
perno o clavo	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
Cemento	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Promedio</i>
Beeswax	<i>Promedio</i>	<i>Bajo</i>	<i>Promedio</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>
cinta adhesiva de doble contacto	<i>Bajo</i>	<i>promedio</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>
montaje rápido	<i>Promedio</i>	<i>Alto</i>	<i>Promedio</i>	<i>Promedio</i>	<i>Promedio</i>
montaje al vacío	<i>Promedio</i>	<i>Alto</i>	<i>Alto</i>	<i>Promedio</i>	<i>Promedio</i>
Magneto	<i>Promedio</i>	<i>Alto</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>
Manual	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Bajo</i>

**Tabla 3-2: Relación entre diversos criterios y métodos de montaje (ISO 5348).**

Una situación que debe tratar de evitarse, tanto para velocímetros como acelerómetros, es el ruido eléctrico provocado por los cables correspondientes. Para ello se recomienda fijar estos cables al cuerpo o estructura bajo análisis, como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3-12: Cable unido firmemente a la superficie para evitar ruido eléctrico.**

Para la medición de ruido, la consultora Terrock aconseja colocar el sonómetro, a lo menos, un metro sobre el nivel del suelo y a tres metros alejado de las paredes del edificio o de algún muro, para evitar posibles reflexiones. A pesar de que la mayoría de los sonómetros son omnidireccionales en el rango de frecuencia de las tronaduras, se aconseja siempre orientarlos hacia su dirección.

El tercer y último paso corresponde a la configuración de los instrumentos de medición, siendo el tipo de trigger (elemento que gatilla el comienzo de las mediciones) y el tiempo de medición, los principales factores a considerar. Por lo general es posible seleccionar entre varios tipos de trigger, entre ellos, vibración (suelo), vibración aérea (sobrepresión de aire), continuo y manual. Se debe seleccionar un tipo y nivel de trigger adecuado para cada situación. El nivel seleccionado debe ser tal que permita al aparato de medición responder a la tronadura, pero no a vibraciones o ruidos de fondo, como el tráfico y maquinaria. Para distancias cortas (menos de 300 m) el trigger seleccionado suele ser la vibración, sin embargo, para distancia mayores y debido a la baja en la amplitud de dichas vibraciones se recurre a la opción manual. Usar la vibración aérea como trigger se recomienda solo cuando el viento sea escaso o nulo. En lo que se refiere al tiempo de medición, es necesario que el instrumento se configure con una ventana de tiempo que considere todo el evento, debido a que las distintas ondas de vibración sísmicas (P, S y R) y la onda de sobrepresión de aire tienen velocidades de propagación diferentes.

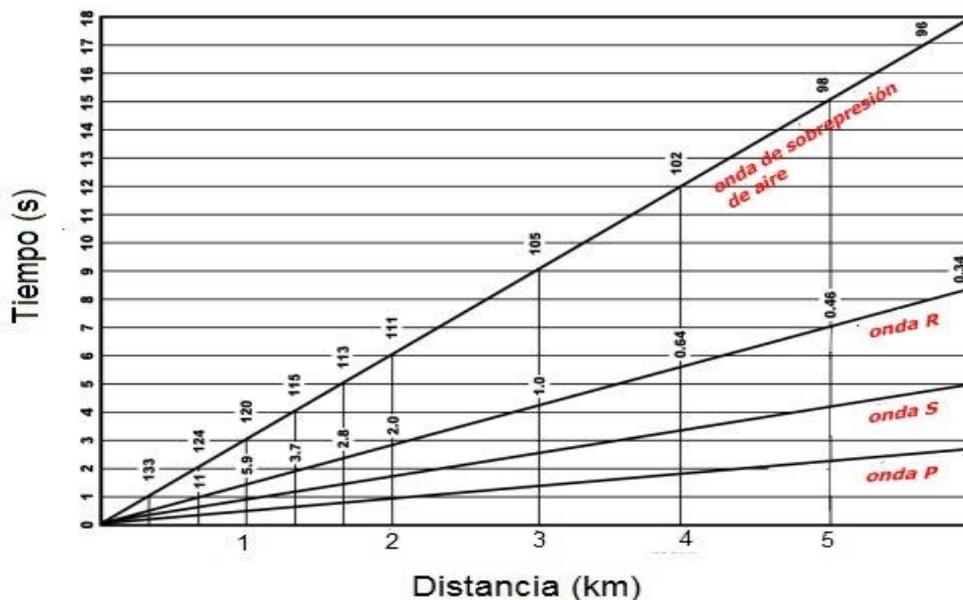


Figura 3-13: Diferencia en los tiempos de arribo entre las distintas ondas de vibración y la onda de sobrepresión.

### 3.5 Conclusiones de este capítulo

La elección de los instrumentos que se usaran para medir ruido y vibración depende principalmente de los requisitos operativos indicados en las normativas nacionales o internacionales.

Para la medición de vibraciones, y debido a que la gran mayoría de las normas para su control están basadas en el parámetro velocidad, se debería privilegiar el uso de un geófono. Por otro lado, el geófono presenta importantes ventajas sobre el acelerómetro, como su menor costo y el hecho de que su señal de salida no necesita ser amplificada antes de ser almacenada. Sin embargo, al emplearlos se debe tener precaución con vibraciones de baja frecuencia. A partir de las normas técnicas analizadas se deduce que el geófono a utilizar debería ser capaz de medir vibraciones de entre 1 y 100 mm/s, en el rango de frecuencia 1–300 Hz, y con una relación señal-ruido mayor o igual a 10 dB.

Para la medición de ruido, se considera que el sonómetro debe ser capaz de responder en el rango de frecuencia 2 – 250 Hz (eventos con frecuencias bajo los 2 Hz pueden ser distorsionados por cambios de presión muy leves). También debe ser capaz de medir en escala lineal (L) y registrar el nivel Peak de presión sonora.

En relación a la instalación de los instrumentos para medir vibraciones se constató que existen dos alternativas, colocar los sensores en el terreno próximo a la estructura o colocarlos dentro de la misma. Dicha elección depende de la normativa bajo la cual se esté evaluando el efecto de las vibraciones, lo cual se aborda más adelante en este trabajo. Sin importar el lugar donde se realicen las mediciones, se debe prestar especial atención a la colocación adecuada de los sensores. Se examinaron varios métodos de montaje, los cuales se aplican según la magnitud de la vibración. Para vibraciones de baja magnitud se deberían usar estacoso cinta adhesiva doble. Por otro lado, dejar el sensor libremente sobre la superficie no es recomendable. El uso de saco de arenas tampoco se recomienda, salvo que el instrumental se encuentre en riesgo a causa de material proyectado.

Cuando la magnitud de las vibraciones es alta se recomienda, entre otras cosas, usar pernos, enterrar el sensor o pegarlo a una superficie dura usando alguna clase de pegamento industrial (epoxy).

Para la medición de ruido el sonómetro debería ser colocado, a lo menos, un metro sobre el nivel del suelo y alejado, como mínimo, a tres metros de las paredes del edificio o de algún muro, para evitar posibles reflexiones.

Por último, en relación a la configuración del instrumental, se debe seleccionar un trigger y tiempo de medición adecuados para cada fenómeno. El tipo y nivel del trigger debe ser tal que permita al aparato de medición responder a la tronadura, pero no al ruido de fondo o a otras fuentes de vibraciones, como la maquinaria. Con respecto al tiempo de medición, es necesario que el instrumento se configure con una ventana de tiempo que considere todo el evento, ya que las distintas ondas de vibración (P, S y R) y la onda de sobrepresión de aire tienen velocidades de propagación diferentes.

## CAPÍTULO 4

### MODELOS PREDICTIVOS

Este capítulo comienza con la descripción de algunos modelos usados para predecir la magnitud de las vibraciones producidas por una tronadura. Luego se procede a describir los modelos usados para predecir los niveles de sobrepresión de aire generados por la misma actividad. El capítulo finaliza presentado una conclusión donde se seleccionan algunos de los modelos presentados para ser incluidos en la propuesta de guía.

#### 4.1 Modelos para vibración

Realizar una predicción teórica de vibraciones para una tronadura resulta muy complejo, ya que se deben considerar todos los factores que influyen en su generación y propagación (descritos en el capítulo 2). Debido a esto se prefiere abordar el tema desde un punto de vista empírico.

Si se parte de la idea de que la energía liberada por un explosivo (E) es directamente proporcional a la masa de explosivo detonado (Q), entonces se observa que aparece una relación de la forma  $E \propto \sqrt{Q}$ . Morris (1950) realizó un estudio sobre la propagación de ondas y concluyó que la amplitud de la vibración (A) era directamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa de la carga (Q) e inversamente proporcional a la distancia (D) a la tronadura:

$$A = (K\sqrt{Q}) / D \quad K: \text{ constante propia del lugar}$$

Investigaciones llevadas a cabo en la oficina de minas de los Estados Unidos (USBM) por Duvall & Fogelson (1962), asumieron cargas cilíndricas largas y propusieron una expresión en términos de la velocidad de vibración de partícula.

$$V = W(D/\sqrt{Q})^{-\beta}$$

En este caso,  $W$  y  $\beta$  son constantes que se obtienen gráficamente (con un método que se detalla más adelante) En 1964 se llegó a una expresión más general:

$$V = K Q^N D^\alpha (4.1)$$

Donde  $K$  y  $\alpha$  son constantes adimensionales que expresan la influencia de la geología local como también el decaimiento geométrico de las ondas sísmicas, mientras que  $N$  se conoce como el exponente de reducción. Una modificación de la expresión 4.1 nos entrega la fórmula estándar de *distancia reducida*:

$$V = K (D/Q^N)^{-\alpha} (4.2)$$

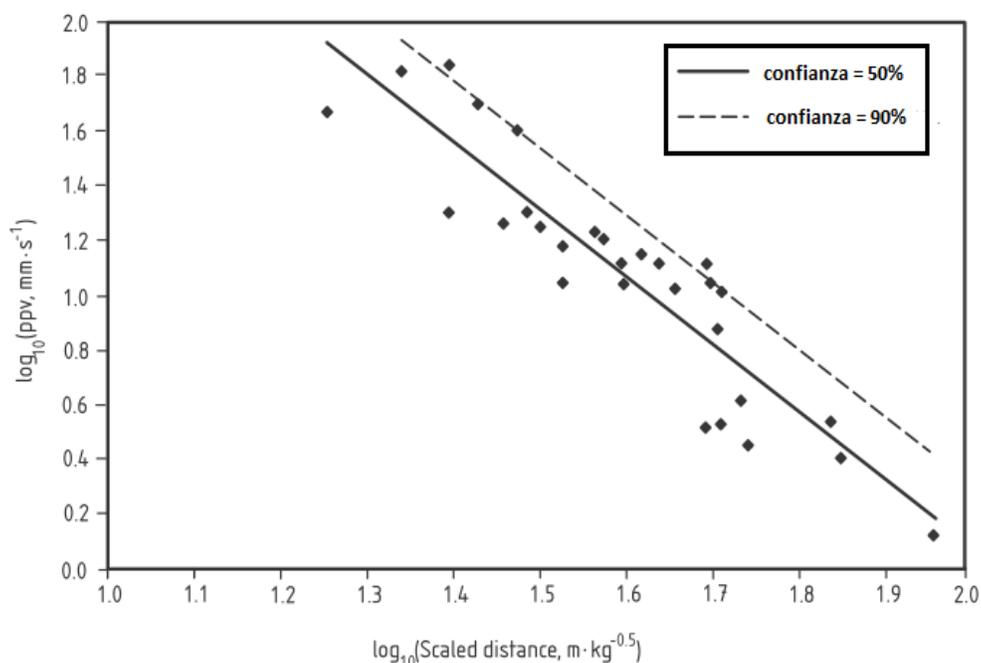
El factor  $(D/Q^N)$  se conoce como la *distancia reducida*, donde  $N$  puede tomar los valores  $1/2$  o  $1/3$ . Para  $N = 1/2$  la fórmula se conoce como reducción de raíz cuadrática y se aplica cuando existen cargas lineales (el largo del pozo es 4 veces mayor que su diámetro), mientras que para  $N = 1/3$  se denomina reducción de raíz cúbica, la cual se aplica para cargas esféricas (el largo del pozo es inferior a 4 veces su diámetro). Por medio de investigaciones llevadas a cabo por Devine & Duvall (1964) se llegó a la conclusión de que la reducción de raíz cuadrática entregaba un mejor coeficiente de correlación.

$$V = K (D/Q^{1/2})^{-\alpha} (4.3)$$

Esto fue confirmado por Attewell & Farmer (1964), quienes plantearon que el peak de amplitud en un registro de velocidad de partícula era proporcional a la raíz cuadrada de la energía liberada. Esta expresión continúa siendo una de las más utilizadas por investigadores, consultores, oficinas gubernamentales, etc.

Para aplicar esta y otras fórmulas similares primero es necesario realizar una serie de tronadura de pruebas, registrando los parámetros más importantes (magnitud de las vibraciones, carga y distancia al receptor). También es posible recurrir a registros de tronaduras realizadas con anterioridad. Con estos datos es

posible calcular los factores  $K$  y  $\alpha$  por el método de mínimos cuadrados aplicado al gráfico logarítmico de *velocidad de partícula vs distancia reducida*. Esto resulta con una recta de mejor ajuste, donde  $\alpha$  corresponde a la pendiente de dicha recta y  $K$  al antilogaritmo del intercepto. Con estos factores ya determinados se puede calcular entonces la magnitud de la vibración (PPV) para cualquier distancia y cantidad de explosivo (distancia reducida). Otra opción es, dado un valor límite establecido con anterioridad (en una norma por ejemplo), calcular cuanta carga de explosivo para una distancia determinada no sobrepasara dicho valor.



**Figura 4-1: Rectas para distintos intervalos de confianza.**

En la figura 4-1 se puede apreciar que los datos tienen cierto grado de dispersión. Esto es común en todos los modelos basados en distancia reducida, debido a factores relacionados con la fuente o el camino de transmisión. La recta que aparece una vez que se determinan los factores  $K$  y  $\alpha$  se define como la *recta de mejor ajuste medio* (50%). El término “medio” significa que, para un determinado valor, el 50% de los eventos estará sobre valor, mientras que el otro 50% estará bajo el mismo. En algunos países, y en relación a la predicción de vibraciones, se acostumbra establecer un intervalo de confianza, el cual solo debe ser superado

en cierto número de ocasiones. Dicho intervalo de confianza es especificado por la respectiva autoridad de planeación minera y está indicado en la licencia de operación que se le entrega al titular del proyecto. Por lo general, se plantea de la siguiente manera: “X% de las tronaduras deben ser inferiores a Y (mm/s), tal como se registran en el lugar ocupado más cercano”. Por lo general el porcentaje escogido es del 90% o 95%. En el ejemplo de la figura 4-1 aparece una segunda recta de ajuste, la cual considera un intervalo de confianza del 95%.

Existen otros modelos que pueden ser mencionados. Los investigadores suecos Langefors & Kilhstrom (1963), a partir de estudios realizados en minas de granito en Suecia, propusieron la siguiente expresión:

$$V = k \left( \sqrt{Q/D^{2/3}} \right)^\alpha \quad (4.4)$$

Por otro lado, Ambraseys & Hendron (1968) estimaron una fórmula con distancia reducida cúbica:

$$V = k(D/Q^{1/3})^{-\alpha} \quad (4.5)$$

Ghosh & Daeman (1983) fueron los primeros en sugerir que varios efectos inelásticos causan pérdidas de energía durante la propagación de la onda, por lo que modificaron la ecuación 4.2, agregando un *factor de atenuación inelástica* ( $\rho$ ):

$$V = k(D/Q^N)^{-\alpha} e^{\rho D} \quad (4.6)$$

Cuando por falta de equipos o tiempo se hace imposible una recolección de datos para determinar las constantes de una ecuación es posible predecir la magnitud de la vibración producida por una tronadura usando el modelo de G.Berta (1985). Este modelo parte considerando dos expresiones para la energía sísmica ( $E_S$ ) transmitida por el explosivo a la roca:

$$E_S = (2\pi^2 A^2 f^2)(2\pi D^2)(\rho_r V_C T_v 10^{-6}) \quad (4.7)$$

$$E_S = \delta_T n_1 n_2 E_T Q \quad (4.8)$$

Donde A es amplitud de la vibración (m), f es la frecuencia de vibración (Hz), D es la distancia entre carga y el receptor (m),  $\rho_r$  es la densidad de la roca ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V_c$  es la velocidad de propagación en el medio (m/s),  $T_v$  es la duración de la vibración (s),  $\delta_T$  es el rendimiento de transmisión de la energía,  $n_1$  es la impedancia roca/explosivo,  $n_2$  es el desacoplamiento de la carga y  $E_T$  es la energía del explosivo (MJ/ Kg). Como ya sabemos, el parámetro Q corresponde a la cantidad de explosivo (kg). En particular, tenemos que las expresiones para  $n_1$  y  $n_2$  vienen dadas por:

$$n_1 = 1 - \left( \frac{Z_e - Z_r}{Z_e + Z_r} \right)^2 ; n_2 = \frac{1}{e^{(d_p/d_c)} - 1.72}$$

En estas expresiones,  $Z_e$  es la impedancia del explosivo ( $\text{Kg/m}^2\text{s}$ ),  $Z_r$  es la impedancia de la roca ( $\text{Kg/m}^2\text{s}$ ),  $d_p$  es el diámetro del pozo (mm) y  $d_c$  es el diámetro de la carga (mm). Igualando (4.7) y (4.8) y despejando la amplitud (A) tenemos:

$$A = \sqrt{\frac{\delta_T n_1 n_2 E_T Q}{4\pi^3 f^2 \rho_r D^2 V_c T_v 10^{-6}}} \quad (4.9)$$

Una vibración se considera significativa cuando su tiempo de duración es igual o mayor que cinco veces el periodo, ósea, cuando se tiene  $T_v \geq 5T = 5/f$ . Por otro lado, la frecuencia de vibración puede estimarse usado la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{k_f \log D}$$

donde  $k_f$  es una constante propia del terreno y que caracteriza la reducción de la frecuencia con la distancia. Los valores de esta constante se indican en la siguiente tabla.

tipo de terreno	K <sub>f</sub>
suelos duros y compactos	0.01 - 0.03
suelos poco consolidados	0.06 - 0.09
suelos saturados de agua	0.11 - 0.13

Tabla 4.1 Valores de k<sub>f</sub>

Finalmente, al reemplazar estas expresiones en (4.9) llegamos a la siguiente expresión:

$$A = \frac{1}{2\pi D} \sqrt{\frac{\delta_T n_1 n_2 E_T Q k_f \log D}{5\pi \rho_r V_C 10^{-6}}} \quad (4.10)$$

Para la velocidad de vibración basta recordar que  $v_{m\acute{a}x} = A2\pi f$ . Entonces tenemos que:

$$v = \left( \frac{1}{2\pi D} \sqrt{\frac{\delta_T n_1 n_2 E_T Q k_f \log D}{5\pi \rho_r V_C 10^{-6}}} \right) \left( \frac{2\pi}{k_f \log D} \right)$$

$$v = \frac{1}{D} \left( \sqrt{\frac{\delta_T n_1 n_2 E_T Q}{5\pi \rho_r V_C 10^{-6} k_f \log D}} \right) \quad (4.11)$$

Todos los modelos ya descritos son relativamente antiguos, por lo cual desde hace varios años comenzaron a buscarse alternativas, una de las cuales fue el uso del método de “Redes Neuronales Artificiales” (RNA). Este método, como su nombre lo indica, es un sistema de procesamiento de información que emula el comportamiento del cerebro. Una RNA es capaz de realizar predicciones después de ser propiamente “entrenada”. Dicho entrenamiento consiste en el procesamiento de un gran número de datos de entrada (INPUT) y salida (OUTPUT). De esta forma, cuando se le presenta un nuevo patrón de datos de entrada, la RNA es capaz de detectar similitudes y predecir el patrón de los datos de salida. Como ya se dijo, para realizar predicciones una RNA debe primero ser entrenada. Para este propósito existen muchos algoritmos, pero el más usado, dada su versatilidad, es el de “forward - backward propagation” (propagación hacia adelante y atrás). Una RNA que usa este algoritmo está formada por al

menos tres capas o layers: una capa de entrada (input), una o varias capas ocultas (hidden), y una capa de salida (output). A su vez, cada una de estas capas está formada por unidades de procesamiento denominadas “neuronas”. Las neuronas de capas diferentes están conectadas entre sí, y cada conexión tiene un respectivo factor de peso. Ahora, para diferenciar entre las neuronas de una misma capa a cada una se le asigna un valor discriminador ( $\theta$ ). La cantidad de neuronas en las capas de entrada y salida será equivalente a la cantidad de variables de entrada y salida del problema, mientras que el número de capas ocultas y la cantidad de neuronas en cada una de ellas, dependerá del tipo de problema en cuestión.

En el primer paso del entrenamiento los datos son procesados desde la capa de entrada, a través de las capas ocultas, hasta llegar a la capa de salida (forward pass). Los datos entregados por la capa de salida son comparados con los valores medidos y el error (diferencia) es propagada hacia atrás de la red (backward pass), actualizando los factores de peso en cada conexión. Este proceso se repite hasta que el error de la red converge hasta cierto valor. La figura 4-2 muestra el esquema de este algoritmo en una RNA, considerando dos capas ocultas.

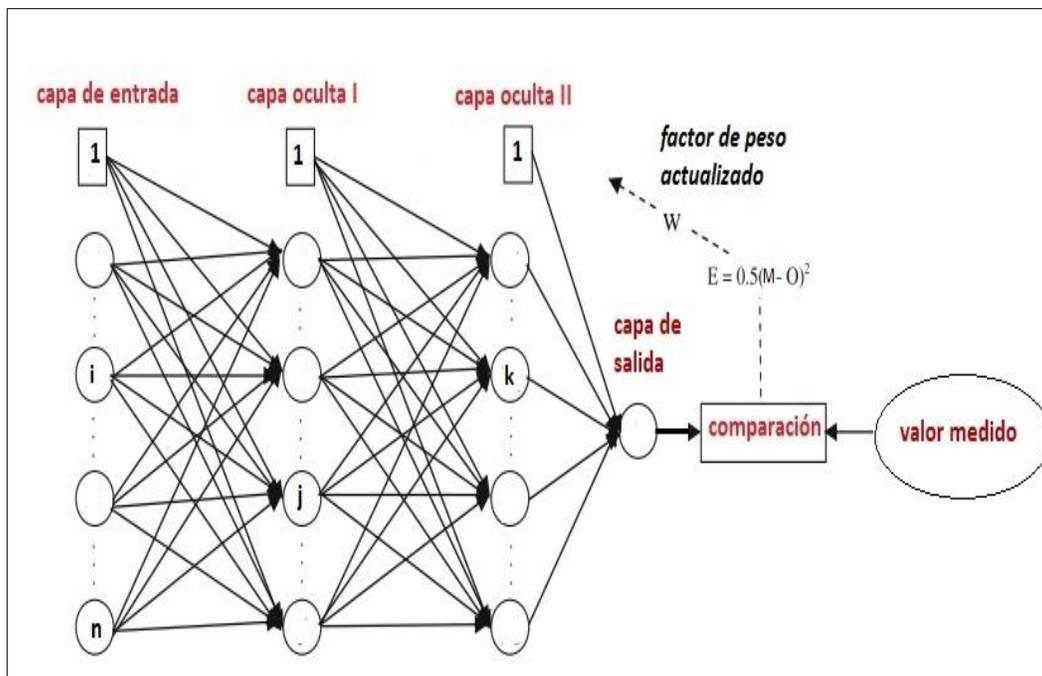


Figura 4-2: Esquema del algoritmo usado para entrenar la RNA.

Como vemos, la  $j$ -ésima neurona de la primera capa oculta está conectada a las “ $n$ ” neuronas de la capa de entrada, dadas por  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . De esta forma, el valor neto de entrada para la  $j$ -ésima neurona de la primera capa oculta viene dado por:

$$Net_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} + \theta_j$$

Donde  $w_{ij}$  es el factor de peso entre la conexión de la  $i$ -ésima neurona de la capa de entrada y la  $j$ -ésima neurona de la primera capa oculta, mientras que  $\theta_j$  corresponde al valor discriminador de la  $j$ -ésima neurona. El valor neto de salida para la misma neurona ( $O_j$ ) se calcula usando la función sigmoide, como se muestra a continuación:

$$O_j = f(Net_j) = \frac{1}{1 + e^{-(Net_j + \theta_j)}}$$

De la misma forma, el valor neto de entrada para la  $k$ -ésima neurona de la segunda capa oculta viene dado por:

$$Net_k = \sum_{j=1}^n O_j w_{jk} + \theta_k$$

Donde  $w_{jk}$  es el factor de peso entre la conexión de la  $j$ -ésima neurona de la primera capa oculta y la  $k$ -ésima neurona de la segunda capa oculta. El valor  $\theta_k$ , como ya se dijo, corresponde al factor discriminador de la  $k$ -ésima neurona. El valor neto de salida para esta neurona será entonces:

$$O_k = f(Net_k) = \frac{1}{1 + e^{-(Net_k + \theta_k)}}$$

En este punto, la RNA compara el valor de salida con el correspondiente valor deseado (medido), para así obtener el error del  $k$ -ésimo valor de salida:

$$E_k = M_k - O_k$$

Donde  $M_k$  es el correspondiente valor medido. La función total de error, considerando todos los valores de salida entregados por la segunda capa oculta, se calcula usando la siguiente expresión:

$$E = 0.5 \sum_{k=1}^n (M_k - O_k)^2$$

La actualización del factor de peso para la conexión n+1 viene dado por:

$$w_{jk}(n+1) = w_{jk}(n) + \nabla w_{jk}(n)$$

Con  $\nabla w_{jk} = -\eta \partial E / \partial w_{jk}$  ( $\eta$ : parámetro de razón de aprendizaje). La propagación hacia adelante y atrás constituye un “ciclo”. El número de veces que este ciclo se debe repetir depende, como ya se dijo, del margen de error establecido.

Existen varios estudios que han comparado los resultados obtenidos con los modelos convencionales de distancia reducida (Devine, Langefors & Kilhstrom, Ambraseys & Hendron y Ghosh & Daeman) y los obtenidos usando RNA.

Khandelwal (2011) analizo los registros de 128 tronaduras realizadas en una mina de carbón en Singrauli, India. El autor realizo una comparación entre los valores de vibración medidos y las predicciones realizadas por 2 tipos de RNA, una con dos variables de entrada (MIC y distancia entre la tronadura y el punto de medición) y la otra con cinco (MIC, distancia, burden, espaciamiento y longitud de la columna de carga) y 7 modelos de distancia reducida (entre ellos los cuatro ya señalados). De los 128 registros considerados, 103 se usaron para entrenar las RNA, como también para determinar las constantes de los modelos de distancia reducida, y los 25 restantes se usaron para validación y comparación. La siguiente tabla muestra las características de las dos clases de RNA consideradas en este estudio.

Parámetro	Tipo de RNA	
	Dos entradas	Múltiples entradas
<i>n° neuronas de entrada</i>	2	5
<i>n° neuronas de salida</i>	1	1
<i>n° capas ocultas</i>	1	1
<i>n° neuronas ocultas</i>	9	5
<i>n° datos de entrenamiento</i>	103	103
<i>n° datos de validación</i>	25	25

Tabla 4-2: Arquitectura de la dos RNA consideradas por Khandelwal.

Los resultados se muestran en el gráfico de la figura 4-3. Como se puede observar, los resultados entregados por los modelos de RNA son lo que más se asemejan a los valores medidos, siendo la de múltiples variables la que entrega los mejores resultados. En este sentido, el Error Medio Absoluto (EMA) de la RNA de múltiples variables fue de 0.18, mientras que para la RNA de dos variables fue de 0.23. De los modelos de distancia reducida el que mostro los mejores resultados fue el Devine (EMA = 0.38).

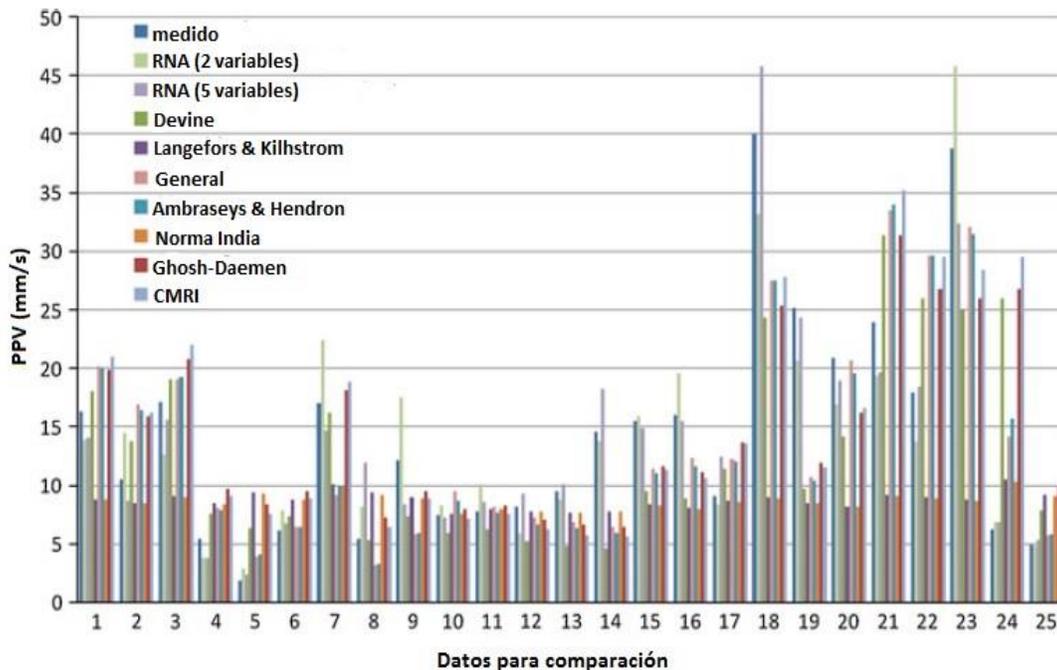


Figura 4-3: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por 2 tipos de RNA y 7 modelos de distancia reducida (Khandelwal).

Monjezi & Hasanipannah (2011) llevaron a cabo un estudio similar en la represa del río Shur, ubicada en Sar Cheshmeh, Irán. Dicho estudio consideró los registros de 20 tronaduras y comparó los valores de vibración medidos y las predicciones realizadas por seis modelos: una RNA con tres variables de entrada (carga total, MIC, distancia al receptor) y cinco modelos de distancia reducida (incluidos los modelos de Devine y de Ambraseys & Hendron).

De los 20 registros considerados, 16 se usaron para entrenar la RNA, como también para determinar las constantes de los modelos de distancia reducida, y los 4 restantes se usaron para validación y comparación. De esta forma, la arquitectura de la RNA consistió de tres neuronas de entrada, 1 neurona de salida y 2 capas ocultas, cada una con 4 neuronas, como se muestra en la siguiente figura:

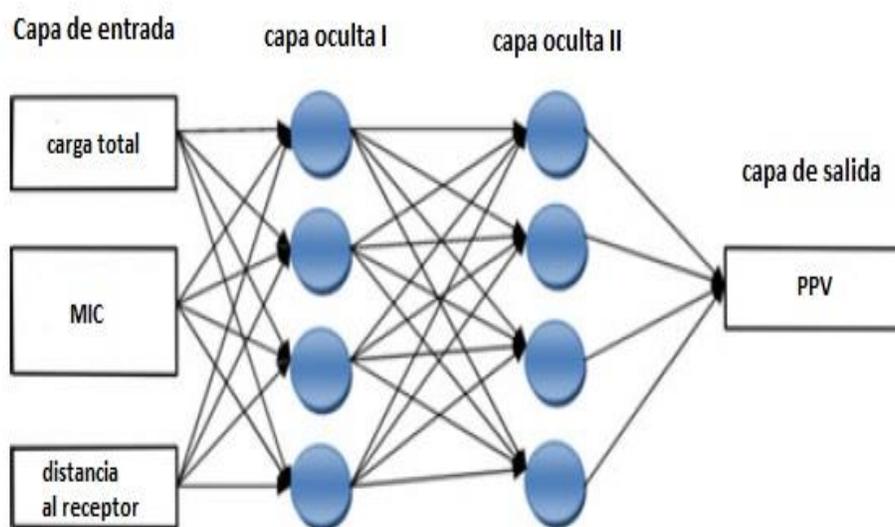


Figura 4-4: Esquema de la RNA considerada por Monjezi & Hasanipannah.

Los resultados de este estudio (tabla 4-3) muestran nuevamente la superioridad del modelo de RNA, el cual mostró un Error Medio Absoluto Porcentual (EMAP) de 1.34, mientras que el modelo de distancia reducida que mostró mejores resultados fue el Devine, con un EMAP de 7.25.

Modelo	Rendimiento	
	EMAP	Error cuadrático medio
<i>RNA</i>	1.34	0.071
<i>Devine</i>	7.25	0.382
<i>Ambraseys &amp; Hendron</i>	8.75	0.416
<i>Davies et al.</i>	16.67	0.835
<i>norma India</i>	10.99	0.493
<i>Roy</i>	8.13	0.428

Tabla 4-3: Resultados del estudio de Monjezi & Hasanipanah.

Kostic et al (2013) realizaron un estudio de los registros de vibraciones en la mina de caliza “Suva Vrela”, en Serbia. Estos registros correspondían a cientos de tronaduras, aunque para llevar a cabo el análisis solo se consideraron 33 de ellas. Se compararon los valores de vibración medidos y las predicciones realizadas por seis modelos: una RNA con cuatro variables de entrada (carga total, MIC, distancia al receptor y altura del pozo) y cinco modelos de distancia reducida (incluidos los modelos de Devine, Langefors & Kihstrom y Ambraseys & Hendron). De los 33 registros considerados, 22 se usaron para entrenar la RNA y para determinar las constantes de los modelos de distancia reducida, mientras que los 11 restantes se usaron para validación y comparación.

Los resultados se muestran en el gráfico de la figura 4.5, donde es posible observar, otra vez, que el modelo de RNA entrego los mejores resultados, con un EMAP de 35.29. Los modelos de distancia reducida que mostraron mejor rendimiento fueron el de Langefors & Kihstrom y el Devine, con un EMAP de 45.19 y 50.2 respectivamente.

El último estudio considerado fue el realizado por Hhandelwal & Singh (2007), en el cual se analizaron 170 registros de la mina de magnesita “Dhrapani”, ubicada en la región de Uttaranchal, India. Se compararon los valores de vibración medidos y las predicciones realizadas por seis modelos: una RNA con dos variables de entrada (MIC y distancia al receptor) y cinco modelos de distancia reducida. De los 170 registros considerados, 150 se usaron para entrenar la RNA y para determinar las constantes de los modelos de distancia reducida, mientras que los 20 restantes se usaron para validación y comparación.

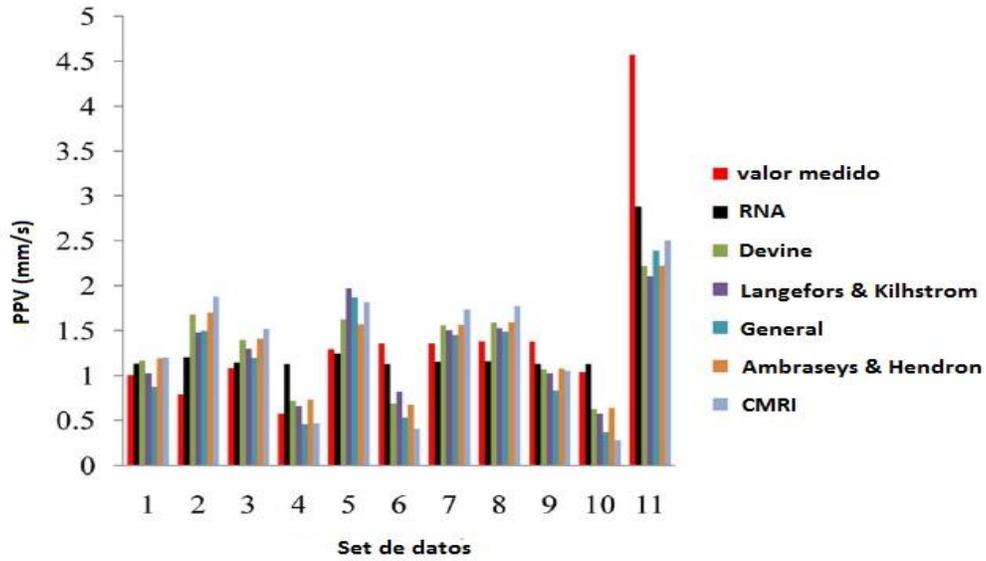


Figura 4-5: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por una RNA y 5 modelos de distancia reducida (Kostic et al).

Los resultados se muestran en la figura 4-6. Al igual que en los tres estudios ya mencionados, el mejor rendimiento lo muestra el modelo de RNA.

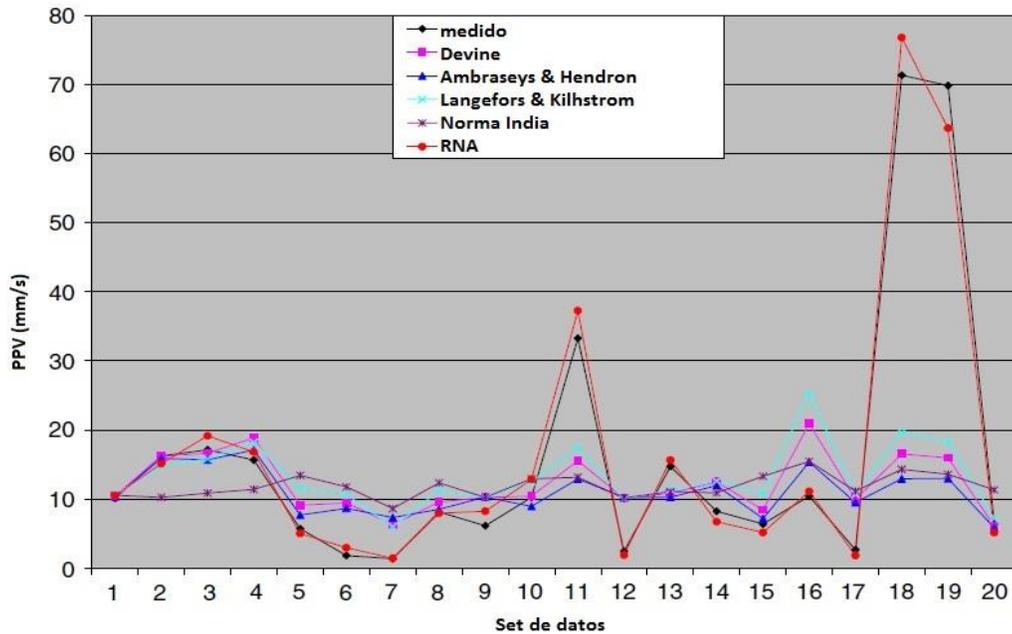


Figura 4-6: Comparación entre los valores de vibración medidos, los entregados por una RNA y 5 modelos de distancia reducida (Hhandelwal & Singh).

## 4.2 Modelos para sobrepresión de aire

Por lo general, para calcular la sobrepresión (P) generada por una tronadura se usa la reducción de raíz cúbica, según la siguiente expresión:

$$P = M(D/Q^{1/3})^{-N} \quad (4.12)$$

Donde M y N, al igual que en los otros modelos de distancia reducida, son constantes propias del lugar donde se lleva a cabo la tronadura. Estas constantes se calculan usando el mismo procedimiento indicado la sección 4.1, solo que en este caso el método de mínimos cuadrados se aplica al gráficologarítmico de *nivel de presión sonora vs distancia reducida*. El grafico de la figura 4-7 muestra un análisis de este tipo, llevado a cabo por la consultora Terrock en una mina de carbón en Australia. Sin embargo, desde hace varios años se viene cuestionando la efectividad de este método. Birch & White (2011) establecieron que este tipo de modelos solo proporcionan estimaciones parciales de los niveles de sobrepresión generados por una tronadura, y que, en el marco de la aplicación de una norma o ley, no deberían aplicarse sin considerar algún tipo de corrección.

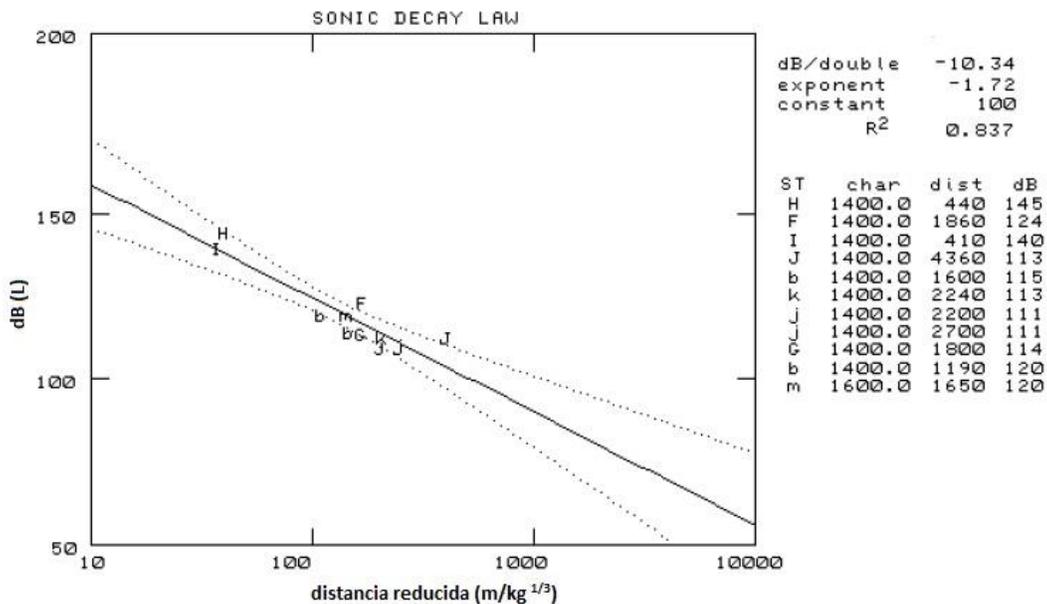


Figura 4-7: Modelo de distancia reducida aplicado a tronaduras (fuente: Terrock).

Estos autores, al igual que Richards et al (2008), recomiendan el uso de un modelo desarrollado recientemente por la consultora Terrock, a la que ya hicimos referencia. Este modelo, además de considerar la cantidad de explosivo y la distancia al receptor, como lo hace la expresión 4.12, tiene incorporado las siguientes variables: altura del taco, burden, diámetro del pozo, distancia de separación entre pozos, secuencia de iniciación, orientación de la cara, la topografía de la zona y condiciones meteorológicas.

Primero, el modelo establece que, en una tronadura donde el taco resulta ser inadecuado para contener los gases de la explosión hasta que el material de la cara libre comience a moverse, gran parte de la energía se disipa a través de la parte superior del pozo (collar). En esta situación, las curvas de nivel de presión sonora tienen forma circular, debido a que la energía es distribuida de igual forma en todas direcciones. Para este caso se propone la siguiente expresión:

$$D_{120} = \sqrt[3]{Q}(K_s d/h_t)^{2.5} \quad (4.13)$$

Donde  $D_{120}$  es la distancia hasta la curva donde el nivel es de 120 dB(L),  $h_t$  corresponde a la altura del taco y  $d$  al diámetro del pozo (ambos parámetros medidos en milímetros), mientras que  $K_s$  es un factor de calibración que varía entre 80 y 180. El parámetro  $Q$ , como ya sabemos, es la carga por retardo medida en kilogramos. Una vez calculado el valor de  $D_{120}$  se pueden determinar otras curvas sabiendo la razón de atenuación en relación a la distancia.

Por otro lado, se establece que en una tronadura donde el taco si es capaz de contener los gases de la explosión, la mayor parte de la energía se emite a través de la cara libre, lo que resulta en mayores niveles de sobrepresión frente a dicha cara que en cualquier otra dirección. Debido a esto, las curvas de nivel de sobrepresión tienen forma elíptica, donde los niveles registrados frente a la cara son entre 6 y 10 dB superiores a los registrados detrás y a los costados de la misma, como se muestra en la figura 4-8.

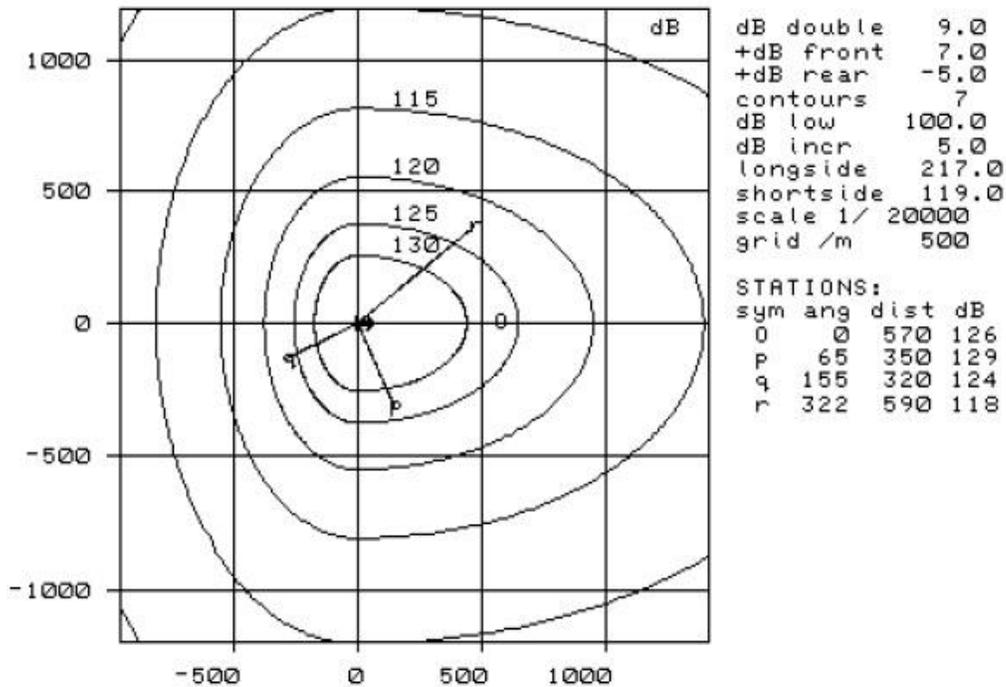


Figura 4-8: Curvas elípticas de nivel de sobrepresión.

En este caso se propone la siguiente expresión:

$$D120 = \sqrt[3]{Q} \left( \frac{K_B d}{b} \right)^{2.5} \quad (4.13)$$

Donde D120, como se dijo anteriormente, es la distancia entre la cara libre y la curva de 120 dB(L), mientras que  $d$  es el diámetro del pozo y  $b$  el burden, ambos medidos en milímetros.  $K_B$  es un factor de calibración que varía entre 150 y 250. Al igual que en el caso anterior, una vez calculado D120 se pueden determinar otros contornos sabiendo la razón de atenuación correspondiente.

Como se indicó en el capítulo 2, la topografía de una zona, o sea, colinas o formaciones rocosas, puede reducir los niveles de sobrepresión. La magnitud de esta reducción dependerá de la altura efectiva de dichas formaciones y del ángulo de incidencia que existe entre la tronadura y la posición del receptor correspondiente.

Terrock cuantifica esta reducción mediante un gráfico (figura 4-9) que relaciona ambas variables. De esta forma, una vez calculadas las curvas de nivel, se puede determinar el nivel de sobrepresión sobre un receptor específico sabiendo entre que curvas se encuentra y las características topográficas de su ubicación.

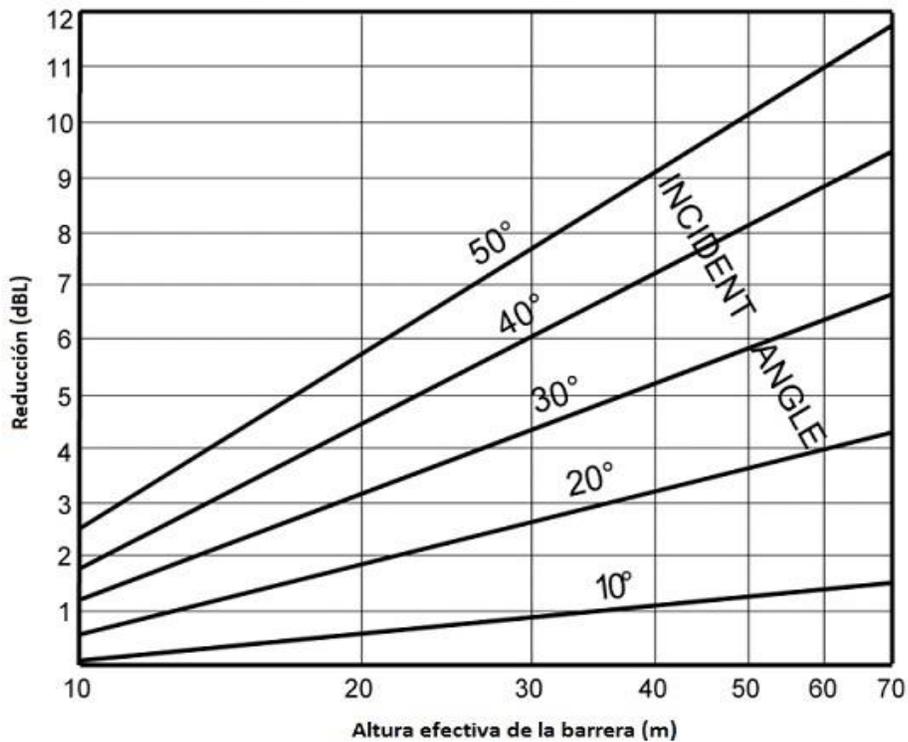


Figura 4-9: Grafico que permite determinar la reducción de los niveles de sobrepresión a causa de la topografía.

Este modelo ha sido aplicado en varios estudios de evaluación de ruidos y vibraciones. A modo de ejemplo podemos describir el caso del proyecto minero Launceston, comenzado en Australia en el año 2012.

Este proyecto contempla la explotación de la mina Launceston en tres fases: 1 (años 0 - 5), 2 (años 5 - 10) y 3 (años 10 - 50). Naturalmente, cada etapa está caracterizada por una topografía diferente. En la figura 4-9 se muestra la topografía durante la fase 1, mientras que la figura 4-10 muestra las correspondientes curvas de nivel de sobrepresión.



Figura 4-10:Topografía de la mina Launceston (fase 1).

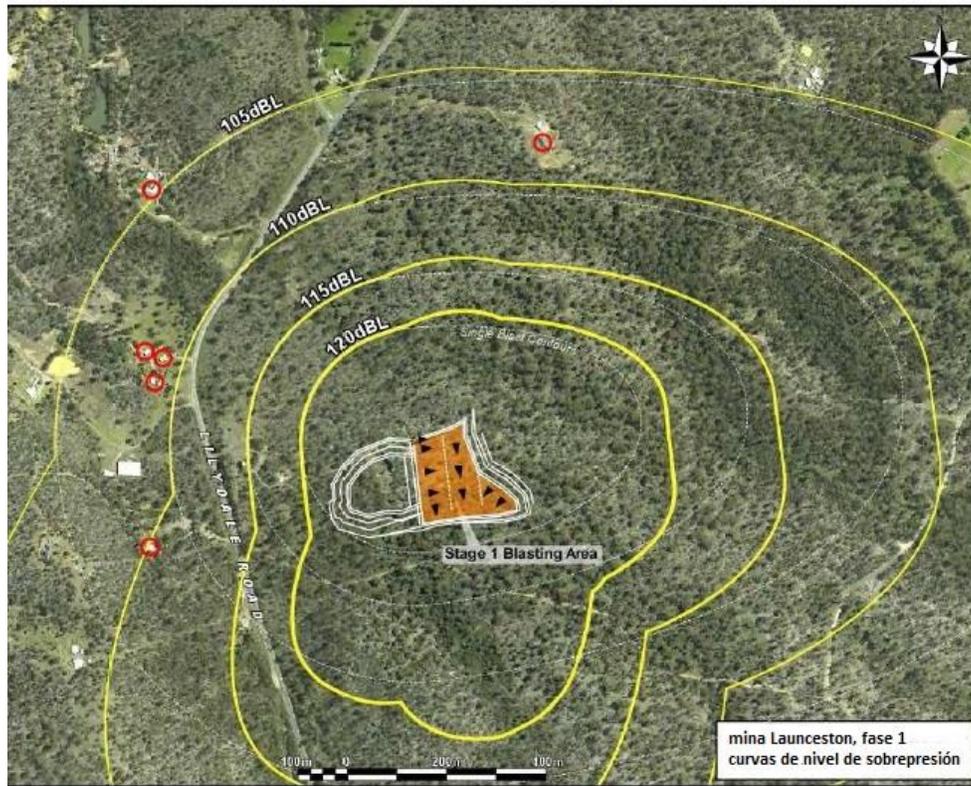


Figura 4-11:Curvas de nivel de sobrepresión en mina Launceston (fase 1).

En nuestro país, la práctica más común a la hora de predecir los niveles de sobrepresión generados por una tronadura es usar algún software de modelación. Entre ellos el más popular es *SoundPlan*, desarrollado en Alemania por Braunstein & Berndt. También podemos destacar, entre otros, Predictor-Lima 781 (Briel & Kjaer), MERA (Marshall Day Acoustics) y Cadna (DataKustik). Estos software basan su metodología de modelación en la Norma ISO 9613 “*Attenuation of sound during propagation outdoors - part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere & part 2: General method of calculation*”. Esta norma considera, entre otras cosas, la atenuación debida a la divergencia geométrica, la absorción atmosférica, el suelo y obstáculos (árboles, viviendas, topografía). Para llevar cabo la modelación el primer paso es seleccionar un escenario representativo para las distintas fases del proyecto (construcción, operación o cierre), o sea, un escenario que incluya todas las potenciales fuentes de ruido (maquinarias, vehículos o tronaduras) y los potenciales receptores. El siguiente paso es ingresar al software los datos correspondientes, como los niveles de potencia acústica en bandas de octava de cada una de las fuentes, la ubicación relativa de dichas fuentes y de los receptores, además de parámetros topográficos y climáticos. El resultado final es un típico mapa de ruido.

### 4.3 Conclusiones de este capítulo

Los diferentes modelos de distancia reducida (MDR) resultan ser, sin duda, los métodos más usados para predecir vibraciones generadas por tronadura. Sin embargo algunos especialistas han criticado el uso de estos métodos, argumentando que simplifica de sobremanera los mecanismos de atenuación y que por lo tanto no resulta sorprendente que las mediciones muestren, regularmente, una gran dispersión en relación al modelo. Los modelos basados en redes neuronales artificiales (RNA) muestran un rendimiento muy superior a los MDR, sin embargo su implementación resulta ser considerablemente más compleja y, por lo tanto, costosa. Por un lado, una RNA necesita de datos para ser entrenada y validada, lo que implica llevar a cabo una serie de tronaduras de prueba. En teoría, los MDR también necesitan de un registro de datos para determinar el valor de sus constantes, sin embargo, y dado que estos modelos llevan muchos años siendo aplicados, es posible recurrir a tablas donde se indican los rangos de valores para dichas constantes según tipo de suelo (aunque debido a la heterogeneidad de los suelos esta alternativa resulta ser difícil de aplicar). Por otro lado, una RNA requiere el desarrollo de complicados algoritmos para su implementación, mientras que un MDR puede ser fácilmente desarrollado en una hoja de cálculo de Excel (o algún software similar). En relación al modelo propuesto por G.Berta no fue posible encontrar algún estudio o informe que hiciera uso del mismo, por lo que no hay ningún indicio sobre su rendimiento. Debido a esto, podemos decir que los modelos de distancia reducida (MDR) descritos en este capítulo siguen siendo, en términos de implementación, la mejor opción para predecir la magnitud de las vibraciones generadas por el uso de tronaduras. De estos modelos, el de Devine es, según los estudios citados, el que muestra el mejor rendimiento, razón por la cual se recomienda su uso. Sin embargo, este mejor rendimiento superior no resulta ser suficiente para descartar de manera definitiva los otros MDR, quedando abierta la posibilidad de usarlos.

En relación a los niveles de sobrepresión de aire podemos decir que, al igual que en el caso de las vibraciones, los valores medidos suelen mostrar una dispersión considerable en relación a los valores entregados por los modelos de distancia

reducida respectivos. Sin embargo, en este caso el rendimiento de los modelos resulta ser considerablemente inferior, debido principalmente a que ninguno de estos considera de forma completamente adecuada los factores meteorológicos, los cuales, como ya sabemos, cambian constantemente. Como ya vimos, algunos autores, después de considerar la gran dispersión (elevado error estándar) y la baja correlación que exhiben en ocasiones estos modelos, determinaron que estos solo deberían emplearse para estimar, en términos muy generales, los niveles de sobrepresión esperados. De esta forma, es posible concluir que la implementación de estos modelos, con el propósito de comparar sus resultados con valores establecidos en una norma o ley, debe considerar forzosamente la inclusión de correcciones basadas en mediciones de prueba o en alguna otra metodología. Por otro lado, si se plantea hacer uso de algún software es importante advertir que su metodología de modelación no puede estar basada en la ISO 9613-2, ya que dicho estándar indica en sus alcances que no es aplicable a *“ondas explosivas originadas en la minería, faenas militares y actividades similares”*. En este sentido, el modelo desarrollado por la consultora Terrock resulta ser una buena opción, ya que su metodología no está basada en dicha norma. Además, cuenta con la certificación de las autoridades regulatorias de varias provincias australianas (Victoria, Nueva Gales del Sur y Queensland).

## Capítulo 5

### Normativas internacionales para el control de los efectos del ruido y la vibración sobre estructuras y personas

Este capítulo comienza con una breve descripción de la forma en que se clasifica el daño sobre estructuras y por qué se usa el parámetro velocidad de partícula para evaluarlo. A continuación se revisan algunas de las principales normas o recomendaciones internacionales que guardan relación con el control de los efectos producidos por ruidos y vibraciones sobre personas y estructuras. El capítulo finaliza con una conclusión donde se seleccionan algunas de las normas presentadas para ser usadas como base en las guías propuestas al final de este trabajo.

#### 5.1 Criterio para clasificar y estimar daños sobre estructuras

La vibración o la sobrepresión de aire generadas por una tronadura pueden afectar a una estructura de diferentes formas. Es posible que haya serios daños estructurales, caída de objetos o aparición de grietas en el revestimiento de las paredes. También pueden verse afectadas las personas y, en ciertos casos, maquinarias o equipos particularmente sensibles.

La respuesta o daño estructural se clasifica en leve, menor y mayor\*. La respuesta de tipo leve corresponde al movimiento de objetos sueltos y la re-apertura de viejas grietas o la aparición de nuevas en materiales como el yeso. La del tipo menor corresponde a daños un poco más severos, pero que aún no afectan la estructura en sí, como el rompimiento de vidrios, la aparición de grietas en murallas o la soltura y caída de yeso. Por último, la respuesta de tipo mayor ocurre cuando existe una distorsión permanente de la estructura (lo que resulta en un serio debilitamiento de la misma), como grietas largas y profundas, desplazamiento de cimientos, etc. Por lo general, los límites propuestos en las normas para el control de los efectos producidos por tronadura tienen por objetivo

---

\* Siskind et al. (1980)

evitar la aparición de daños leves, para así evitar respuestas de carácter más severo. La vibración que incide sobre una estructura ejerce un esfuerzo dinámico sobre ella, provocando la deformación de sus componentes. Estos esfuerzos dinámicos, en conjunto con los esfuerzos estáticos ya presentes, son los que provocan los daños en la estructura. Un material con módulo de elasticidad “E” y que sufre una deformación “ε” experimenta un esfuerzo “σ”, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (5.1)$$

Por otro lado, la deformación que sufre el material se puede expresar como el cociente entre la velocidad con que vibran sus partículas (v) y la velocidad de propagación de la onda de vibración (c), o sea  $\varepsilon = v/c$ . De esta forma la expresión 5.1 queda de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{v * E}{c} \quad (5.2)$$

Debido a que tanto la velocidad de propagación como el módulo de elasticidad son constantes, es posible concluir que la magnitud del esfuerzo dinámico depende principalmente de la velocidad de vibración que experimentan las partículas del medio. Por esta razón, gran parte de las normas internacionales para el control de vibraciones están basadas en dicho parámetro. Sin embargo, la probabilidad que ocurran daños por vibraciones depende de muchos factores, como la duración y cantidad de estas, la calidad de la construcción, el nivel de mantenimiento de la estructura, etc.

## **5.2 Normativas para el control de vibraciones en estructuras.**

A continuación se indican algunas de las principales normas o recomendaciones internacionales relacionadas al control de vibraciones producidas por tronadura, colocando énfasis en el lugar donde estas indican que se deben realizar las mediciones (dentro o fuera de la estructura) y en la variable en función de la cual establecen sus límites, ya sea la velocidad pico por componente (VPC) o la velocidad pico de partícula (VPP).

### 5.2.1 Norma Alemana: DIN 4150-3

La primera versión de esta norma data de 1975. En ella se establecían límites para la velocidad de partícula únicamente en función del tipo de estructura. Fue actualizada en 1999, incluyéndose la frecuencia de la vibración incidente sobre la estructura (Tabla 5-1).

La norma indica que se deben medir las tres componentes del vector velocidad de partícula (longitudinal, transversal y vertical) en el primer piso (planta baja) de la estructura, en los cimientos de la pared exterior o en esta misma pared. Los valores límites establecidos por ella están en función de la velocidad pico de partícula (VPP). La figura 5-1 muestra en un gráfico los límites establecidos por esta norma.

Tipo de edificación	Límites de velocidad de partícula (mm/s)			PS
	Frecuencia (Hz)			
	< 10	10 – 50	50 - 100	TF
<i>Estructuras delicadas, sensibles a la vibración</i>	3	3 – 8	8 – 10	8
<i>Viviendas y edificios (construcciones residenciales)</i>	5	5 – 15	15 – 20	15
<i>Comercial e industrial (diseños robustos)</i>	20	20 – 40	40 – 50	40

Tabla 5-1: Límites norma DIN 4150-3 (1999).

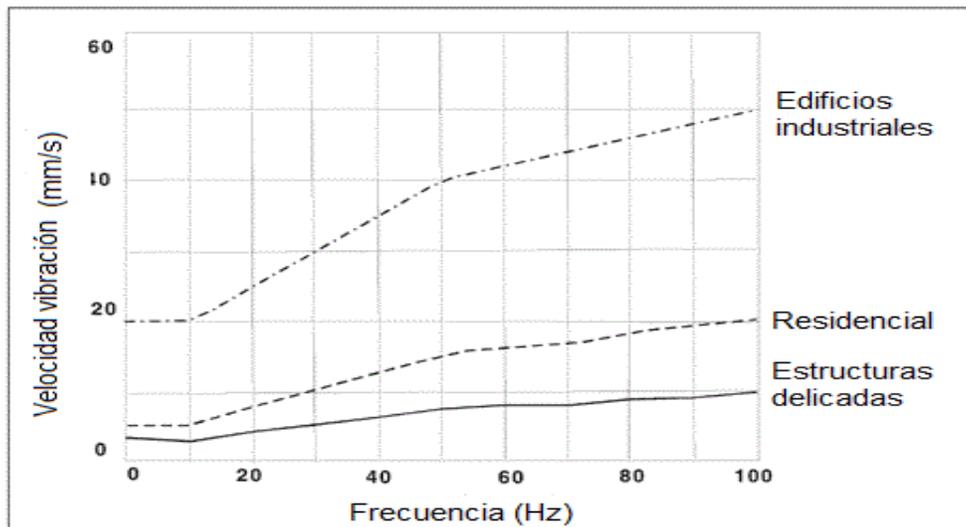


Figura 5-1: Gráfico que presenta los límites establecidos en DIN 4150-3.

Como se puede ver en la tabla 5-1, la norma también incluye los niveles recomendados (en cualquier rango de frecuencia) para el piso superior (PS) de una estructura. Sin embargo, para esta situación se indica que solo se deben medir las componentes horizontales (longitudinal y transversal) del movimiento.

### 5.2.2 Norma Americana: USBM RI8507

En 1962 la oficina de minas de los Estados Unidos (USBM) publicó un informe donde se analizaban cerca de 40 trabajos relacionados con el control de vibraciones producidas por tronadura. Su objetivo era determinar que parámetro (desplazamiento, velocidad o aceleración) se relacionaba de forma más directa con el daño observado en estructuras. Se concluyó que dicho parámetro era la velocidad de partícula, estableciéndose un límite de 50 mm/s, valor por debajo del cual, se creía, había una muy baja probabilidad de daños. Sin embargo, este valor no redujo el número de quejas y molestias, por lo que la norma debió ser actualizada en 1980. Esta actualización consideraba la frecuencia de la vibración y el tipo de vivienda, ya sea que tenga revestimiento de adobe o de yeso, como se muestra en las siguientes tablas:

Tipo de vivienda	Limite permisible (mm/s)			
	Frecuencia (Hz)			
	1 – 4	4 – 16	16 – 40	40 – 100
<i>Vivienda con revestimiento de adobe</i>	5 – 19	19	19 - 50,8	50,8

Tabla 5-2: Límites de RI8507 para viviendas revestidas de adobe.

Tipo de vivienda	Limite permisible (mm/s)			
	Frecuencia (Hz)			
	1 - 2,6	2,6 – 10	10 – 40	40 – 100
<i>Vivienda con revestimiento de yeso</i>	5 - 12,7	12,7	12,7 - 50,8	50,8

Tabla 5-3: Límites de RI8507 para viviendas revestidas de yeso.

La norma establece que se deben medir las tres componentes del vector velocidad de partícula en el suelo cercano a la estructura y los valores límites que fija están en función de la velocidad pico de partícula (VPP). La siguiente figura muestra en un gráfico los límites establecidos por esta norma.

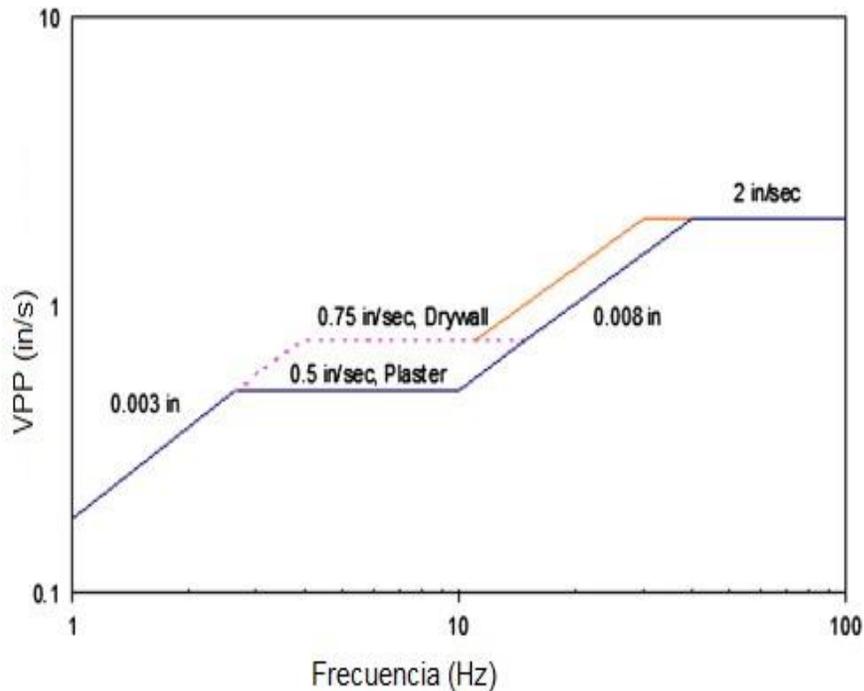


Figura 5-2: Gráfico que presenta los límites establecidos en RI8507.

La debilidad de esta norma radica en las bajas frecuencias, bajo de los 4 Hz. Como no se tenía suficiente información por debajo de dicha frecuencia, simplemente se trazó un recta de pendiente 0.03 pulgadas. Aunque la RI8507 no es una norma como tal, los niveles que establece siguen siendo usados como referencia hasta hoy, no solo en Estados Unidos, sino que alrededor de todo el mundo.

### 5.2.3 Norma Española: UNE 22-381-93

Fue elaborada en 1993 por la *Asociación Española de Normalización y certificación* (AENOR). La norma establece que se deben medir los tres componentes del vector velocidad de en el suelo cercano a la estructura, mientras

que los valores límites fijados por ella están en función del mayor absoluto de dichos componentes (VPC). En la siguiente tabla se indican los valores máximos permitidos para la mayor componente de la velocidad.

tipo de estructura	Características	Frecuencia principal (Hz)		
		2 – 15	15 – 75	> 75
		VPC (mm/s)	D máx.(mm) (*)	VPC(mm/s)
I	<i>Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.</i>	20	0.212	100
II	<i>Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a vibraciones.</i>	9	0.095	45
III	<i>Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones.</i>	4	0.042	20

**Tabla 5-4: Límites norma UNE 22-381-93.**

En el tramo 15-75 Hz, donde los límites están dados en función del desplazamiento pico de la mayor componente ( $d$ ), se puede calcular la velocidad equivalente si se conoce la frecuencia principal ( $f$ ) a través de la expresión  $v = 2\pi f d$ . La figura 5-3 muestra en un gráfico los límites establecidos en esta norma.

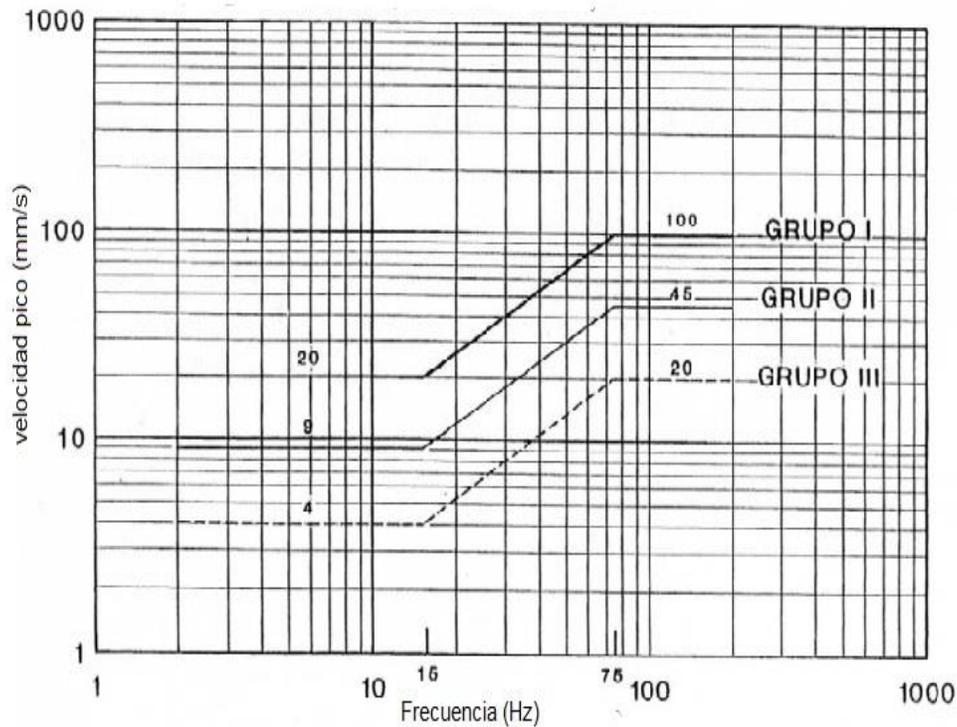


Figura 5-3: Gráfico que presenta los límites establecidos en UNE 22-381-93.

#### 5.2.4 Norma Suiza: SN 640 312a

Presentada en 1992, esta norma tiene la particularidad de incluir la frecuencia con que ocurren las vibraciones (ocasional, frecuente, permanente). En ella se establece que se deben medir las tres componentes del vector velocidad de partícula dentro de la estructura. Ahora, dado que dentro de la estructura la magnitud de la vibración puede variar considerablemente entre un lugar y otro, la norma indica que, de ser posible, se deberían realizar mediciones en varios puntos hasta determinar los más críticos.

En ella se distinguen cuatro grados de susceptibilidad para edificaciones: *muy poco susceptible*, *poco susceptible*, *susceptibilidad normal* y *particularmente susceptible*. La susceptibilidad está determinada por el tipo de construcción, materiales utilizados, cimientos, etc. Los valores límites que establece esta norma están en función de la velocidad pico de partícula (VPP) y se muestran en la tabla 5-5.

Clase de susceptibilidad	Frecuencia de eventos	Valores máximos del vector velocidad (mm/s)		
<i>muy poco susceptible (1)</i>	<i>Ocasional</i>	<i>Hasta el triple de los valores correspondientes a la clase de susceptibilidad (3)</i>		
	<i>Frecuente</i>			
	<i>Permanente</i>			
<i>poco susceptible (2)</i>	<i>Ocasional</i>	<i>Hasta el doble de los valores correspondientes a la clase de susceptibilidad (3)</i>		
	<i>Frecuente</i>			
	<i>Permanente</i>			
<i>susceptibilidad normal (3)</i>		<i>frecuencia dominante</i>		
		<i>&lt; 30 Hz</i>	<i>30 -60 Hz</i>	<i>&gt; 60 Hz</i>
	<i>Ocasional</i>	15	20	30
	<i>Frecuente</i>	6	8	12
	<i>Permanente</i>	3	4	6
<i>particularmente susceptible (4)</i>	<i>Ocasional</i>	<i>Entre los valores de la clase (3) y la mitad de estos</i>		
	<i>Frecuente</i>			
	<i>Permanente</i>			

**Tabla 5-5: Límites norma SN 640 315a.**

La norma considera que la superación ocasional de estos valores en hasta un 30% solo conlleva un leve aumento en la probabilidad de daño y que se espera la aparición de fisuras visibles solo cuando se alcancen varias veces los valores indicados.

### 5.2.5 Norma Sueca: SS 4604866

Publicada en 1991, esta norma establece que se debe medir solo la componente vertical del vector velocidad de partícula en el suelo cercano a la estructura. Sin embargo, se considera la medición de las tres componentes para caso especiales. Los niveles de vibración permitidos se establecen a partir de un *valor guía*, el cual viene dado por:

$$v = v_0 F_K F_d F_t \quad (5.1)$$

Donde  $v_0$  es la velocidad vertical sin corrección,  $F_K$  es el factor de calidad de la construcción,  $F_d$  es el factor de distancia (toma en cuenta la menor distancia entre la carga y el sitio de medición) y  $F_t$  es un factor que se relaciona con la duración de la faenas de tronaduras. La norma establece que si se conoce la velocidad de

propagación de la onda P ( $v_p$ ), entonces es posible obtener un valor más preciso de  $v_0$  usando la siguiente expresión:

$$v_0 = v_p/65$$

Los valores típicos de  $v_0$  se muestran en la tabla 5-6.

tipo de terreno	$v_0$ (mm/s)
<i>Morrena suelta, arena, gravilla, arcilla</i>	18
<i>Morrena firme, arcillolita, caliza blanda</i>	35
<i>Granito, neis, caliza firme, cuarzita, arenisca, diabasa</i>	70

**Tabla 5-6: Valores típicos de  $v_0$  según el tipo de terreno.**

El factor de calidad  $F_K$  viene dado por el producto entre el factor de construcción ( $F_b$ ) y el factor del material ( $F_m$ ), o sea:

$$F_K = F_b F_m$$

Los valores típicos de estos factores se muestran en las siguientes tablas:

Clase	tipo de edificación	$F_b$
1	edificaciones pesada (puentes, muelles, defensa civil)	1.7
2	edificaciones industriales y de oficina	1.2
3	viviendas estándar	1
4	Edificaciones sensibles (iglesias, museos, etc.)	0.65
5	edificaciones históricas en condición débil y ciertas ruinas	0.5

**Tabla 5-7: Valores típicos de  $F_b$  según tipo de edificación.**

Clase	tipo de material	$F_m$
1	concreto reforzado, acero, madera	1.2
2	concreto no reforzado, ladrillo	1
3	concreto poroso prefabricado	0.75
4	Tabiques prefabricados	0.65

Tabla 5-8: Valores típicos de  $F_m$  según tipo de edificación.

Para determinar  $F_d$  la norma considera tres rangos de distancia (1-10, 10-350 y sobre 350) y el tipo de suelo donde la estructura tiene sus cimientos (arcilla, morrena y roca). Se propone el siguiente gráfico:

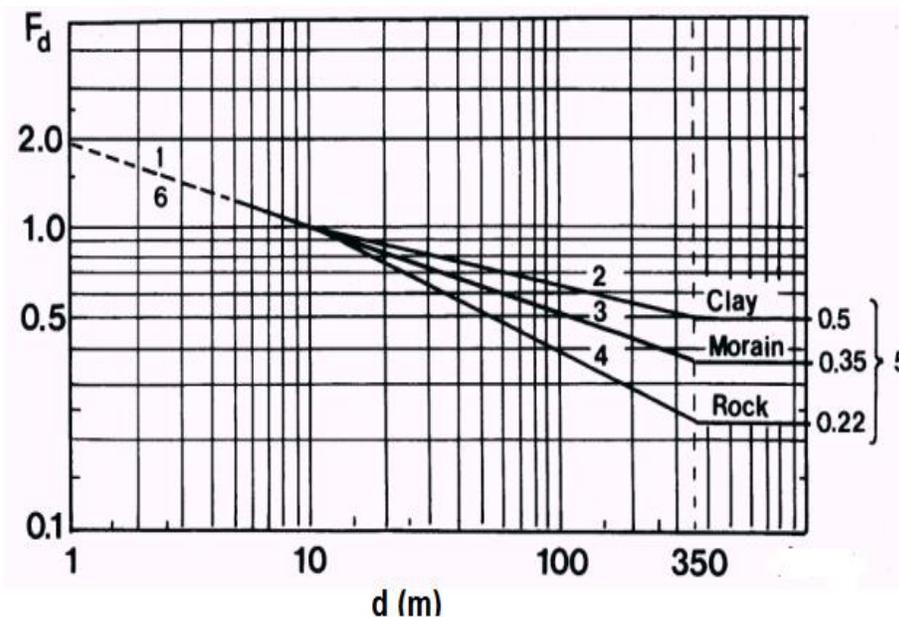


Figura 5-4: Factor distancia  $F_d$  en función de la distancia y el tipo de terreno.

El factor de tiempo depende, como ya se dijo, de la duración de las faenas de tronadura en un determinado proyecto, lo cual está ligado a la naturaleza del mismo. Para obras de construcción como túneles, zanjas, cámaras o trincheras para carreteras se establece que  $F_t = 1$ . Por otro lado, para trabajos estacionarios, como minas y canteras se establece que  $0.75 \leq F_t < 1$ .

La norma no considera directamente la frecuencia de la vibración, ni tampoco establece un coeficiente relacionado con dicho parámetro. Esto debido a que se asume que el parámetro  $F_d$  la considera de forma implícita, ya que la frecuencia de vibración depende de la distancia y de la naturaleza del terreno.

### 5.2.6 Norma inglesa: BS 7385 - 2

Presentada el año 1993, esta norma establece que se deben medir los tres componentes del vector velocidad de partícula en la base de la estructura, de cara a la fuente de vibración. La norma aconseja que cuando esto no sea posible las mediciones deben realizarse fuera de la estructura, en el suelo cercano a la misma. Los valores límites que establece están en función de la velocidad pico de partícula (VPP) y se muestran en la tabla 5-9 y en la figura 5-5.

tipo de edificio	VPP (mm/s)	
	4-15 Hz	> 15 Hz
<i>reforzados (estructuras comerciales e industriales de grandes dimensiones)</i>	50 (mm/s)	
<i>No reforzados (estructuras residenciales y comerciales pequeñas)</i>	15 (mm/s) a 4 Hz; 20 (mm/s) a 15 Hz	20 (mm/s) a 15 Hz incrementándose a 50 (mm/s) a 40 Hz

Tabla 5-9: Límites norma BS 7385-2.

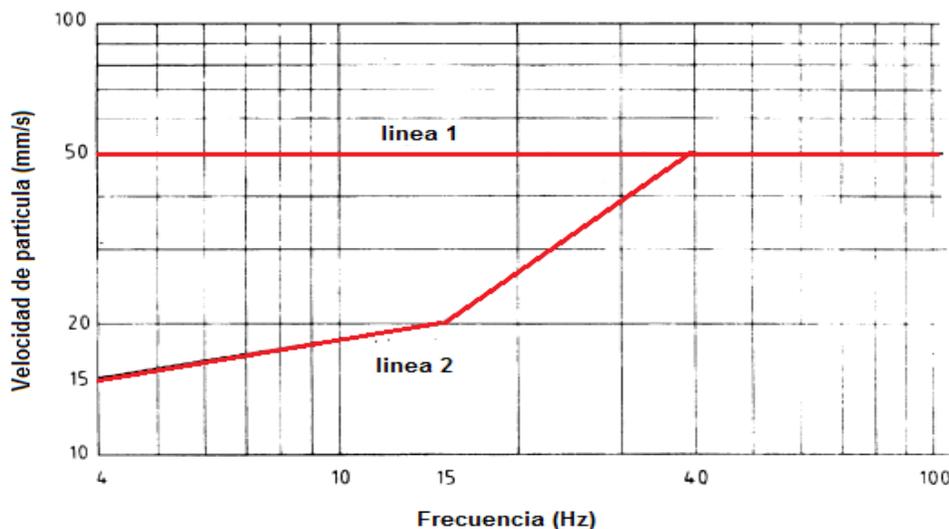


Figura 5-5: Gráfico que presenta los límites establecidos en BS 7385-2.

En el gráfico de la figura 5-5, la línea 1 representa las estructuras reforzadas, mientras que la línea 2 representa las no reforzadas. La norma contempla que daños menores son posibles para vibraciones del doble de magnitud que las indicadas en la tabla 5-9, mientras que daños a la estructura (mayores) solo son posibles cuando las vibraciones cuadriplican los valores ya señalados.

La norma también introduce el parámetro “*amplificación dinámica*”, el cual se define como el movimiento medido en cualquier punto dentro de la estructura, dividido por el movimiento medido en un punto de referencia (generalmente la base de la estructura o sus cimientos). Normalmente este parámetro es mayor que 1, o sea, los niveles de vibración en diferentes partes de la estructura resultan ser mayores que en los cimientos.

### 5.2.7 Norma Escocesa: PAN 50

Publicada en el año 2000, esta norma está basada en gran medida en el estándar británico mencionado anteriormente, pero a diferencia de aquel solo considera estructuras de tipo residencial. La norma establece que se deben medir las tres componentes del vector velocidad de partícula fuera de la propiedad, cerca de la cara que este en dirección de la tronadura. Los valores límites que establece están en función de la velocidad pico de partícula (VPP) y se indican en la siguiente tabla (a diferencia de la norma británica incluye frecuencias bajo los 4 Hz).

tipo de daño	Característica	VPP (mm/s)		
		< 4 Hz	4-15 Hz	> 15 Hz
<i>Cosmético</i>	<i>formación degrietas finas, crecimiento de grietas existentes en estuco y paredes delgadas</i>	15	20	50
<i>Menor</i>	<i>Formación de grietas largas, perdida o caída de superficies de estuco</i>	30	40	100
<i>Estructural</i>	<i>daños en elementos estructurales</i>	60	80	200

Tabla 5-10: Límites norma PAN 50.

### 5.2.8 Norma Australiana: AS 2187 –2

Presentada por la asociación australiana de estándares (SAA) el año 1993 y actualizada en el 2006, esta norma establece que se deben medir las tres componentes del vector velocidad de partícula fuera de la estructura. Los límites establecidos por esta norma están en función de la velocidad pico de partícula y se indican en la tabla 5-11. La norma también establece que estructuras especiales, como represas, hospitales o edificios que alberguen equipamiento científico sensible a vibraciones, están fuera de su alcance y requieren estudios particulares. Cabe señalar que los límites estipulados en esta norma fueron seleccionados teniendo en cuenta tanto la integridad estructural como las molestias en personas.

Tipo de estructura	VPP (mm/s)
<i>edificios comerciales e industriales o estructuras de concreto reforzado o construcciones de acero</i>	25
<i>casas, edificios residenciales bajos y edificios comerciales no incluidos en la otra categoría</i>	10
<i>Monumentos o edificios históricos especialmente sensibles a la vibración</i>	2

Tabla 5-11: Límites norma AS 2187.

### 5.3 Normativas para el control de vibraciones en personas.

La respuesta humana a las vibraciones producidas por una tronadura es un fenómeno muy complejo. La vibración incidente, ya sea que por suelo o por aire, puede combinarse con elementos de la estructura y generar un ruido secundario que influye en la respuesta de la persona (el ser humano percibe las vibraciones con el oído interno y las sonidos que acompañan a estas con el oído externo). Por otro lado, la susceptibilidad de un individuo dependerá de su edad, su exposición previa a vibraciones, la actividad que realiza al momento de percibir la vibración, etc. Oriard (1970) presentó un esquema (figura 5-6) para predecir la respuesta humana a las vibraciones, el cual considera el tipo de vibración (permanente o transitoria) y si está viene acompañada de ruido.

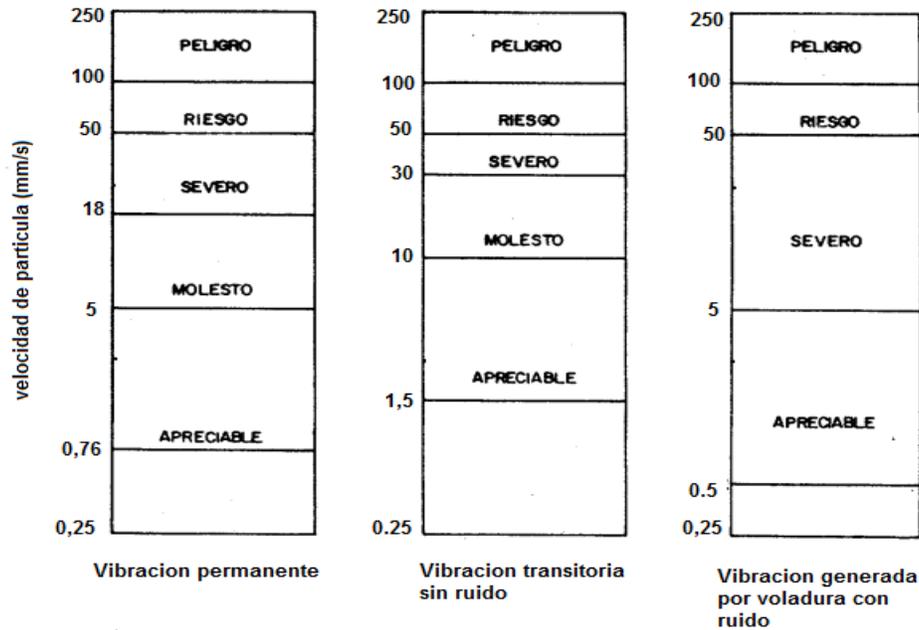


Figura 5-6: Esquema desarrollada por Oriard para estimar la respuesta humana a las vibraciones.

### 5.3.1 Norma Alemana: DIN 4150 - 2

Esta norma, del año 1999, se elaboró al reconocer que incluso las vibraciones apenas perceptibles no son deseables en estructuras habitadas permanentemente por personas. En ella se establece un método que permite a los interesados tener una idea de la percepción de los ocupantes de una estructura sometida a los efectos de una tronadura. Primero se debe calcular el coeficiente  $KB$  a través de la siguiente expresión:

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right)}}$$

donde  $V_{m\acute{a}x}$  es la velocidad pico partícula (VPP) medida en mm/s,  $f$  es la frecuencia de la vibración medida en Hz y  $f_0$  es una frecuencia de referencia cuyo valor es de 5.6 Hz. Una vez calculado este valor se debe multiplicar por un factor de resonancia  $C_F$ , el cual toma un valor de 0.8 si se considera la resonancia de un edificio, y de 0.6 si no se considera. El resultado es el coeficiente  $KB_{Fm\acute{a}x}$ .

Los límites planteados por esta norma están basados en el valor de este coeficiente y se indican en la siguiente tabla, considerando tipo de estructura y jornada (día-noche).

Tipo de locación	Límites	
	Día	Noche
Edificios dedicados exclusivamente a actividades comerciales	6	0.6
Edificios dedicados principalmente a actividades comerciales	6	0.4
Edificios no dedicados a actividades comerciales ni tampoco considerados principalmente como residenciales	5	0.3
Edificios considerados exclusivamente o principalmente como residenciales	3	0.2
Edificios particularmente en necesidad de protección (áreas especiales)	3	0.15

**Tabla 5-12: Límites norma DIN 4150-2.**

### 5.3.2 Norma británica: BS 6472 - 2

Esta norma, publicada en el año 2008, establece que se deben medir los tres componentes del vector velocidad de partícula en una superficie dura fuera de la estructura, lo más cerca posible de esta. Los límites de esta norma (tabla 5-13) están en función de la velocidad pico de partícula y consideran un máximo de tres tronaduras por día.

Tipo de estructura	Intervalo	velocidad partícula (mm/s)
<i>Residencial</i>	<i>Día</i>	<i>6-10</i>
	<i>Noche</i>	<i>2</i>
	<i>Otro</i>	<i>4.5</i>
<i>Oficina</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>14</i>
<i>Industrial</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>14</i>

**Tabla 5-13: Límites norma BS 6472-2.**

Es importante señalar que, dado que el objetivo de esta norma es la respuesta de las personas dentro de una estructura, los valores (externos) ya señalados aseguran niveles internos satisfactorios. Para más de tres tronaduras por día la norma indica que se debe usar un factor F para reducir los niveles señalados. Este factor viene dado por:

$$F = 1.7N^{0.5}T^d$$

Donde N es el número de tronaduras por día y T es la duración típica de la tronadura. Para pisos de madera  $d = 0.32$ , mientras que para pisos de concreto se tiene  $d = 1.22$ . Niveles de vibración bajo los límites establecidos por esta norma aseguran que la probabilidad de reacciones adversas por parte de la comunidad sea muy baja. Se hace hincapié en que doblar estos valores resultará en reacciones adversas por parte de la comunidad, mientras que cuadruplicarlos tendrá consecuencias muy significativas. El rango de valores para la zona residencial se debe a que dentro del hogar las personas exhiben distintos grados de tolerancia, dependiendo de factores sociales y psicológicos. Para los propósitos de esta norma la jornada de día se considera de 8:00 am a las 18:00 pm, de lunes a viernes, y de 8:00 am a 13:00 pm los sábados, mientras que la jornada de noche cubre el periodo de 23:00 pm a 7:00 am. La categoría de tiempo "otro" se refiere a cualquier hora que no caiga dentro de la jornadas de día o de noche. La norma también establece que los niveles indicados no deberían ser excedidos en más del 10% de las tronaduras y que ninguna de ellas debiera generar vibraciones que sobrepasen en más de un 50% estos valores.

### **5.3.3 Recomendación del Consejo Ambiental de Australia & Nueva Zelandia (ANZEC).**

Este documento, publicado en el año 1990, tiene por objetivo establecer criterios que reduzcan las molestias de las personas en áreas sensibles (residencias, escuelas) que se encuentren cerca de proyectos que usen tronaduras. Recomienda un valor máximo de 5 (mm/s), el cual puede ser excedido en hasta un 5 % del total de tronaduras realizadas en un periodo de 12 meses, pero nunca debe sobrepasar los 10 mm/s.

#### 5.4 Normativa para el control de la sobrepresión de aire en estructuras.

Se han realizado muchos estudios para determinar el daño que puede causar una onda de sobrepresión en una estructura. Naturalmente, la parte más sensible de la estructura son los vidrios, los cuales, expuestos a ondas de sobrepresión más intensas de lo normal, pueden salirse de sus marcos, trizarse o incluso romperse. La siguiente fórmula establece la probabilidad de rompimiento para un cristal en función de su área ( $A_c$ ) y la magnitud de la sobrepresión ( $P$ ):

$$P_{rc} = (2.043 \times 10^{-7})(A_c)^{1.22}(P)^{2.78}$$

Como vemos, mientras más grande sea el cristal mayor será la probabilidad de daño. Esto fue confirmado en algunos de los estudios que formaron parte del *reporte 8485* de la oficina de minas de los Estados Unidos (USBM), donde encontramos el siguiente gráfico:

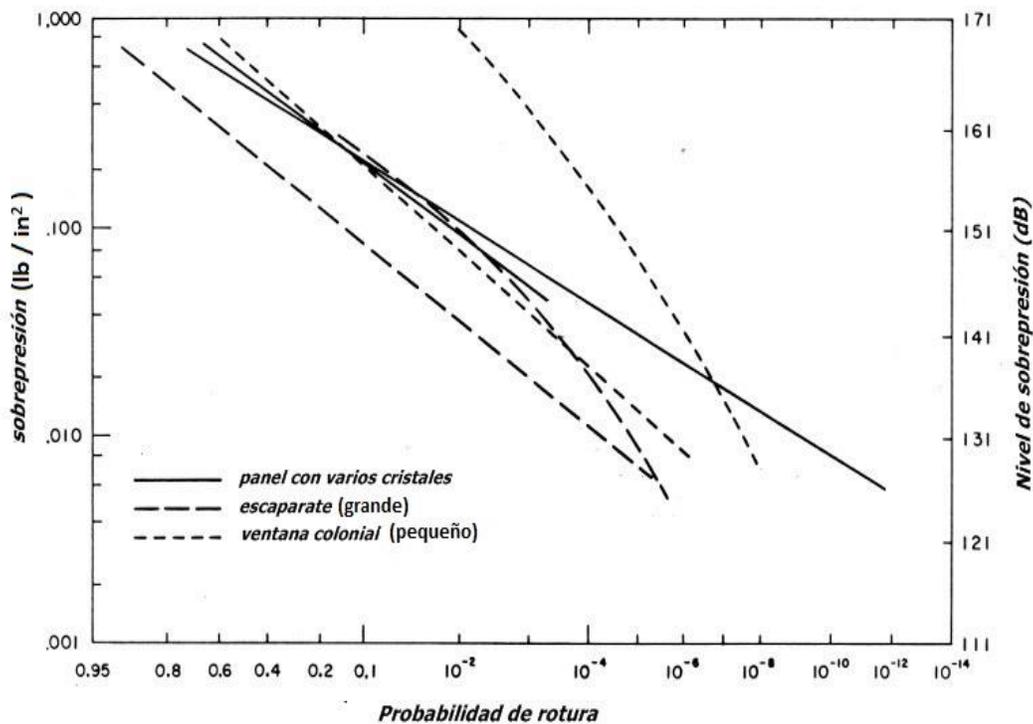


Figura 5-7: Probabilidad de rotura de cristales en relación al nivel de sobrepresión de aire.

Cabe señalar que es muy raro que operaciones rutinarias de tronadura, llevadas a cabo bajo condiciones atmosféricas normales, alcancen los niveles donde se produce rotura de vidrios, mucho menos daños sobre las estructuras en sí. Siskind & Summers (1974) resumieron los resultados de sus estudios en la tabla 5-14.

sobrepresión de aire (dB)	kPa	Efecto
177	14	<i>todas las ventanas se rompen</i>
170	6.3	<i>la mayoría de las ventanas se rompen</i>
150	0.63	<i>algunas ventanas se rompen</i>
140	0.2	<i>paredes hecha de vidrio se pueden romper, ventanas sueltas pueden moverse</i>
128	0.05	<i>posibles quejas</i>

**Tabla 5-14: Algunos efectos de la sobrepresión de aire sobre estructuras (Siskind & Summers).**

Los límites vigentes en Estados Unidos, establecidos por el USBM, se presentan en la tabla 5-15. Debido a las diferentes escalas de ponderación usadas por los instrumentos de monitoreo, el límite establecido varía según el tipo que se ocupe.

limite respuesta de frecuencia baja para el aparato de medición (Hz)	nivel máximo (dB)
0.1	134
2	133
6	129
<i>ponderación C, respuesta lenta</i>	105

**Tabla 5-15: Límites nivel de sobrepresión según respuesta del aparato de medición.**

La norma Australiana AS 2187-2 establece un límite de 133 dB(L) peak para edificios que incluyen mampostería y yeso en su estructura, como también para edificios de estructuras reforzadas o construcción de acero. La norma permite adoptar un límite superior siempre y cuando se llegue a un acuerdo con las partes correspondientes.

## **5.5 Normativa para el control de la sobrepresión de aire en personas.**

Al considerar los efectos de la sobrepresión de aire sobre una persona se debe distinguir entre riesgos para la salud y molestias. En relación a los riesgos, investigaciones llevadas a cabo por el USBM encontraron que el límite para ruptura del tímpano y daño al oído interno se encuentra en el rango 178 – 185 *dB*. También se estableció que protección para los oídos es innecesaria para niveles inferiores a 140 *dB*, independiente del número y la duración de las tronaduras. Estos niveles están muy por encima del promedio de límites fijados por diferentes normas, como por ejemplo la australiana, que establece un límite de 115 *dB*. En la misma línea, un estudio llevado a cabo por la agencia de protección ambiental de estados unidos (EPA) encontró que si una persona es expuesta a 1000 eventos por día de sonido impulsivo de duración 1 s, y de magnitud 116 *dB*, durante 20 años, sufrirá una pérdida parcial de audición de 5 *dB*. Se puede concluir entonces que una sola tronadura por día, con un peak de sobrepresión de aire de 115 *dB* tendrá un efecto insignificante sobre la salud de la comunidad. Por otro lado, es muy posible que el uso de tronadura produzca algún grado de molestia en las comunidades cercanas, pero como ya se mencionó, dicha respuesta varía considerablemente dependiendo de la persona. A continuación se indican algunas normas y recomendaciones internacionales que cubren este tema.

### **5.5.1 Normativa Australiana: AS 2187-2 (2006)**

La norma distingue entre sitios sensitivos, como edificios residenciales, escuelas, u hospitales, y sitios no sensitivos, como fábricas y locales de comercio. En sitios sensitivos y con operaciones que duren más de un año, o que impliquen más de 20 tronaduras, se recomienda un nivel de 115 *dB(L)* peak en hasta un 95% de ellas y un máximo de 120 *dB(L)* peak. Para operaciones que duren menos de un año, o que impliquen menos de 20 tronaduras, se recomienda un nivel de 120 *dB(L)* peak para el 95 % de ellas y un máximo de 125 *dB(L)* peak. Para sitios no sensitivos se recomienda un nivel máximo de 125 *dB(L)* peak, independiente de la duración de las faenas. La norma establece que, previo acuerdo con las partes interesados, se pueden establecer límites superiores a los ya señalados.

### **5.5.2 Recomendación Americana**

Como ya se dijo, el USBM estableció un nivel de  $133 \text{ dB(L) peak}$  como límite de seguridad para estructuras. A pesar de que este nivel ha demostrado cumplir dicho objetivo, aun producía quejas substanciales por parte de la comunidad. En la conferencia anual de la sociedad internacional de ingenieros de explosivos del año 2008 se informó que la mayoría de las minas en los Estados Unidos se habían auto-impuesto un nivel de  $120 \text{ dB(L) peak}$  como medio para reducir las quejas a un nivel aceptable.

### **5.5.3 Recomendación Canadiense.**

Diferentes autoridades provinciales canadienses habían establecido un nivel de  $128 \text{ dB(L) peak}$  como límite de seguridad, sin embargo este nivel aun producía quejas por parte de la comunidad, así que, al igual que en los Estados Unidos, se adoptó un nivel de  $120 \text{ dB(L) peak}$ . Se ha reportado que cuando el nivel se reduce a  $115 \text{ dB(L) peak}$  ya no se reciben quejas.

## 5.6 Conclusiones de este capítulo

El fijar límites para un contaminante en cualquier actividad productiva es siempre un asunto muy delicado. Un criterio muy laxo puede resultar en la rápida aparición de daños o molestias, con los consecuentes reclamos. Por otro lado, un criterio muy conservador puede dificultar las operaciones de un proyecto, prolongando o incluso paralizando su desarrollo.

En relación a las normas para el control de los efectos de vibraciones sobre estructuras hay varios puntos que deberían ser considerados. El primero de ellos es el tipo de estructuras consideradas por dichas normativas. Por lo general, las normas cubren tres tipos de estructuras, según su grado de sensibilidad a las vibraciones (alta, normal o baja). Sin embargo, normas como la americana y la escocesa solo tienen por objetivo estructuras de tipo residencial. Cabe señalar también que las categorías o tipos de estructuras establecidos en las normas analizadas son bastante similares entre sí. Es recomendable que la norma a seleccionar para la propuesta considere los tres tipos de estructuras antes mencionados.

El segundo punto a considerar es el tipo de daño que estas normas tratan de evitar. Como se mencionó al principio de este capítulo, el daño estructural se clasifica en leve, menor y mayor. Naturalmente, para conservar de mejor forma las estructuras y evitar un mayor nivel de reclamos, todas las normas analizadas establecen límites que evitan la aparición de daños de la menor categoría (leves).

El tercer punto es la variable a medir y el parámetro a partir del cual se establecen los límites. La mayor parte de las normas consideradas establece que se deben medir las tres componentes (longitudinal, transversal, vertical) del vector velocidad de partícula. En este sentido, solo la norma sueca especifica que se debe medir solo la componente vertical. En relación a los límites establecidos, algunas normas se basan en el mayor absoluto de los componentes del vector velocidad (VPC), mientras que otras usan la velocidad pico de partícula (VPP). El uso de un solo canal (mayor absoluto) quizás se deba que cuando la norma en cuestión fue elaborada todavía predominaba el uso de equipos analógicos, o sea, las unidades

de almacenamiento y procesamiento digital no habían sido desarrolladas (o se consideraba difícil contar con ellas), así que el módulo del vector velocidad se debía obtener manualmente. El problema radica en que para un registro cualquiera la velocidad pico de partícula resultante puede ser hasta un 73% superior que el mayor absoluto de los componentes, aunque por lo general resulta ser solo un 15 o 20 % mayor. Es recomendable entonces que la norma a seleccionar para la propuesta establezca límites en función del parámetro velocidad pico de partícula (VPP).

El cuarto punto corresponde al lugar de instalación de los sensores. Mientras algunas normas sostienen que estos se deben colocar en el suelo cercano fuera de la estructura, otras indican que se deben poner en los cimientos o la planta baja de la misma estructura, en la cara que da hacia la tronadura. Sin embargo, no existe mayor diferencia entre ambas alternativas, ya que el factor de amplificación en los primeros pisos es muy cercano a uno\*, siendo mayor solo en los pisos superiores. De esta forma, es posible concluir que si el objetivo es el control de los efectos sobre una estructura, entonces ambas alternativas son adecuadas. Por otro lado, si el objetivo es el control de los efectos sobre los ocupantes de un edificio, las mediciones deben realizarse entonces en el lugar preciso donde estos habitan, o en su defecto, donde pasan la mayor parte del tiempo.

El quinto y último punto es el rango de frecuencias establecido por cada norma. Según ISO 4866 la frecuencia de la tronaduras se encuentra, por lo general, en el rango 1 - 300 (Hz). Sin embargo, algunas normas, como la alemana y la americana, solo consideran el rango 1 - 100 (Hz). Esto obedece a lo planteado en el estudio de Stagg & Dowding (capítulo 2) y otros trabajos†, en los cuales se afirma que la frecuencia de gran parte de las vibraciones producidas por tronadura está en dicho rango, predominado las frecuencias entre los 5 y 50(Hz). Por otro lado, casi todas las normas consideran tres rangos de frecuencia. El primero, que por lo general se encuentra entre los 1 y 20 (Hz) aproximadamente, se establece para lidiar con el problema de la resonancia en las estructuras, ya que son varios los estudios que han mostrado que las frecuencias naturales de muchos tipos de

---

\* Clark et al, 1982.

† Manual de perforación y voladura (Carlos López Jimeno; 2003)

estructuras se encuentran comprendidas en esos rangos. Es recomendable entonces que la norma a seleccionar considere, como mínimo, dos rangos. Un primer rango, entre 1 y 20 (Hz) aproximadamente, establecido para lidiar con problemas de resonancia, y un segundo rango que incluya el resto de las frecuencias. Idealmente, debería haber un intervalo medio, entre 20 y 50 (Hz) aproximadamente, a causa del alto porcentaje de tronaduras cuya frecuencia se encuentra en ese rango.

A partir de estas conclusiones se han seleccionado las normas alemana, suiza y británica para ser incluidas en la propuesta de guía.

En relación al control de los efectos de las vibraciones sobre personas se observó que, a diferencia del caso de las estructuras, no existen muchas normas o recomendaciones. En parte, esto se debe a lo compleja que es la respuesta humana a las vibraciones, la cual depende (como ya se indicó en este capítulo) de varios factores, como la edad de la persona, su estado psicológico, la actividad que realiza al momento de percibir la vibración, etc. Además, está el factor del ruido secundario que produce la vibración al excitar elementos de la estructura y que claramente puede influir en la respuesta de una persona.

En un primer acercamiento, se determinó que la escala de Oriard sirve para tener una visión general del problema, pero carece de profundidad. Por otro lado, las recomendaciones de ANZEC no consideran la frecuencia de la vibración y tampoco distinguen entre día y noche. Las normas Británica y Alemana resultaron ser las más completas y, por esto, las más usadas a nivel internacional. Ambas indican que se debe medir la velocidad pico partícula (aunque la norma alemana desarrolla su propio descriptor) y las dos distinguen entre la jornada de día y la de noche. La norma alemana tiene la importante ventaja de considerar la frecuencia de la vibración, además de que su clasificación de estructuras es más detallada que la de la norma británica. Por otro lado, en la norma alemana se establece que las mediciones deben realizarse dentro de la estructura, en el lugar preciso donde se esperan o se han producido reclamos, mientras que en la norma británica se indica que las mediciones deben realizarse fuera de la estructura, señalándose, sin embargo, que los valores límites establecidos en ella aseguran niveles internos

satisfactorios para las personas. A pesar de todas estas consideraciones, ambas normas serán incluidas en la propuesta de guía, debido a la escasez de referencias para este tópico.

En relación al control de los efectos del ruido sobre estructuras se pudo establecer, entre otras cosas, que los niveles de ruido producidos en la mayoría de los trabajos que involucran el uso de tronaduras no son suficientes como para provocar daños de tipo mayor. Se encontró que el límite de 133 dB(L) peak, recomendado tanto por la norma americana como por la norma australiana, corresponde al menor nivel de ruido para el cual se ha observado algún tipo de daño. De esta manera, dicho valor formara parte de la propuesta de guía.

Por último, se consideró el control de los efectos del ruido sobre las personas. Se determinó que, al igual que en el caso de las estructuras, un daño de carácter mayor o incluso menor resulta ser muy poco probable, considerando los niveles de ruido generados habitualmente por tronaduras. La norma australiana resulto ser el documento más completo disponible, ya que considera el tipo de edificio según su grado sensibilidad y la duración de las operaciones (menor o mayor a un año). Otra característica de esta norma es su flexibilidad, ya que a pesar de establecer un límite inferior bastante conservador (115 dB(L) peak, para operaciones de más de un año), propone un límite superior considerablemente mayor (125 dB(L) peak, para operaciones de menos de un año). Por las razones ya señaladas, esta es la norma escogida para formar parte de la propuesta de guía.

## Capítulo 6

### Propuesta de Guía para la evaluación del impacto ambiental de las vibraciones generadas en tronaduras

#### 6.1 Alcances

Se sabe que las vibraciones pueden causar molestias en las personas y daños en estructuras. La presente guía cubre los principales aspectos relacionados con la elaboración de un estudio de impacto ambiental para este contaminante, como la medición y predicción de su magnitud y la evaluación de sus efectos tanto en estructuras como en personas.

En relación a los efectos sobre estructuras, esta guía solo se ocupa de los efectos directos sobre estas, no considerando efectos indirectos, como son la caída de objetos y las fallas que puedan sufrir equipos particularmente sensibles dentro de dichas estructuras.

La información presentada en esta guía está basada en las prácticas más consolidadas que se llevan a cabo en la actualidad, sin embargo, las autoridades nacionales pertinentes pueden requerir o aprobar otros procedimientos con el fin de abordar una situación específica.

#### 6.2 Medición y predicción

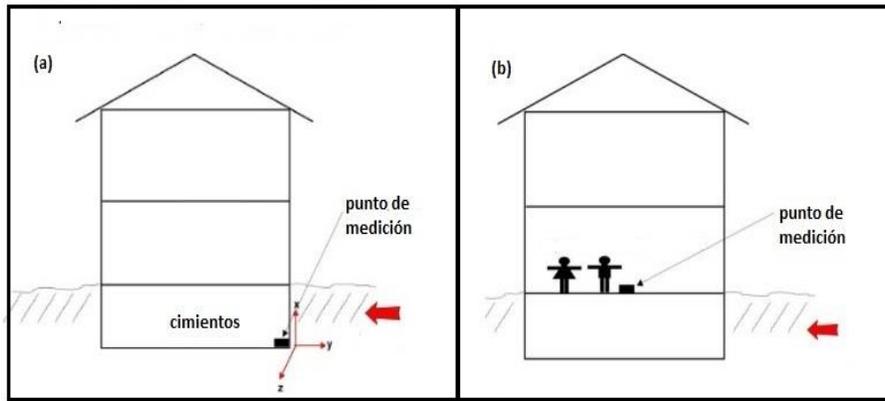
El primer punto que se debe establecer es el área de influencia del proyecto. Debido a que la magnitud de las vibraciones depende de muchos factores resulta imposible definir de antemano una distancia específica, pero por lo general se acostumbra considerar un radio de 1000 metros en torno a la ubicación de la tronadura. Idealmente, esta área de influencia se debería definir, para cada caso particular, en base a un valor máximo deseado (indicado, por ejemplo, en una norma), el modelo de propagación y el diseño contemplado para las tronaduras.

Una vez definida el área de influencia se deben seleccionar los receptores correspondientes, como edificios de tipo residencial, recintos educacionales,

edificios de oficina, hospitales, recintos industriales, etc. También se deben considerar estructuras particularmente sensibles, como edificios o monumentos históricos.

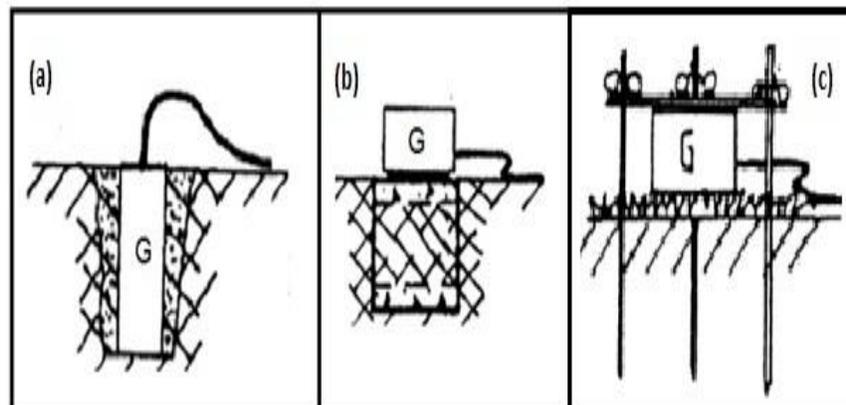
Gran parte de las normas internacionales para el control de vibraciones en tronaduras están basadas en el parámetro velocidad de partícula. De la misma forma, todas las normas presentadas en esta guía establecen límites en función de dicho parámetro. A raíz de esto, se debería privilegiar el uso de un geófono (también conocido como velocímetro), aunque los datos registrados por un acelerómetro pueden ser transformados fácilmente a velocidad por integración, ya sea por software o hardware. En la mayoría de estas normas internacionales también se indican los requisitos operacionales que deben cumplir los instrumentos de medición. Naturalmente estos requisitos, como el rango de frecuencia, rango dinámico y la relación señal-ruido, varían según cada norma, pero en términos generales el geófono debería ser capaz de medir vibraciones de entre 1 y 100 mm/s, en el rango 1 – 300 Hz, con una relación señal-ruido no menor a 5 dB.

En relación a la posición donde se debe colocar el geófono, algunas normas sostienen que este se debe colocar en el suelo cercano a la estructura, lo más próximo a esta, mientras que otras normas indican que este se debe montar en los cimientos o la planta baja de la misma estructura. Sin embargo, no existe mayor diferencia entre ambas alternativas, ya que el factor de amplificación en los primeros pisos es muy cercano a 1, siendo mayor solo en los pisos superiores. Si el objetivo de las mediciones es el control de los efectos sobre una estructura, entonces ambas alternativas son adecuadas. Por otro lado, si el objetivo es el control de los efectos sobre los ocupantes de una estructura, entonces es preferible que las mediciones se realicen dentro de la misma, en las partes más sensibles (considerando la cantidad de habitantes y las actividades que realizan). Ambas situaciones se ilustran en la figura 6-1. En ambos casos, el sensor se debe colocar en una pared o muralla que esté orientada hacia la tronadura.



**Figura 6-1: Ubicación recomendada de los sensores para evaluar (a) el daño sobre una estructura, o (b) la molestia en los ocupantes**

La colocación adecuada de los sensores, sin importar si las mediciones se realizan en el interior o exterior, resulta ser crucial. Existen varios métodos de montaje, los cuales se aplican según la magnitud de las vibraciones y el tipo de superficie. Para vibraciones de baja magnitud se deberían usar estacas (en suelo blando) o cinta adhesiva doble. Dejar el geófonode forma libre sobre la superficie no se recomienda. Ahora, para vibraciones de alta magnitud existen diversas alternativas, como usar pernos, enterrar y cubrir el sensor o pegar el mismo a una superficie dura usando algún tipo de pegamento industrial (epoxy). Estas opciones se muestran en la figura 6-2.



**Figura 6-2: Alternativas recomendadas para el montaje de sensores en el caso de vibraciones de alta magnitud: (a) Enterrar y cubrir el sensor, (b) Pegarlo usando pegamento industrial y (c) usar pernos.**

Por otro lado, la figura 6-3 ilustra algunas prácticas que deben evitarse, como no clavar profundamente las estacas y pegar el sensor a roca suelta o concreto delgado. Tampoco es recomendable colocar el sensor cerca de postes, palos o cualquier objeto que pueda oscilar y contribuir al movimiento total.

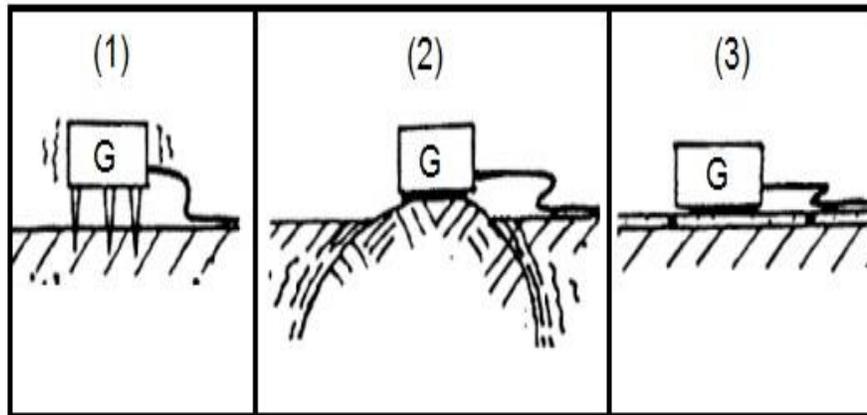


Figura 6-3: Prácticas que deben evitarse (1) No clavar lo suficiente las estacas (2) pegar el sensor a roca suelta y (3) pegar el sensor a concreto delgado.

La vibración en cualquier instante “t” queda completamente definida al medir las tres componentes del movimiento, esto es, longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z). La velocidad de partícula corresponde entonces, como ya sabemos, a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de estas componentes:

$$V = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (6.1)$$

La experiencia ha demostrado que la *Velocidad Pico de Partícula (VPP)*, definida como el máximo valor que alcanza la velocidad de partícula en un intervalo de tiempo, es el mejor descriptor para correlacionar magnitud de vibración y daño en estructuras. Debido a esto, el instrumento de medición o software de procesamiento debe ser capaz de indicar dicho parámetro.

Para la predicción de la magnitud de las vibraciones (velocidad de partícula) en tronaduras se recomienda el uso del modelo de distancia reducida de Devine, el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$V = K(D/Q^{1/2})^{-\alpha} \quad (6.1)$$

Donde K y  $\alpha$  son constantes adimensionales que se relacionan con las características geológicas del lugar donde se llevan a cabo las tronaduras. El factor  $(D/Q^{1/2})$  corresponde a la *distancia reducida cuadrática*, siendo D la distancia entre la tronadura y el receptor, y Q la carga instantánea máxima (MIC), esto es, la cantidad máxima de explosivo (en kilogramos) detonado en un intervalo de tiempo.

Para aplicar este modelo, primero se debe realizar una serie de tronaduras de pruebas, registrando la magnitud de las vibraciones (PPV) y la distancia reducida para cada una de ellas. Por lo general, se recomienda realizar entre 8 y 10 de estas tronaduras. Luego, es posible calcular los factores K y  $\alpha$  aplicando el método de mínimos cuadrados a los datos obtenidos\*. Con los factores K y  $\alpha$  determinados la expresión 6.1 queda completamente definida y es posible calcular la magnitud de la vibración para cualquier distancia y carga instantánea máxima (distancia reducida). Otra opción es, dados los rangos de los factores K y  $\alpha$ , escoger los valores que representen la peor situación posible.

Los datos registrados siempre muestran un grado de dispersión en relación al modelo. Esto no es raro y es común en todos los modelos basados en distancia reducida, debido principalmente a factores que afectan a la fuente, el camino de transmisión y al receptor. Se deberá indicar el intervalo de confianza usado, el cual no podrá ser inferior al 90%.

### 6.3 Control de los efectos sobre estructuras

---

\* El anexo F de este trabajo muestra un ejemplo de esta metodología.

A continuación, se proponen tres normativas para evaluar los efectos de vibraciones sobre estructuras, estas son: la norma alemana, la norma de suiza y la norma británica. Todas estas consideran estructuras poco sensibles a las vibraciones (construcciones reforzadas, como edificios industriales o comerciales) y estructuras de una sensibilidad normal (construcciones no reforzadas, como edificios residenciales o de oficinas). Las normas de Alemania y Suiza también consideran estructuras muy sensibles a las vibraciones (construcciones antiguas o monumentos históricos, como también construcciones modernas pero fabricadas con estilos o materiales antiguos).

Las tres normas expresan sus límites en función del parámetro velocidad pico de partícula (VPP), lo que implica que necesariamente se deben medir las tres componentes (longitudinal, transversal, vertical) del vector velocidad de partícula. Los límites propuestos en estas normativas evitan la aparición de daños de la menor categoría o de tipo leve (movimiento de objetos sueltos en muebles o mesas y la re-apertura de viejas grietas o la aparición de nuevas en materiales como el yeso).

La elección de alguna de estas normas recae sobre el encargado de realizar el estudio de impacto ambiental correspondiente. Es recomendable realizar inspecciones previas a las estructuras más sensibles identificadas como receptores, para de esta forma determinar el estado de las mismas antes del inicio de las operaciones y así hacer notar la existencia de grietas o fallas no conocidas por los interesados, las que posteriormente podrían haber sido atribuidas a las tronaduras del proyecto.

### 6.3.1 Propuesta n°1: Normativa Alemana (DIN 4150-3)

Los límites propuestos por esta norma, según tipo de estructura y rango de frecuencia se muestra en la tabla 6-1. La norma también incluye los límites recomendados para toda frecuencia (TF) en el piso superior (PS). La figura 6-4 muestra un gráfico con los límites ya señalados.

Tipo de edificación	VPP (mm/s)			
	Frecuencia (Hz)			PS
	< 10	10 – 50	50 - 100	TF
<i>Estructuras delicadas, sensibles a la vibración</i>	3	3 – 8	8 – 10	8
<i>Viviendas y edificios (construcciones residenciales)</i>	5	5 – 15	15 – 20	15
<i>Comercial e industrial (diseños robustos)</i>	20	20 – 40	40 – 50	40

Tabla 6-1: Límites de la propuesta n°1 (DIN 4150-3).

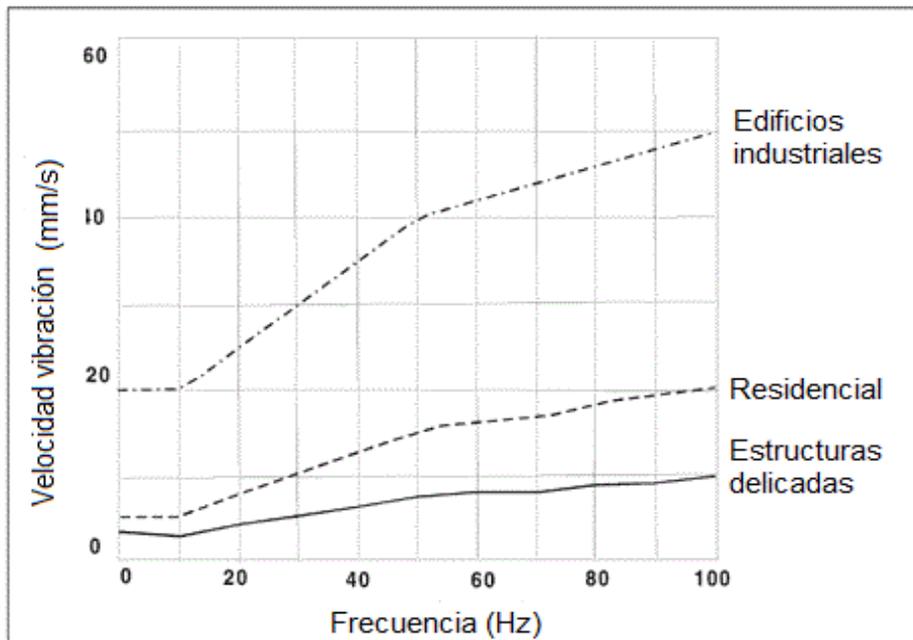


Figura 6-4: Gráfico con los límites de la propuesta n°1 (DIN 4150-3).

### 6.3.2 Propuesta n°2: Norma Suiza(SN 640 312<sup>a</sup>)

Los límites propuestos por esta norma, según el grado de susceptibilidad de la estructura y el rango de frecuencia se indican en la siguiente tabla:

Susceptibilidad de la estructura	VPP (mm/s)		
	Rango de frecuencia [Hz]		
	8 – 30	30 – 60	> 60
<i>susceptibilidad baja o muy baja</i>	30 – 45	40 – 60	60 – 90
<i>susceptibilidad normal</i>	15	20	30
<i>Susceptibilidad alta</i>	7 – 15	10 – 20	15 – 30

Tabla 6-2:Límites de la propuesta n°2 (SN 640 312a).

La norma no cubre eventos con vibraciones de frecuencias inferiores a 8 Hz, indicando que estos casos deben abordados de manera individual a través de estudios especializados. En la norma también se indica que la superación ocasional de estos límites en hasta un 30% de su valor solo conlleva un leve aumento en la probabilidad de daño, y que la aparición de fisuras (daño menor) solo es esperable cuando se superen en varias veces los valores indicados.

### 6.3.3 Propuesta n°3: Norma Británica (BS 7385 – 2)

Los límites propuestos por esta norma, según tipo de estructura y rango de frecuencia se muestra en la siguiente tabla:

tipo de edificio	VPP (mm/s)	
	4-15 Hz	> 15 Hz
<i>reforzados (estructuras comerciales e industriales de grandes dimensiones)</i>	50 (mm/s)	
<i>No reforzados (estructuras residenciales y comerciales pequeñas)</i>	15 (mm/s) a 4 Hz; 20 (mm/s) a 15 Hz	20 (mm/s) a 15 Hz incrementándose a 50 (mm/s) a 40 Hz

Tabla 6-3:Límites de la propuesta n°3 (BS 7385-2).

En la norma se establece que daños menores solo son posibles para vibraciones del doble de magnitud que las presentadas en la tabla 6-3, mientras que daños de tipo mayor solo son posibles cuando las vibraciones cuadriplican los valores ya señalados. También indica que edificios especialmente sensibles(difíciles de reparar) deben ser analizados caso por caso. En la figura 6-4 se muestra un gráfico con los límites establecidos en esta norma.

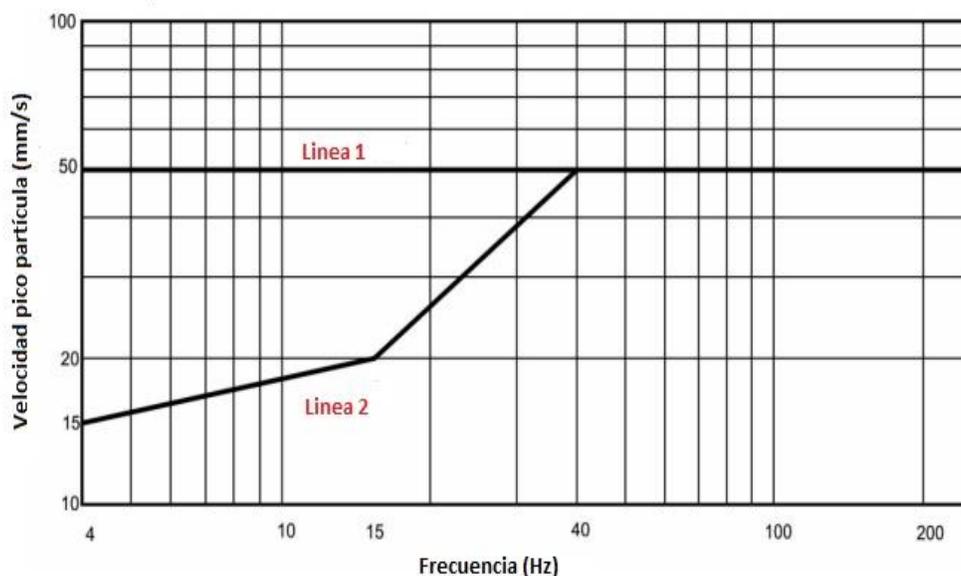


Figura 6-5: Grafico con los límites de la propuesta n°3 (BS 7385-2)

#### 6.4 Control de los efectos sobre personas.

Es importante señalar que existen muy pocos cuerpos legales(normas, reglamentos, recomendaciones, etc.) relacionados con el control de los efectos de las vibraciones sobre personas. Esto se debe, en parte, a lo compleja que es la respuesta humana a las vibraciones, ya que esta depende de varios factores (edad de la persona, estado psicológico, actividad que realiza al momento de percibir la vibración, etc.). Además, está el factor del ruido secundario que produce una vibración al excitar elementos de la estructura y que ciertamente puede influir en la respuesta de una persona. Es frecuente que, en situaciones que involucran zonas residenciales, se reciban quejas a pesar de que los niveles de vibración son levemente superiores a los umbrales de percepción.

A continuación, se presentan dos normativas para controlar los efectos de las vibraciones sobre personas, esta son: la norma británica y la norma alemana. La primera de estas establece límites en función de la velocidad pico partícula (VPP), mientras que la segunda hace uso de un descriptor particular. Ambas normas distinguen entre la jornada de día y la de noche.

Cabe señalar que la norma alemana, aparte de tener la ventaja de considerar la frecuencia de la vibración, establece que las mediciones deben realizarse dentro de la estructura, en el lugar preciso donde se esperan o se han producido reclamos. La norma británica, por otro lado, indica que las mediciones se deben realizar fuera de la estructura, sin embargo, los valores (externos) que establece como límites están orientados a fin de asegurar niveles internos de vibración que sean satisfactorios.

Al igual que en el caso del control de los efectos sobre estructuras, la elección de algunas de estas normas recae sobre el encargado de realizar los estudios pertinentes.

#### **6.4.1 Propuesta n°1: norma alemana(DIN 4150-2)**

Esta norma establece un método donde el primer paso es calcular un coeficiente denominado “KB” a través de la siguiente expresión:

$$KB = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right)}} \quad (6.3)$$

Aquí  $V_{m\acute{a}x}$  es la velocidad pico partícula (VPP) medida en mm/s,  $f$  es la frecuencia de la vibración medida en Hz y  $f_0$  es una frecuencia de referencia, equivalente a 5.6 Hz. Una vez calculado este valor se debe multiplicar por un factor de resonancia  $C_F$ , el cual toma un valor de 0.8 si se considera la resonancia de un edificio, y de 0.6 si no se considera. El resultado es el coeficiente  $KB_{Fm\acute{a}x}$ . Los límites planteados por esta norma están basados en el valor de dicho coeficiente y se indican en la tabla 6-4, considerando tipo de estructura y jornada (día-noche).

Tipo de locación	Limites $KB_{Fm\acute{a}x}$	
	Día	Noche
Edificios dedicados exclusivamente a actividades comerciales	6	0.6
Edificios dedicados principalmente a actividades comerciales	6	0.4
Edificios no dedicados a actividades comerciales ni tampoco considerados principalmente como residenciales	5	0.3
Edificios considerados exclusivamente o principalmente como residenciales	3	0.2
Edificios particularmente en necesidad de protección (hospitales, escuelas, etc.)	3	0.15

Tabla 6-4: Limites de la propuesta n°1(DIN 4150-2).

#### 6.4.2 Propuesta n°2: Norma británica (BS 6472-2)

Los limites propuestos por esta norma, según tipo de estructura, jornada del día considerando un máximo de tres tronaduras por día se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de estructura	Intervalo	VPP (mm/s)
<i>Residencial</i>	<i>Día</i>	<i>6-10</i>
	<i>Noche</i>	<i>2</i>
	<i>Otro</i>	<i>4.5</i>
<i>Oficina</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>14</i>
<i>Industrial</i>	<i>Cualquiera</i>	<i>14</i>

Tabla 6-5: Límites de la propuesta n°2 (BS 6472-2).

Para el caso que se realicen más de tres tronaduras por día la norma indica que se debe usar un factor “F” para reducir los límites señalados en la tabla 6-5. Este factor viene dado por la siguiente expresión:

$$F = 1.7N^{0.5}T^d$$

Donde N es el número de tronaduras por día y T es la duración típica de estas. Para estructuras con pisos de madera se tiene que  $d = 0.32$ , mientras que para el caso de pisos de concreto se tiene  $d = 1.22$ .

La norma hace hincapié en que doblar estos valores límites resultara en reacciones adversas por parte de la comunidad, mientras que cuadruplicarlos tendrá consecuencias muy significativas. La norma indica que los límites establecidos no deberían ser superados en más del 10% de las tronaduras y que ninguna de ellas debiera generar vibraciones que sobrepasen hasta en un 50% dichos valores.

## 6.5 Mitigación de impactos

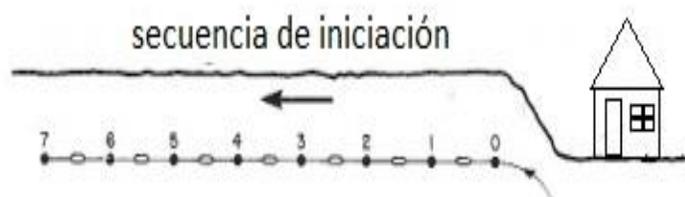
Si los resultados entregados por el modelo o por mediciones directas están por sobre los valores límites establecidos en la norma adoptada, se deben tomar medidas con el fin de asegurar la reducción de su magnitud. El objetivo debe ser la optimización de la tronadura, o sea, reducir el impacto sobre estructuras o personas sin reducir su eficiencia. Existen medidas desarrolladas a partir de muchos años de experiencia\*, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

- a) Reducir la carga instantánea máxima (MIC), ya sea disminuyendo la carga detonada en cada intervalo o reduciendo las dimensiones del pozo (longitud, diámetro o ambos). Las investigaciones han mostrado que la magnitud de la vibración es proporcional a la distancia reducida, la cual se define como la distancia entre la tronadura y el receptor dividida por la raíz cuadrada de la MIC. Así, para una distancia fija, reducir la MIC resultara en la disminución de la magnitud de las vibraciones.
- b) Seleccionar un tiempo de retardo entre columnas que evite la superposición de ondas. En la práctica, retardos de entre 5 y 9 ms pueden minimizar las vibraciones solo en el campo cercano a la tronadura. Al aumentar la distancia, un retardo de 9 ms entregara, por lo general, menores niveles de vibración, pero no los más bajos posibles. Evidentemente, el tiempo de retardo óptimo dependerá de variables específicas, pero tendra a estar entre los 17 y 50 ms.

---

\* El anexo D de este trabajo contiene los principales factores que controlan la magnitud de las vibraciones en tronaduras y el grado de influencia que posee c/u de ellos.

- Asegurar un adecuado burden y espaciamiento entre pozos, como también la correcta inclinación de estos últimos. Estas condiciones guardan relación con el óptimo uso de los explosivos, lo que ocurre cuando la energía disponible es usada eficientemente para romper y mover la roca. Cuando el burden es demasiado, o cuando la inclinación del pozo es escasa, la energía del explosivo no puede romper completamente la roca, por lo que esta es disipada a través del suelo en forma de vibración.
- Establecer el uso de tronaduras en horas específicas del día, que se acomoden a las condiciones locales. Naturalmente, las molestias son menores cuando la tronadura coincide con los periodos de mayor actividad de las personas. También es conveniente implementar una señal (sonora) de advertencia que indique el inicio de una faena a todos los potenciales receptores.
- Fijar una secuencia de iniciación tal que la detonación se aleje de estructuras sensibles, como se muestra en la figura 6-6. La factibilidad de esto dependerá, obviamente, de las condiciones locales.



**Figura 6-6: Ejemplo de secuencia de iniciación que ayuda a reducir el impacto sobre los receptores.**

Para un adecuado manejo y control de tronaduras es recomendable que se mantenga un registro de ellas\*. La información contenida en estos registros

\* El anexo G de este trabajo contiene ejemplos de este tipo de registros.

constituye la base para realizar mejoras en el diseño de las operaciones, además de servir para investigaciones más detalladas que puedan realizarse a futuro. Por otro lado, la información contenida en los mismos resulta crítica en la eventualidad de que se produzcan quejas o conflictos. Este tipo de registro debería contener, como mínimo, la locación y el diseño de la tronadura (número de pozos, diámetros, profundidades, espaciamientos, burden y tacos), tiempos de retardo, tipo y cantidad de explosivo y, naturalmente, la magnitud de las vibraciones registradas. También es conveniente indicar el tipo de clima presente durante la ejecución de la tronadura (despejado, nubosidad parcial, lluvias, etc.), la temperatura y la velocidad del viento.

## **Capítulo 7**

### **Propuesta de Guía para la evaluación del impacto ambiental del ruido generado en tronaduras,**

#### **7.1 Alcances**

Se sabe que las ondas de sobrepresión (ruido) pueden causar molestias en las personas e incluso daños en estructuras. La presente guía cubre los principales aspectos relacionados con la elaboración de un estudio de impacto ambiental para este contaminante, como la medición y predicción de sus niveles y la evaluación de sus efectos tanto en estructuras como en personas. La información presentada en esta guía está basada en las prácticas más consolidadas que se llevan a cabo en la actualidad, sin embargo, las autoridades nacionales pertinentes pueden requerir o aprobar otros procedimientos con el fin de abordar una situación específica.

#### **7.2 Medición y predicción**

El primer punto que se debe establecer es el área de influencia del proyecto. Debido a que los niveles de ruido producidos por una tronadura dependen de muchos factores, resulta imposible definir de antemano una distancia específica, pero por lo general se acostumbra considerar un radio de 1000 metros en torno a la ubicación de la tronadura. Sin embargo, dadas ciertas condiciones, una onda de sobrepresión puede llegar a percibirse a unos 5 km de distancia (en una dirección particular). De esta forma, el área de influencia se debería definir para cada caso en base a un valor máximo deseado (indicado, por ejemplo, en una norma), el modelo de propagación y el diseño contemplado para las tronaduras. Una vez definida el área de influencia, se deben seleccionar los receptores correspondientes, como edificios de tipo residencial, recintos educacionales, edificios de oficina, hospitales, recintos industriales, etc. También se deben considerar estructuras sensibles, como edificios o monumentos históricos.

En las pocas normas internacionales que existen en relación al ruido producido por tronaduras se indican los diversos requisitos operacionales que debe cumplir el instrumento de medición, el sonómetro. Estos requisitos varían según cada norma, pero en términos generales se considera que el sonómetro debería ser capaz de responder en el rango de frecuencia 2–250 Hz (registros con frecuencias inferiores a 2 Hz pueden ser distorsionados por cambios de presión muy leves), medir en escala lineal (ponderación Z) y registrar el nivel Peak de presión sonora.

En relación a la instalación del sonómetro, se recomienda colocarlo a lo menos un metro sobre el nivel del suelo, y a tres metros alejado de las paredes del edificio o de algún muro, para así evitar posibles reflexiones. El uso de una pantalla o escudo para el viento depende de las circunstancias y debe ser colocada según la especificaciones correspondientes.

Por lo general, para calcular la sobrepresión (P) generada por una tronadura se usa la reducción de raíz cúbica, según la siguiente expresión:

$$P = M(D/Q^{1/3})^{-N} \quad (7.1)$$

Donde M y N, al igual que en los otros modelos de distancia reducida, son constantes relacionadas al lugar donde se lleva a cabo la tronadura. El factor  $(D/Q^{1/3})$  corresponde a la *distancia reducida cubica*, siendo D la distancia entre la tronadura y el receptor, y Q la carga instantánea máxima (MIC). Para aplicar este modelo primero se deben realizar una serie de tronaduras de pruebas, registrando el nivel de sobrepresión y la distancia reducida para cada una de ellas. Por lo general, se recomienda realizar entre 8 y 10 de estas tronaduras. Luego, es posible calcular los factores M y N aplicando el método de mínimos cuadrados a los datos registrados\*. Con estos factores determinados la expresión 7.1 queda completamente definida. Otra alternativa es, dados los rangos de los factores M y N, escoger los valores que representen la peor situación posible.

---

\*El anexo F de este trabajo muestra un ejemplo de esta metodología.

La expresión 7.1 se puede expresar en términos de decibeles (dB) considerando que:

$$\text{nivel de ruido (dB)} = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (7.2)$$

Donde P es el valor de la sobrepresión (ec 7.1) y P<sub>0</sub> es una presión de referencia equivalente a 20 µPa. Generalmente, las mediciones muestran un alto grado de dispersión en relación a los resultados entregados por el modelo. Se cree que esto obedece, principalmente, a que este no considera de forma completamente adecuada factores meteorológicos que cambian constantemente (temperatura, humedad, velocidad del viento, etc.). Debido a esto, se recomienda establecer una corrección (en decibeles) para el modelo en base a los registros de las tronaduras de prueba realizadas, comparando los valores medidos con los resultados entregados por dicho modelo.

Por otro lado, si se recurre al módulo de algún software es importante asegurarse que su metodología de modelación no esté basada en la norma ISO 9613, ya que en sus alcances esta norma indica claramente que no es aplicable a “*ondas explosivas originadas en la minería, faenas militares y actividades similares*”. En esta línea, encontramos el modelo desarrollado por la consultora australiana Terrock\*, el cual cumple con la condición señalada, además de exhibir buenos resultados en su aplicación en una serie de proyectos llevados a cabo en Australia durante los últimos años.

### **7.3 Control de los efectos sobre estructuras y personas.**

En relación al control de los efectos del ruido sobre estructuras se puede establecer, primero, que los niveles de ruido producidos en la mayoría de los trabajos que involucran el uso de tronaduras no son suficientes como para provocar daños de tipo mayor. A lo sumo, las ondas de sobrepresión pueden generar daños de tipo menor, como la rotura de vidrios, aunque es muy raro que esto suceda. Se recomienda usar el límite de 133 *dB(L) peak*, establecido tanto por la norma americana como por la norma australiana.

---

\*<http://terrock.com.au/index.php>

Ahora corresponde abordar el control de los efectos del ruido sobre personas. Al igual que en el caso de las estructuras, un daño de carácter severo resulta muy poco probable considerando los niveles de ruido generados habitualmente por tronaduras. En este caso se recomienda adoptar los límites establecidos en la norma australiana, la cual distingue entre sitios sensitivos (edificios residenciales, escuelas, hospitales, etc.) y sitios no sensitivos (recintos industriales, locales de comercio, etc.) En sitios sensitivos, y con operaciones que duren más de un año (o que impliquen más de 20 tronaduras), se recomienda un nivel de 115 dB(L) peak como límite para hasta el 95% de las tronaduras, y un límite máximo de 120 dB(L) peak para todas ellas. Para operaciones que duren menos de un año (o que impliquen menos de 20 tronaduras) se recomienda un nivel de 120 dB(L) peak como límite para el 95 % de las tronaduras, y un límite máximo de 125 dB(L) peak para todas ellas. Para sitios no sensitivos se recomienda un nivel máximo de 125 dB(L) peak, independiente de la duración de las faenas.

#### **7.4 Mitigación de impactos**

Si los resultados entregados por el modelo o por mediciones directas están por sobre los valores límites establecidos en la norma adoptada, se deben tomar medidas con el fin de asegurar la reducción de su magnitud. El objetivo debe ser optimizar la operación, o sea, reducir el impacto sobre estructuras o personas sin reducir su eficiencia. Existen medidas desarrolladas a partir de muchos años de experiencia\*, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

- a) Reducir la carga instantánea máxima (MIC), ya sea disminuyendo la carga detonada en cada intervalo o reduciendo las dimensiones del pozo (longitud, diámetro o ambos). Las investigaciones han mostrado que el nivel de sobrepresión es proporcional a la distancia reducida, la cual se define como el cociente entre la distancia al receptor y la raíz cubica de la MIC. Así, para una distancia fija, reducir la MIC resultara en la

---

\* El anexo D de este trabajo contiene los principales factores que controlan la magnitud de las vibraciones en tronaduras y el grado de influencia que posee c/u de ellos.

disminución de los niveles de sobrepresión. Sin embargo, dado que en este caso se calcula la raíz cubica de este parámetro, el efecto de su reducción será menor comparado con el caso de las vibraciones.

- b) Evitar la exposición del cordón detonante. Para este propósito se lo debe cubrir con un material adecuado, como arena fina. Este problema puede evitarse al usar un sistema de iniciación no eléctrico (Nonel).
- c) Asegurarse que tanto las dimensiones como el material de taco sean los adecuados. Esto garantiza el adecuado confinamiento de los gases producidos en la detonación y, por lo tanto, un eficiente uso de la energía.
- d) Evitar la ventilación o salida de gases a través de puntos débiles en el macizo rocoso. Para esto propóitose debe realizar una adecuada revisión de la cara libre del macizo, para buscar dichas debilidades y taparlas.
- e) Ejecutar las tronaduras bajo condiciones atmosféricas favorables. Para evitar los efectos amplificadores de una inversión térmica las tronaduras deberían realizarse entre 09:00 y 17:00 hrs. Por otro lado, para evitar efectos similares provocados por el viento, las tronaduras no deberían realizarse con vientos sobre los 40 km/h y que soplan en la dirección de posibles receptores.
- f) Establecer el uso de tronaduras en horas específicas del día, que se acomoden a las condiciones locales. Naturalmente, las molestias serán menores cuando la tronadura coincida con los periodos de mayor actividad de las personas. También es conveniente implementar una señal (sonora) de advertencia que indique el inicio de una faena a todos los potenciales receptores.

Para un adecuado manejo y control de tronaduras es recomendable que se mantenga un registro de ellas\*. La información contenida en estos registros constituye la base para realizar mejoras en el diseño de las operaciones, además de servir para investigaciones más detalladas que puedan realizarse a futuro. Por otro lado, la información contenida en los mismos resulta crítica en la eventualidad de que se produzcan quejas o conflictos. Este tipo de registro debería contener, como mínimo, la locación y el diseño de la tronadura (número de pozos, diámetros, profundidades, espaciamientos, burden y tacos), tiempos de retardo, tipo y cantidad de explosivo y, naturalmente, los niveles de sobrepresión registrados. También es conveniente indicar el tipo de clima presente durante la ejecución de la tronadura (despejado, nubosidad parcial, lluvias, etc.), la temperatura y la velocidad del viento.

---

\* El anexo G de este trabajo contiene ejemplos de este tipo de registros.

## Capítulo 8

### Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo en relación al objetivo general y los objetivos específicos establecidos en el primer capítulo.

- El primer objetivo específico que se desarrollo fue el análisis de los aspectos teóricos relacionados con la generación y transmisión del ruido y vibración generados en tronaduras. Se identificaron los tipos de ondas que componen una vibración como tal (ondas de cuerpo y de superficie), sus principales parámetros y la forma en que estas se propagan. Por otro lado, se establecieron las principales características de las onda de sobrepresión generada en unatronadura, como también las fuentes donde estas originan (pulso de presión de roca (PPR), pulso de presión de aire (PPA), pulso de liberación de gas (PLG) y pulso de liberación del taco y derivados (PLT)). El análisis realizado también permitió establecer los principales factores que determinan la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión (diseño de la tronadura, tipo y cantidad de explosivo, tipo de taco, método de inicio y disparo, distancia entre la tronadura y el receptor, topografía, propiedades geológicas del terreno y las condiciones meteorológicas). En su conjunto, este análisis permitió tener una visión más detallada del problema que se estaba abordando.
- El segundo objetivo específico abordado fue el estudio de los aspectos prácticos relacionados con la medición del ruido y vibración generados en una tronadura. Primero se analizaron las características generales de cualquier sistema diseñado para medir ruido o vibraciones. Después se caracterizaron los principales instrumentos para medir vibraciones (el geófono y el acelerómetro), como también el instrumento para medir ruido (sonómetro). Una vez establecidos estos puntos, se describieron las diferentes opciones para ubicar los sensores y los métodos de montaje para los mismos, además de algunas prácticas que deben evitarse. El análisis realizado permitió seleccionar, en relación a la propuesta de guía, los

instrumentos a usar según tipo de medición, las características técnicas de dichos instrumentos, como también su ubicación y los mejores métodos para su montaje.

- El tercer objetivo específico, el análisis de modelos predictivos, se desarrolló considerando primero los modelos para vibraciones y luego los modelos para ruido. Para vibraciones, se describieron los modelos más conocidos y usados a nivel internacional (Devine, Langefors & Kilhstrom, Ambraseys & Hendron y Ghosh & Daeman), como también una alternativa que ha venido cobrando fuerza durante los últimos años, esto es, el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA). Por otro lado, para ruido, se describió un modelo disponible que es muy similar a los usados para vibraciones, pero se hizo notar su bajo rendimiento y que su aplicación debe, por lo tanto, incluir correcciones. También se describió el modelo presentado por la consultora australiana Terrock, el cual considera muchas más variables que el modelo ya mencionado y ha venido siendo aplicado en Australia desde hace varias años. Por último, se indican algunos softwares de medición que sean aplicados para modelar el ruido producido por tronaduras. El análisis llevado a cabo permitió seleccionar para la propuesta de guía el modelo más factible de aplicar, tanto para ruido como para vibraciones, considerando aspectos económicos y técnicos.
- Para el cuarto objetivo específico, el análisis de las normativas internacionales para el control de los efectos de ruido y vibraciones sobre estructuras y personas, se comenzó identificando los criterios para clasificar y estimar el daño sobre estructuras. Para vibraciones, se consideraron ocho normativas para el control de sus efectos sobre estructuras, y tres para el control de sus efectos sobre personas. En base a factores como el tipo de estructura considerada, el parámetro a partir del cual se establecen límites y el rango de frecuencias cubierto, se seleccionaron tres normativas para el control de los efectos sobre estructuras (alemana, suiza y británica). Por otro lado, para el control de los efectos sobre personas se seleccionaron prácticamente las dos únicas normas existentes (alemana y británica).

Para ruido, se indicaron algunas de las recomendaciones existentes para el control de sus efectos sobre estructuras, seleccionando como límite un valor común establecido en dichas recomendaciones. En relación al control de sus efectos sobre personas se consideraron tres normativas, seleccionando entre ellas la australiana, debido a que resultó ser la más completa.

- Para el quinto y último objetivo específico, esto es, buscar y describir métodos para reducir el impacto del ruido y la vibración sobre personas y/o estructuras, se recurrió principalmente a manuales o boletines de buenas prácticas para minería. En estos documentos aparecen una serie de prácticas asimiladas a través de muchos años de experiencia en tronaduras, las cuales varían desde lo muy simple (señales de advertencia) hasta lo complejo (diseño mismo de la tronadura). Estas prácticas fueron incorporadas en la sección “mitigación de impactos” de las guías propuestas.
- Finalmente, se abordó al objetivo general planteado al comienzo de este trabajo, esto es, la elaboración de una guía para evaluar el impacto ambiental del ruido y la vibración generados por una tronadura. Se consideró que desarrollar una guía para cada uno de estos contaminantes era lo óptimo. Estas guías están construidas a partir de las conclusiones de los capítulos 3, 4 y 5, e incluyen los siguientes puntos: alcances, medición y predicción, control de los efectos sobre estructuras y personas, y mitigación de impactos.

## Bibliografía

- Adhikari, G.R et al; “Role of blast design parameters on ground vibration and correlation of vibration levels to blasting damage to surface structures”; National institute of rock mechanics; 2005.
- Bender, Wesley L; “Understanding blast vibration and airblast, their causes and their damage potencial”; Golden west workshops, International society of explosives engineers; 2006.
- Benjumea, Juan M; “Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la ingeniería civil”; Santiago de Cali, Universidad del Valle Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Civil y Geomántica; 2003.
- Bermingham, Liam; “Shielding and channelling: The influence of topography on air overpressure from quarry blasting”; 2013.
- Bhandari, Sushi; “Engineering rock blasting operations”; A.A.Balkema Publishers, Rotterdam; 1997.
- Birch, William et al; “reducing the environmental effect of aggregate quarrying\_dust, noise and vibration”; University of Leeds & University of Nottingham Research project funded through Defra’s Aggregates Levy Sustainability Fund; 2007.
- Birch, William J & White, Toby; “Full scale investigation into the origins and prediction of air overpressure from quarry blasting”; University of Leeds, Energy & Resources Research Institute; 2011.
- Blastronics; “Review of Queensland environmental protection policy relating to overpressure from blasting”; Discussion Paper, Extractive industries association; 1999,
- Crocker, Malcom J; “Handbook of noise and vibration control”; John Wiley & Sons Inc, New Jersey; 2007.
- Dowding, charles; “Blast vibration monitoring and control”; 1985.
- Elias, Patrick & Villot, Michael; “Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to Vibration”; Railway induced vibration abatement solutions (Rivas), collaborative Project; 2011.
- Empresa nacional de explosivos (ENAEX); “Manual de tronadura”.
- EXSA; “Manual práctico de voladura”.
- Garrido, Andrés A; “Diagnostico y optimización de disparos en desarrollo horizontal en mina el teniente”; Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Santiago, Universidad de chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería de minas; 2007.
- Henríquez, Humberto; “Curso: perforación y tronadura”; Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Minas; 2008.

- Hudson, Lee et al; “Noise, vibration and airblast control”; Booklet series on best practices regarding environmental management in mining; 1998.
- Jimeno, Carlos L et al; “Manual de perforación y voladura de rocas”; Escuela Técnica Superior de Ingenieros Minas; 2003.
- Khandelwal, Manoj; “Application of an Expert System for the Assessment of Blast Vibration”; Journal of Geotechnical and Geological Engineering, vol 30, pág 205–217; 2011.
- Khandelwal, Manoj & Singh T.N; “Evaluation of blast induced ground vibration predictors”; Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol 27, pág 116-125; 2007.
- Kostic, Srdan et al; “Predictions of experimentally observed stochastic ground vibrations induced by blasting”; PLOS ONE, vol 8, issue 12; 2013.
- Mohamed, Mostafa T; “Vibration control”; Egypt, Assiut University, Faculty of Engineering, Mining and Metallurgical Department; 2010.
- Monjezi, Masoud et al; “Evaluation and prediction of blast induced ground vibration at Shur river dam”; Journal of Neural Computing and Applications, vol 22, pág 1637–1643; 2012.
- Pascual de Blas, Jesus A; “Problemática de las vibraciones en las voladuras. Medición, control y regulación legal”; 2002.
- Richards, Alan B; “Prediction and control from air overpressure from blasting in Hong Kong”; 2008.
- Scherpenisse, Carlos R et al; “Estrategia a la problemática ambiental de vibraciones por tronadura en operaciones mineras”; Geoblast S.A, Santiago, Chile; 2008.
- Scherpenisse, Carlos R, et al; “Estrategia para control y predicción de las vibraciones generadas por voladura sobre el poblado Hualgayoc-Cajamarca, Perú”; Geoblast S.A, Santiago, Chile; 2013.
- Scherpenisse, Carlos R & Humeres, Ignacio; “Diseño de voladuras para minimizar el impacto ambiental en infraestructura y personas”; Geoblast S.A, Santiago, Chile; 2010.
- Siskind D.E et al; “report of investigations 8507: structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting”; 1980.
- Valencia, Daniel R et al; “Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia”; Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, vol 7; 2007.
- Verma, A.K & Singh T.N; “Comparative study of cognitive systems for ground vibration measurements”; Journal of Neural Computing and Applications, vol 22, pág 341-350; 2012.

- Australia;ANZEC (Australian and New Zealand Environment Council); “Technical Basis for Guidelines to minimise annoyance due to Blasting Overpressure and Ground Vibration”; 1990.
- Australia;“AS 2187 part 2: Use of explosives”; 2006.
- Alemania; “DIN 4150 part 2: effects of vibration on persons in buildings”; 1999.
- Alemania; “DIN 4150 part 3: effects of vibration on structures”. 1999.
- Escocia; “PAN-50: Controlling the environmental effects of surface mineral workings”; 1996.
- España; “UNE 22- 381: Control de vibraciones producidas por voladuras”; 1993.
- Gran Bretaña; “BS 6472 Part 2: Guide to evaluation of human exposure to blast induced vibration in buildings”; 2008.
- Gran Bretaña; “BS 7385 Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration in buildings”; 1993.
- Gran Bretaña; “BS 7385(ISO 4866) Part 1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings”;1990.
- International Organization for Standardization;“ISO 5348: Mechanical mounting of accelerometers”; 1998.
- Suecia; “SS 460 48 66: Vibration And Shock - Guidance Levels For Blasting-Induced Vibration In Buildings”; 1991.
- Suiza;“SN 640 312a: vibration effects on buildings”; 1992.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – Listado de los proyectos analizados(ingresados al SEIA en el periodo 2008-2013)

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
1	<i>Santo domingo</i>	III	2013	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
2	<i>Nueva línea 2x500 kv charrúa-ancoa: tendido del primer conductor</i>	Inter	2013	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
3	<i>Candelaria 2030</i>	III	2013	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
4	<i>Dominga</i>	IV	2013	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SPreAD-GIS, v 9.3	SI (USBM)	Modelo de Devine
5	<i>Continuidad operacional compañía minera cerro colorado</i>	I	2013	SI	SI (AS 2187-2)	Predictor Lima 7810, v 8.11	SI (criterio particular)	Modelo de Devine

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
6	<i>Línea de Transmisión Eléctrica S/E Punta Alcalde – S/E Maitencillo</i>	III	2013	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
7	<i>RT sulfuros</i>	II	2013	SI	SI (AS 2187-2)	Predictor Lima 7810, v 8.11	SI (Transit Noise and Vibration Impact Assesment (FTA))	X
8	<i>El Espino</i>	IV	2013	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SoundPlan, v 7.1	X	X
9	<i>Cerro Blanco</i>	III	2013	SI	NO	Predictor Lima 7810, v 8.11	SI (criterio particular)	X
10	<i>Sondajes de prospección Paguanta</i>	I	2013	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
11	<i>Aumento capacidad de beneficio</i>	VI	2013	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
12	<i>Expansión Andina 244</i>	Inter	2013	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
13	<i>Extracción de puzolana</i>	RM	2012	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
14	<i>Modificación Acueducto Proyecto Sierra Gorda</i>	II	2012	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
15	<i>Óxidos Encuentro</i>	II	2012	SI	SI (Measurement Procedures Part 910; Title 35: Environmental Protection; Subtitle H: noise)	SoundPlan, v 7.1	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
16	<i>Diego de Almagro</i>	III	2012	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
17	<i>Reapertura Operación Agua de la Falda</i>	III	2012	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
18	<i>Explotación Minera Oso Negro</i>	III	2012	SI	SI (AS 2187-2)	Predictor Lima 7810, v 8.11	SI (criterio particular)	Modelo de Devine
19	<i>Proyecto minero Volcán</i>	III	2012	SI	SI (DS 146)	X	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Langefors y Kihlstrom
20	<i>Regularización de Cerro Negro</i>	V	2012	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
21	<i>Ampliación Pampa Blanca</i>	II	2012	SI	NO	X	NO	X
22	<i>Embalse chironta</i>	XV	2012	SI	NO	X	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
23	<i>Arqueros</i>	III	2011	SI	NO	X	NO	X
24	<i>Quetena</i>	II	2011	SI	SI (AS 2187-2)	MERA, v 1.4	SI (Transit Noise and Vibration Impact Assesment (FTA))	X
25	<i>MANGANESO LOS PUMAS</i>	XV	2011	SI	SI (DS 146)	MERA, v 1.4	SI (USBM)	Modelo particular
26	<i>OPTIMIZACIÓN PROYECTO MINERO CERRO CASALE</i>	III	2011	SI	SI (Código de Regulaciones Federales (CFR), Título 30 - Parte 816)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
27	<i>Reinicio y Expansión Proyecto Lobo Marte</i>	III	2011	SI	SI (Código de Regulaciones Federales (CFR), Título 30 - Parte 816)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
28	<i>Extensión de la Costanera Norte entre el Puente La Dehesa y la Calle Padre Arteaga</i>	RM	2011	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
29	<i>Embalse Valle hermoso</i>	IV	2011	SI	NO	X	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
30	<i>Solución Pasivos Ambientales y Reactivación Mina Montecristo y Planta Santo Domingo</i>	II	2010	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
31	<i>Antucoya</i>	II	2010	SI	SI (DS 146)	X	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Langefors y Kihlstrom
32	<i>Ampliación Mina Jilguero</i>	III	2010	SI	NO	X	NO	X
33	<i>Planta de recuperación de cobre y molibdeno desde relaves</i>	RM	2010	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
34	<i>Depósito de Relaves en Pasta Sector 5</i>	III	2010	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
35	<i>Sierra Gorda</i>	II	2010	SI	SI (Código de Regulaciones Federales (CFR), Título 30 - Parte 816)	SoundPlan, v 7.1	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
36	<i>Nuevo Nivel Mina (el teniente)</i>	INTER	2010	SI	NO	X	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
37	<i>Mina Invierno</i>	XII	2010	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
38	<i>Continuidad Operativa Sustentable Mina El Soldado</i>	V	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
39	<i>Zona de Mina Pampa Blanca</i>	II	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
40	<i>Ampliación y Mejoras Operacionales en Mina Los Colorados</i>	III	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
41	<i>Modificaciones Faena Minera Zaldívar</i>	II	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
42	<i>Interconexión Embalse El Yeso Acueducto Laguna Negra</i>	RM	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
43	<i>TRANQUE DE RELAVES HUMO CORRAL</i>	IV	2009	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo ?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
44	<i>Embalse Chacrillas</i>	V	2009	SI	NO	X	NO	X
45	<i>El Morro</i>	III	2008	SI	SI (DS 146)	SoundPlan, v 6.3	SI (DIN 4150-3)	Modelo de Devine
46	<i>Proyecto Minero Tres Valles</i>	IV	2008	SI	NO	X	SI (USBM)	Modelo de Devine
47	<i>Proyecto Caserones</i>	III	2008	SI	SI (DS 146)	SoundPlan, v 6.3	NO	X
48	<i>Ampliación de Capacidad de Extracción y Procesamiento de Mineral Sulfurado de Minera Escondida</i>	II	2008	SI	NO	X	NO	X
49	<i>PAMPA HERMOSA</i>	INTER	2008	SI	SI (DS 146)	SoundPlan, v 6.3	NO	X
50	<i>Proyecto Minero Algorta</i>	II	2008	SI	SI (DS 146)	SoundPlan, v 6.3	NO	X
51	<i>Proyecto Minero Puquíos</i>	IV	2008	SI	NO	X	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

n°	Proyecto	Región	Año de ingreso	Uso de tronaduras?	Se evalúan los ruidos producidos por una tronaduras?, cómo ?	Predicción del ruido producido por tronaduras	Se evalúan las vibraciones producidas por tronaduras?, cómo?	Predicción de las vibraciones producidas por tronaduras
52	<i>Aumento Capacidad de Tratamiento y Reducción de Emisiones en la Planta Cerrillos, de COEMIN S.A.</i>	III	2008	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
53	<i>Suministro Complementario de Agua Desalinizada para Minera Escondida</i>	II	2008	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
54	<i>Proyecto Central Hidroeléctrica Angostura PCH-Angostura</i>	VIII	2008	SI	NO	X	NO	X
55	<i>Central Hidroeléctrica San Andrés</i>	VI	2008	NO (solo considera ruidos y vibraciones producidos faenas de construcción y vehículos)	X	X	X	X
56	<i>Modificación Plan Minero 2007-2010 ANDACOLLO ORO</i>	IV	2008	SI	NO	X	NO	X
57	<i>Cerro Negro Norte</i>	III	2008	SI	NO	X	NO	X

**Tabla A-1: Listado de los proyectos analizados.**

## **ANEXO B - Propiedades de los explosivos.**

Un explosivo se define como un compuesto (o mezcla de ellos) que al ser excitado mediante calor, presión o algún otro método, libera rápidamente una gran cantidad de energía, generando en poco tiempo presiones y temperaturas muy elevadas. Resulta muy importante conocer las propiedades de los explosivos para, entre otras cosas, asegurar que estos sean utilizados de forma correcta. Las principales propiedades de un explosivo son su fuerza o potencia, velocidad de detonación, densidad específica, presión de detonación, sensibilidad, resistencia al agua, balance de oxígeno y humos. A continuación se realiza una breve descripción de c/u de estas propiedades.

### **B.1 Fuerza o potencia**

Representa la capacidad que tiene un explosivo, en relación a un explosivo de referencia (nitroglicerina) para realizar un trabajo (fracturar, desplazar) sobre un medio. Su valor se establece a través de una prueba que mide la expansión de una cavidad cilíndrica producto de la detonación de una cierta cantidad del explosivo en cuestión. La expansión originada por el explosivo bajo estudio se compara con la producida por la misma cantidad de un explosivo patrón, una mezcla de nitroglicerina y nitrocelulosa. La fuerza del explosivo se puede expresar entonces como un porcentaje. Así por ejemplo, un explosivo X tendrá una fuerza del 60 % si el volumen de expansión que genera es un 60 % del que genero el explosivo patrón (100%). La fuerza de un explosivo también se puede expresar simplemente indicando, en  $\text{cm}^3$ , la expansión que provoco en la cavidad cilíndrica.

### **B.2 Velocidad de detonación (VOD)**

Es la velocidad con la que la reacción química se propaga, durante la detonación, a través de toda la columna de explosivo y es, por lo tanto, el parámetro que define el ritmo de liberación de la energía. Depende, entre otras cosas, de la densidad del explosivo, del tamaño de las partículas y del grado de confinamiento. Al aumentar el confinamiento o la densidad del explosivo la VOD también aumenta. Hay que señalar que la densidad solo puede aumentar hasta un valor

crítico, después del cual el explosivo se vuelve insensible al cebo. Reducir el tamaño de las partículas también implica una mayor VOD. Un explosivo no confinado alcanza velocidades de detonación 20 o 30% menores a las de los explosivos confinados. Para explosivos confinados los valores de VOD están en el rango 1800 – 8000 (m/s). Este parámetro se determina usando un cordón detonante de velocidad conocida o a través de la apertura y cierre de un circuito eléctrico controlado por un cronógrafo electrónico.

### **B.3 Densidad específica**

Se refiere a la masa de explosivo por unidad de volumen y puede expresarse simplemente como densidad ( $\text{gr/cm}^3$ ), gravedad específica (en relación a  $1\text{g/cm}^3$  de agua a  $4^\circ\text{C}$  y 1 atm) o densidad de carga (cantidad de explosivo por unidad de longitud del pozo). Depende, principalmente, de la naturaleza y dimensiones de los componentes del explosivo. Como ya se indicó antes, hay una relación directa entre densidad y velocidad de detonación, por lo que si desea controlar el daño sobre un medio es recomendable usar un explosivo de baja densidad. Por otro lado, una alta densidad implica poca permeabilidad, lo que resulta muy útil en zonas de alta humedad. La densidad de los explosivos industriales varía entre 0.5 y  $1.8 (\text{gr/cm}^3)$

### **B.4 Presión de detonación**

Se refiere a la sobrepresión generada por el paso de la onda de choque. Depende principalmente de la velocidad de detonación y la densidad del explosivo. La relación entre la velocidad y la presión de detonación es directa, o sea, al aumentar la velocidad aumenta la presión. Esto significa que este parámetro también se relaciona con la energía cinética generada por la onda de choque y así se vuelve un buen indicador de la capacidad que tiene el explosivo para fracturar la roca. El valor de la presión de detonación para explosivos comerciales varía entre 1000 y 12000 (MPa).

## **B.5 Sensibilidad**

Se refiere a la facilidad para iniciar la detonación del explosivo, o sea, el mínimo de energía necesaria para iniciar la reacción. Depende, entre otras cosas, de la composición molecular del explosivo, su grado de confinamiento, su densidad y temperatura. Existen varios factores externos que pueden provocar la iniciación (intencional o no) de un explosivo o, al contrario, desensibilizarlos progresivamente. Entre estos factores tenemos: impactos, temperatura (calor y frío extremos), electricidad y humedad. La sensibilidad se determina usando fulminantes con diferentes proporciones de fulminato de mercurio y clorato de potasio.

## **B.6 Resistencia al agua**

Es la propiedad que tiene un explosivo de no perder su sensibilidad y eficacia al estar en contacto con el agua. Se expresa como el tiempo, medido en horas, que un explosivo puede estar sumergido en agua y aun retener su capacidad de detonación. Por lo general, la escala para medir la resistencia al agua se divide en nula (0 hr), limitada (1 hr), regular (3 hr), buena (5 hr), muy buena (7 hr) y excelente (> 15 hr). Los explosivos con una alta densidad tienen mejor resistencia al agua que los de baja densidad. Esta propiedad varía según la composición del explosivo y el tipo de envase que se use para colocarlos.

## **B.7 Balance de oxígeno**

Se refiere a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente los productos de una reacción. Se expresa como porcentaje según exista exceso (+) o deficiencia (-) de oxígeno en la mezcla. Un balance positivo implica que la mezcla genera un exceso de oxígeno al explotar y que todos los compuestos están completamente oxidados. En esta situación se pueden generar gases nitrosos ( $N_xO_y$ ), muy tóxicos. Por otro lado, un balance negativo significa que la mezcla no contiene suficiente oxígeno y que algunos compuestos no se oxidan completamente. En este caso, por ejemplo, el carbono no se oxida en su totalidad y se produce monóxido de carbono.

Un balance nulo implica que la mezcla tiene la cantidad exacta de oxígeno para oxidar sus compuestos, obteniendo así la máxima cantidad de energía o estado más explosivo. Los márgenes de seguridad estipulan por lo general un balance de oxígeno entre +2 y +5 como tope.

## **B.8 Humos**

La detonación de cualquier explosivo produce polvo, vapor de agua, óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de carbono ( $\text{CO}_x$ ) y gases sulfurosos. Algunos de estos resultan ser tóxicos o incluso letales y son llamados “humos”. El monóxido de carbono y el dióxido de nitrógeno están entre los humos más recurrentes. Debido a los potenciales efectos adversos que estos humos pueden tener sobre los trabajadores se han establecido normas para su manejo. La oficina de minas de Estados Unidos (USBM) considera 3 clases de explosivos según el volumen de humos producidos. La primera categoría de explosivos genera un volumen de humos en el rango  $0 - 4.5 \text{ dm}^3$ , la segunda categoría en el rango  $4.5 - 9.3 \text{ dm}^3$  y la tercera en el rango  $9.3 - 18.9 \text{ dm}^3$ . Esta clasificación implica que los explosivos de primera categoría pueden ser usados en minas subterráneas, mientras que los de segunda categoría solo pueden ser usados en faenas que garanticen una buena ventilación. Los explosivos de tercera categoría solo pueden ser usados en la superficie. La generación y permanencia de los humos depende, entre otras cosas, del tipo de explosivo, su balance de oxígeno y del tipo de ventilación en el lugar de la detonación (ductos, extractores de aire, etc.)

## ANEXO C - Principales tipos de explosivos

Un explosivo está formado por oxidantes, combustible, transportadores de oxígeno, antiácidos y absorbentes. Normalmente, los explosivos comerciales usan nitratos como oxidantes, mientras que los combustibles más frecuentes incluyen carbono (C) e hidrogeno (H), ya que estos, al reaccionar con el oxígeno, liberan grandes cantidades de energía. Un transportador de oxígeno asegura la oxidación completa de un compuesto, factor clave para su eficiencia. La función de un antiácido es estabilizar explosivos almacenados, mientras que el absorbente captura líquidos no deseados. Los principales tipos de explosivos usados en la minería son las dinamitas, los geles y los agentes explosivos. A continuación se presenta una breve descripción de cada grupo.

### C.1 Dinamitas

Originalmente la dinamita consistía de una mezcla de nitroglicerina y arcilla. Posteriormente se reemplazó la arcilla por nitrocelulosa (gomas). En la actualidad están compuestas por nitroglicol (más estable) y nitrocelulosa, constituyendo ambos elementos cerca del 30 o 35 % del explosivo (el resto corresponde a otros oxidantes y aditivos). Las dinamitas tienen una gran potencia, razón por la cual se usa para fragmentar o triturar la roca. Presentan altas velocidades de detonación (3.500 – 6.000 m/s) y densidades (1.05 – 1.5 g/cm<sup>3</sup>). Se caracterizan además por una gran resistencia al agua y a condiciones donde el resto de los explosivos no responde de forma adecuada, como temperaturas muy bajas. Otra de sus ventajas es que, almacenadas adecuadamente, tienen una larga vida útil (cerca de un año). Una de sus desventajas es su alta sensibilidad a estímulos como impactos o calor extremos.

Según la proporción de nitroglicerina o nitroglicol con respecto a los compuestos no explosivos, es posible clasificar las dinamitas en cuatro grupos: *Gelatinas*, *Semigelatinas*, *Pulverulentas* y *especiales*. Las gelatinas son de una consistencia plástica y presentan velocidades de detonación en el rango 5.000 – 6.500 m/s, por lo que tienen gran capacidad trituradora. Sus densidades son altas (1.3 - 1.5 g/cm<sup>3</sup>), por lo que tienen gran resistencia al agua. Las semigelatinas, por otro

lado, tienen una consistencia granular y presentan velocidades de detonación inferiores (3.500 – 4.500 m/s). Su uso se reduce a rocas semiduras y húmedas. Las pulverulentas también presentan una consistencia granular, pero más fina que la de los semigeles. Tienen velocidades de detonación un tanto menores que las de los semigeles (3.400 – 3.600 m/s), lo que los hace adecuados para trabajos en rocas blandas. Sus densidades están en el rango 1.02 – 1.05 g/cm<sup>3</sup>. Las dinamitas especiales se usan en trabajos de precorte y en la prospección de hidrocarburos.

## **C.2 ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil)**

Consisten de una mezcla de nitrato de amonio granuloso (parecido al usado como abono) y cualquier clase de combustible derivado del petróleo (como el diesel). Por lo general, el nitrato de amonio corresponde al 90 – 97% de la mezcla, mientras que el resto corresponde al combustible. Se usa frecuentemente en trabajos con rocas de dureza media o leve. El nitrato de amonio absorbe agua muy fácilmente, por esto los ANFO se fabrican usando combustibles insolubles en agua. Si se agrega aluminio a la mezcla se obtiene una variedad más potente, conocida como ALANFO. Las principales ventajas de los ANFO son sus bajos precios y su seguridad (baja sensibilidad), además, en su forma semi-líquida son capaces de llenar todo el espacio de una columna explosiva, maximizando así su eficiencia.

## **C.3 Hidrogeles**

Están formados por una solución acuosa de sales oxidantes (gelificada además por gomas hidrosolubles) y algunas partículas sólidas. Ahora, cuando contienen alguna sustancia explosiva disuelta en agua, como el mononitrato de etileno glicol, adquieren el carácter de explosivo. Son de textura fina y gelatinosa, muy resistente al agua. Presentan velocidades de detonación en el rango 3.600 – 5.200 m/s. Su vida útil es menor que el de las dinamitas debido, entre otras cosas, a la separación entre su fase continua (solución acuosa) y su fase dispersa (partículas sólidas).

#### **C.4 Emulsiones**

Están formadas por una mezcla de hidrocarburos (fase líquida continua) y microgotas de una solución acuosa de sales oxidantes (fase líquida dispersa), cuyo principal componente es el nitrato de amonio. Sus densidades están en el rango 1.13 – 1.19 g/cm<sup>3</sup>, mientras que sus velocidades de detonación varían entre los 4.800 y los 5.200 m/s. Entre sus ventajas podemos señalar su excelente resistencia al agua, poca sensibilidad al ser manipuladas y ser prácticamente inodoras (no afectan de sobremanera a quien las manipula). También pueden ser mezcladas con los ANFO para formar ANFO pesado (resistente al agua). Una de sus desventajas es su menor vida útil (aproximadamente 6 meses).

## ANEXO D – Factores que controlan la magnitud de las vibraciones y los niveles de sobrepresión de aire en tronaduras y su grado de importancia.

(Fuente: AS2187-2)

Variable	VIBRACIÓN			SOBREPRESIÓN DE AIRE		
	Tipo de influencia			Tipo de influencia		
	Importante	Moderada	Insignificante	Importante	Moderada	Insignificante
<b>Controladas por el operador</b>						
<i>MIC</i>	X				X	
<i>Intervalo de retardo</i>	X			X		
<i>Burden y espaciamiento</i>		X		X		
<i>Cantidad de taco</i>			X	X		
<i>Altura del taco</i>			X	X		
<i>Diámetro y longitud de la carga</i>			X		X	
<i>Ángulo de la columna</i>			X			X
<i>Dirección de iniciación</i>	X			X		
<i>Profundidad de la carga</i>			X	X		
<i>Cordón de detonación</i>			X	X		
<i>Confinamiento de la carga</i>	X			X		
<b>No controladas por el operador</b>						
<i>Condiciones geológicas</i>	X				X	
<i>Viento y condiciones del clima</i>			X	X		
<i>Terreno saturado de agua</i>	X					X

Tabla D-1: Factores para ruido y vibración, y su grado de importancia.

## **ANEXO E – Mecanismo de fragmentación de la roca en tronaduras**

Cuando la carga contenida en un pozo es iniciada comienza un proceso de muy corta duración, pero que afecta a todo el macizo rocoso cercano a dicho pozo. Este proceso se puede dividir en cuatro fases: Detonación del explosivo, propagación de las ondas de choque, expansión del gas y movimiento de material. A continuación se describe cada una de estas fases.

- Detonación del explosivo: corresponde a una reacción química muy rápida, con una velocidad de entre 2.000 y 7.000 m/s, aunque por lo general se encuentra entre los 4.000 y 6.000 m/s. En esta reacción se producen gases a presiones y temperaturas muy elevadas, las cuales oscilan entre los 2.000 y 2.750 Kbar y los 2.700 y 3.700°C respectivamente.
- Propagación de las ondas de choque: La primera interacción entre el macizo rocoso y los gases producidos en la detonación se produce cuando estos últimos impactan la superficie de la columna. Como resultado de este impacto, una presión muy alta y repentina se ejerce sobre dicha superficie, la cual a su vez se transmite, en forma de onda de compresión o perturbación, a través del macizo rocoso. La forma en la que esta onda se dispersa va a depender de varios factores, tales como la ubicación del punto (o puntos) de iniciación, las dimensiones del pozo y la velocidad de la detonación.

Por lo general, cerca del pozo el material es pulverizado, ya que es en esta zona donde la energía de la onda es máxima. Sin embargo, a medida que la onda se propaga, y que los componentes decaen con la distancia, el material en el frente de onda respectivo tiende a comprimirse, mientras que, formando ángulos rectos con dicho frente, aparece un esfuerzo tangencial, el cual puede causar fracturas perpendiculares a la dirección de propagación (figura E-1).

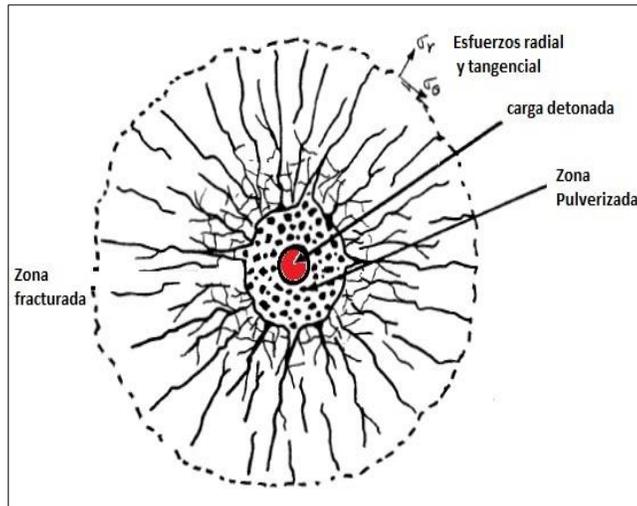


Figura E-1: Material pulverizado y fracturado alrededor de un pozo.

Cuando las ondas de compresión llegan a la cara libre son reflejadas por ella, generándose ondas de tensión (figura E-2), entonces, y dado que la roca es más débil en tensión que en compresión, el material es separado verticalmente.

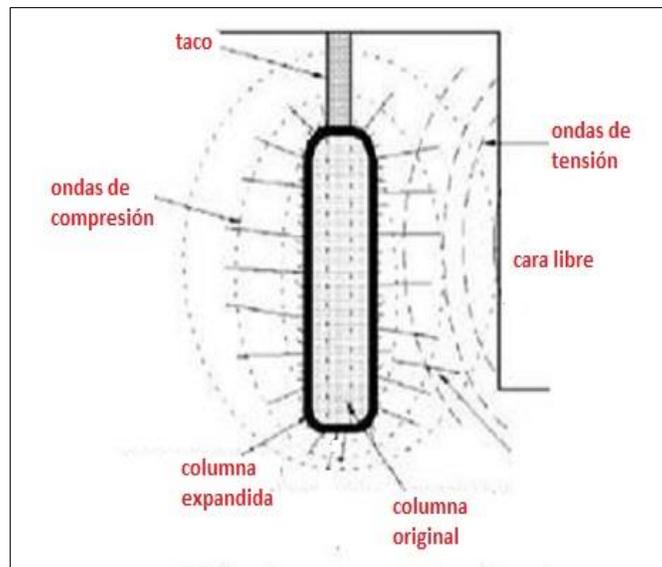


Figura E-2: Ondas reflejadas en la cara libre.

A cierta distancia del pozo, la resistencia de la roca comienza a ser igual o mayor que los esfuerzos aplicados sobre ella, por lo que ya no aparecen fracturas. De esta forma, la perturbación continúa su recorrido en la forma de una onda sísmica.

- Expansión del gas: Durante y después de la propagación de la onda de choque, los gases producidos por la detonación del explosivo penetran en cualquier grieta, falla o discontinuidad existente. Naturalmente, esta expansión de los gases reduce rápidamente la presión total y, por ende, la fragmentación y movimiento de material. El tiempo de confinamiento de los gases en un macizo rocoso depende principalmente del burden y de la cantidad y tipo de taco.
- Movimiento de material: En este punto del proceso la mayor parte de la fragmentación ya se ha completado a través de los métodos ya señalados. Sin embargo, colisiones, ya sea entre partes del macizo rocoso o con el mismo suelo, puede fragmentar aún más el material. La forma como se desplazara el material va a depender tanto de la configuración de la tronadura, como de las características del macizo rocoso. Si se trata con un material competente, frágil y con estructuras bien definidas, y si el pozo no cuenta con pasadura, entonces el material se moverá de tal manera que la altura y la velocidad a través del banco ubicado delante de la columna explosiva, serán bastante homogéneas (figura E-3).

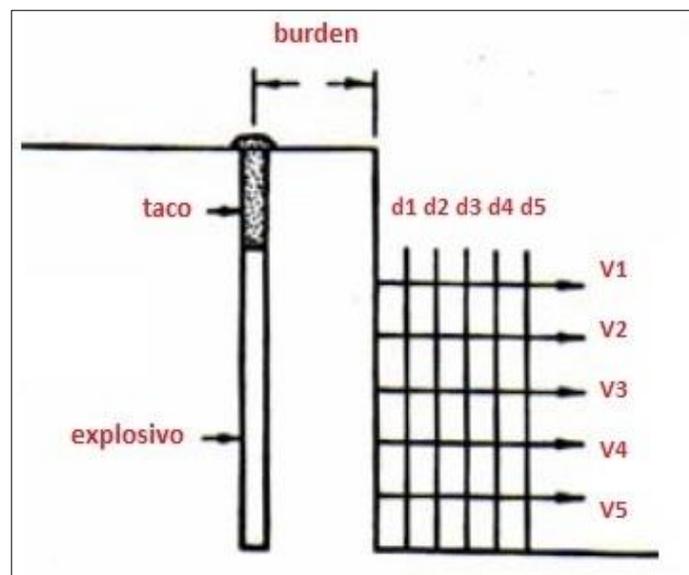


Figura E-3: Perfil de desplazamiento homogéneo.

Por otro lado, cuando el material es blando y presenta muchas fisuras, el perfil correspondiente no será homogéneo, registrando una mayor velocidad y desplazamiento en la zona cercana al centro del pozo (figura E-4).

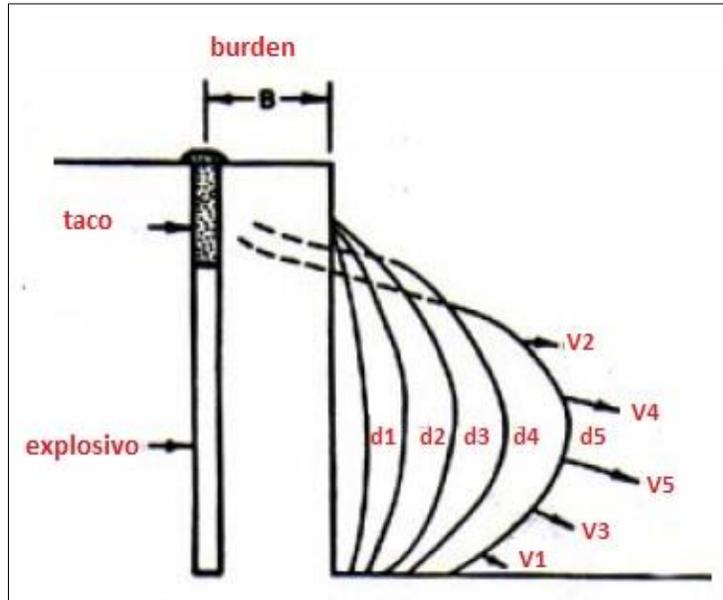


Figura E-4: Perfil de desplazamiento no homogéneo.

En los dos casos recién vistos se asume que la cara libre es relativamente recta. Sin embargo, esto no ocurre en la mayoría de los casos, donde típicamente el burden en la base es mucho mayor que en la cresta. De esta manera, si el burden en la base resulta ser excesivo en relación a la cantidad y tipo de explosivo usado, el material en dicha zona no se moverá lo suficiente, observándose un mayor desplazamiento en la mitad superior (figura E-5). Para evitar esta situación se suele cavar el pozo de manera inclinada, de manera que el burden se mantenga relativamente constante. También es posible, para lograr el burden adecuado en la base, perforar la tronadura más cerca de la cara libre, aunque si el burden en la cresta disminuye demasiado, el material cercano puede ser expulsado con una fuerza excesiva (figura E-6).

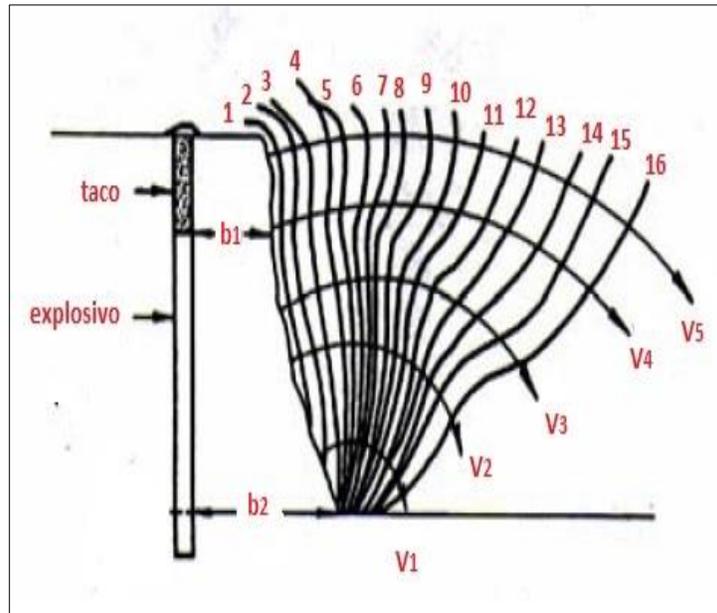


Figura E-5: Perfil no homogéneo (burden excesivo).

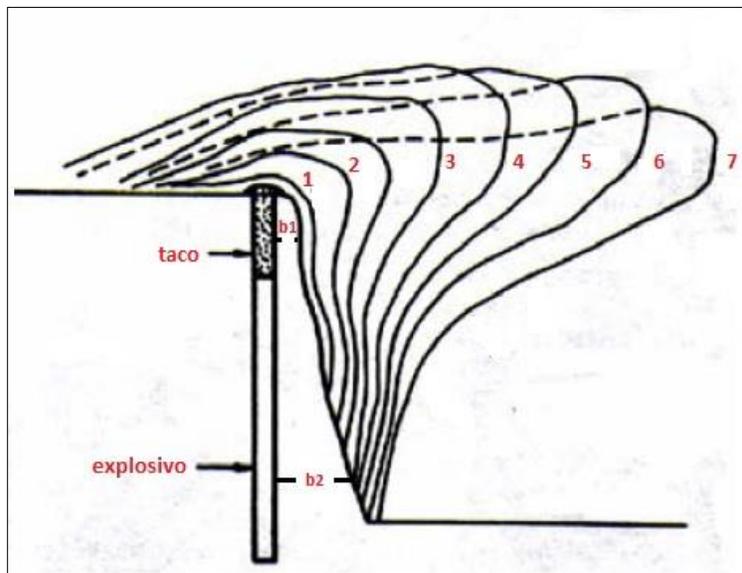


Figura E-6: Material expulsado con fuerza (flyrock).

La figura E-7 muestra una serie de fotografías, las cuales permiten apreciar las cuatro fases ya descritas en una tronadura real. En la primera fotografía (A) se observa la detonación de las columnas (pequeñas nubes de polvo), mientras que en la segunda fotografía (B) las ondas de choque, luego de recorrer el macizo rocoso, son reflejadas por la cara libre. Las dos últimas fotografías (C y D) muestran la expansión del gas y el material desplazado por dicha expansión.



Figura E-7: Fases del proceso de fragmentación de la roca (tronadura real).

## ANEXO F - Determinación de la curva de predicción

(Fuente: BS 6472-2)

A continuación se ilustra un ejemplo del procedimiento de regresión usado para determinar la curva de predicción característica de un sitio. Este ejemplo se basa en el monitoreo de una serie de tronaduras, cuyas cargas variaron entre los 75kg, 100kg y 120 kg. Los datos registrados durante dicho monitoreo se muestran en la tabla D-1, indicando la carga (MIC) de cada tronadura, la distancia al punto de medición y la magnitud (PPV) de la vibración correspondiente.

Distancia (m)	MIC (Kg)	PPV (mm/s)
180	100	47
250	100	70
290	100	18,2
340	100	15
370	100	17
380	100	16
401	100	11
420	100	14
500	100	13
505	100	11
516	100	7,4
550	100	4,1
720	100	2,5
920	100	1,3
190,5	75	66
260	75	40
216,5	75	20
277	75	17,7
294,5	75	11
398	75	10,5
450	75	3,3
296	120	51
338	120	20
435	120	13
482	120	13
570	120	10,3
548	120	3,2
613	120	2,8
767	120	3,4

Tabla F-1: Registro tronaduras de prueba (fuente: BS 6472-2).

Como sabemos, la ecuación de la recta toma la forma:

$$y = mx + c \quad (d.1)$$

En nuestro caso, la variable independiente 'x' corresponde al logaritmo (en base 10) de la distancia reducida, mientras que la variable dependiente 'y' corresponde al logaritmo de la velocidad pico de partícula (PPV), o sea:

$$y = \log(ppv) ; x = \log\left(\frac{d}{\sqrt{Q}}\right) \quad (d.2)$$

Usando los datos de la tabla F-1 podemos formar una nueva tabla con los valores respectivos de las variables x e y:

distancia reducida (m/Kg <sup>1/2</sup> )	Log (distancia red)	Log (PPV)
18	1,2553	1,6721
25	1,3979	1,8451
29	1,4624	1,2601
34	1,5315	1,1761
37	1,5682	1,2304
38	1,5798	1,2041
40,1	1,6031	1,0414
42	1,6232	1,1461
50	1,699	1,1139
50,5	1,7033	1,0414
51,6	1,7126	0,8692
55	1,7404	0,6128
72	1,8573	0,3979
92	1,9638	0,1139
22	1,3424	1,8195
30,02	1,4774	1,6021
25	1,3979	1,301
31,99	1,5049	1,248
34,01	1,5316	1,0414
45,96	1,6624	1,0212
51,96	1,7157	0,5185
27,02	1,4317	1,7076
30,86	1,4893	1,301
39,71	1,5989	1,1139
44	1,6435	1,1139
52,03	1,7163	1,0128
50,03	1,6992	0,5051
55,96	1,7479	0,4472
70,02	1,8452	0,5315

Tabla F-2: Valores de las variables x e y.

Los valores promedio de estas variables resultan ser  $\bar{x} = 1,604$  e  $\bar{y} = 1,609$ . La pendiente 'm' y el intercepto 'c' de la ecuación (d.1) vienen dados por las siguientes expresiones:

$$m = \frac{(\sum xy) - N(\bar{x}\bar{y})}{\sum x^2 - N\bar{x}^2} \quad ; \quad c = \bar{y} - m\bar{x}$$

Donde N corresponde al número de muestras. También es posible calcular la desviación estándar ( $\sigma$ ) en cada variable y el coeficiente de correlación (r) entre ambas:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} (\sum (x - \bar{x})^2)} \quad ; \quad r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{N\sigma_x\sigma_y}$$

Usando los valores promedios de las variables x e y, además de los valores de la tabla F-3, se obtiene que:

$$m = \frac{47,9094 - 29(1,6035 * 1,0693)}{75,3045 - 29(1,6035)^2} = -2,461$$

$$c = 1,0693 - (-2,461)(1,6035) = 5,0155$$

Así llegamos a la recta correspondiente a un intervalo de confianza del 50%, esta es:

$$y = -2,461x + 5,0155$$

Volviendo a lo establecido en (d.2), y desarrollando la expresión resultante, podemos llegar a la ecuación típica que da cuenta de la magnitud de la vibración en función de la carga (Q) y la distancia al receptor (d). Finalmente, el coeficiente de correlación resulto ser  $r = -0,9110$ , lo cual indica que, en este caso, existe una fuerte dependencia entre ambas variables (relación inversa).

$X*Y$	$X^2$	$Y^2$	$(X - \text{prom } X)$	$(y - \text{prom } Y)$	$(x - \text{prom } X)(y - \text{prom } Y)$	$(x - \text{prom } X)^2$	$(y - \text{prom } Y)^2$
2,0990	1,5758	2,7959	-0,3482	0,6028	-0,2099	0,1213	0,3634
2,5793	1,9541	3,4044	-0,2056	0,7758	-0,1595	0,0423	0,6019
1,8428	2,1386	1,5879	-0,1411	0,1908	-0,0269	0,0199	0,0364
1,8012	2,3455	1,3832	-0,0720	0,1068	-0,0077	0,0052	0,0114
1,9295	2,4593	1,5139	-0,0353	0,1611	-0,0057	0,0012	0,0260
1,9022	2,4958	1,4499	-0,0237	0,1348	-0,0032	0,0006	0,0182
1,6695	2,5699	1,0845	-0,0004	-0,0279	0,0000	0,0000	0,0008
1,8603	2,6348	1,3135	0,0197	0,0768	0,0015	0,0004	0,0059
1,8925	2,8866	1,2408	0,0955	0,0446	0,0043	0,0091	0,0020
1,7738	2,9012	1,0845	0,0998	-0,0279	-0,0028	0,0100	0,0008
1,4886	2,9330	0,7555	0,1091	-0,2001	-0,0218	0,0119	0,0400
1,0665	3,0290	0,3755	0,1369	-0,4565	-0,0625	0,0187	0,2084
0,7390	3,4496	0,1583	0,2538	-0,6714	-0,1704	0,0644	0,4508
0,2237	3,8565	0,0130	0,3603	-0,9554	-0,3442	0,1298	0,9128
2,4425	1,8020	3,3106	-0,2611	0,7502	-0,1959	0,0682	0,5628
2,3669	2,1827	2,5667	-0,1261	0,5328	-0,0672	0,0159	0,2839
1,8187	1,9541	1,6926	-0,2056	0,2317	-0,0476	0,0423	0,0537
1,8781	2,2647	1,5575	-0,0986	0,1787	-0,0176	0,0097	0,0319
1,5950	2,3458	1,0845	-0,0719	-0,0279	0,0020	0,0052	0,0008
1,6976	2,7636	1,0428	0,0589	-0,0481	-0,0028	0,0035	0,0023
0,8896	2,9436	0,2688	0,1122	-0,5508	-0,0618	0,0126	0,3034
2,4448	2,0498	2,9159	-0,1718	0,6383	-0,1097	0,0295	0,4074
1,9376	2,2180	1,6926	-0,1142	0,2317	-0,0265	0,0130	0,0537
1,7810	2,5565	1,2408	-0,0046	0,0446	-0,0002	0,0000	0,0020
1,8307	2,7011	1,2408	0,0400	0,0446	0,0018	0,0016	0,0020
1,7383	2,9457	1,0258	0,1128	-0,0565	-0,0064	0,0127	0,0032
0,8583	2,8873	0,2551	0,0957	-0,5642	-0,0540	0,0092	0,3183
0,7817	3,0552	0,2000	0,1444	-0,6221	-0,0898	0,0208	0,3870
0,9807	3,4048	0,2825	0,2417	-0,5378	-0,1300	0,0584	0,2892
<b><math>\Sigma = 47,9794</math></b>	<b><math>\Sigma = 75,3045</math></b>	<b><math>\Sigma = 38,5378</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = 0</math></b>	<b><math>\Sigma = -1,8145</math></b>	<b><math>\Sigma = 0,7374</math></b>	<b><math>\Sigma = 5,3802</math></b>

Tabla F-3: Desarrollo de datos para el análisis por regresión.

## ANEXO G – Ejemplos de registros para tronaduras

- muestra n°1 (TERROCK)

<b>Location:</b> METQ Metropolitan Quarry						
<b>Date:</b> 14/09/94	<b>Weather:</b> Fine, cloudy, still.					
<b>Time:</b> 12:02	<b>Rock type:</b> Hard Rock					
<b>Face height(m):</b> 13.5						
<b>BLAST DESIGN</b>						
<b>BLASTHOLE:</b> Diameter (mm): 89	<b>PATTERN:</b> Burden (m): 3.8					
Length (m): 14.7	Spacing(m): 3.8					
Angle (deg): 10.0	Rows : 3					
Subgrade (m): 1.0	Holes : 60					
Water Depth(m): 2.0						
<b>Density(t/cu.m):</b> 2.70 <b>Volume Broken(cu.m):</b> 11696 <b>(tonnes):</b> 31580						
<b>CHARGE DETAILS</b>						
<b>Charge:</b> ICI Handibulk Wet (GMB)	<b>Weight(kg):</b> 4450.0					
Powergel Magnum II 55mm	208.6					
Anzomex "P" Primers	23.6					
Anzomex "K" Primers	0.7					
	<b>Total (kg):</b> 4682.9					
<b>Powder Factor(kg/cu.m):</b> 0.40 <b>(kg/t):</b> 0.15						
<b>Charge (kg/hole):</b> 78.0 <b>(kg/delay):</b> 78.0						
<b>Initiation:</b> Exel Primadet DLD No 7	<b>Units :</b> 60					
Exel Primadet DLD No 8	5					
Exel Connectadet 17ms	4					
Exel Connectadet 25ms	15					
Exel Connectadet 42ms	21					
Exel Connectadet 65ms	19					
Electric	1					
<b>Stemming:</b> 10mm aggregate.	<b>Length (m):</b> 3.5					
<b>BLAST VIBRATION MEASUREMENTS</b>						
<b>Blast Site:</b> Bench 6 centre, facing NW.						
<b>Codes :</b>						
<b>TestSite</b>	<b>Distance</b>	<b>Grd Vib</b>	<b>Air Vib</b>	<b>WF Code</b>	<b>VibCode1</b>	<b>VibCode2</b>
	(m)	(mm/s)	(dBL peak)			
Stn A	570	0.8	113.0	BMA14094	ETNA8619	
Stn D3	230	4.1	132.1	PeakValu	MiniSeis	
Stn G	300	3.6	125.0	BMG14094	SPM-8	
Stn H	440	2.3	117.5	BMH14094	CJ4-T1	
Stn N	220	5.7	121.5	BMN14094	ETNA4608	
Stn O	240		113.8	PeakValu	B&K2218	
<b>BLASTHOLE PATTERN</b>						
-----face-----						
* * * * * * * * * * * * * * *						

Figura G-1: Ejemplo de registro n°1.

- Muestra n°2 (Problemática de las vibraciones en tronadura – Unión Española de explosivos)

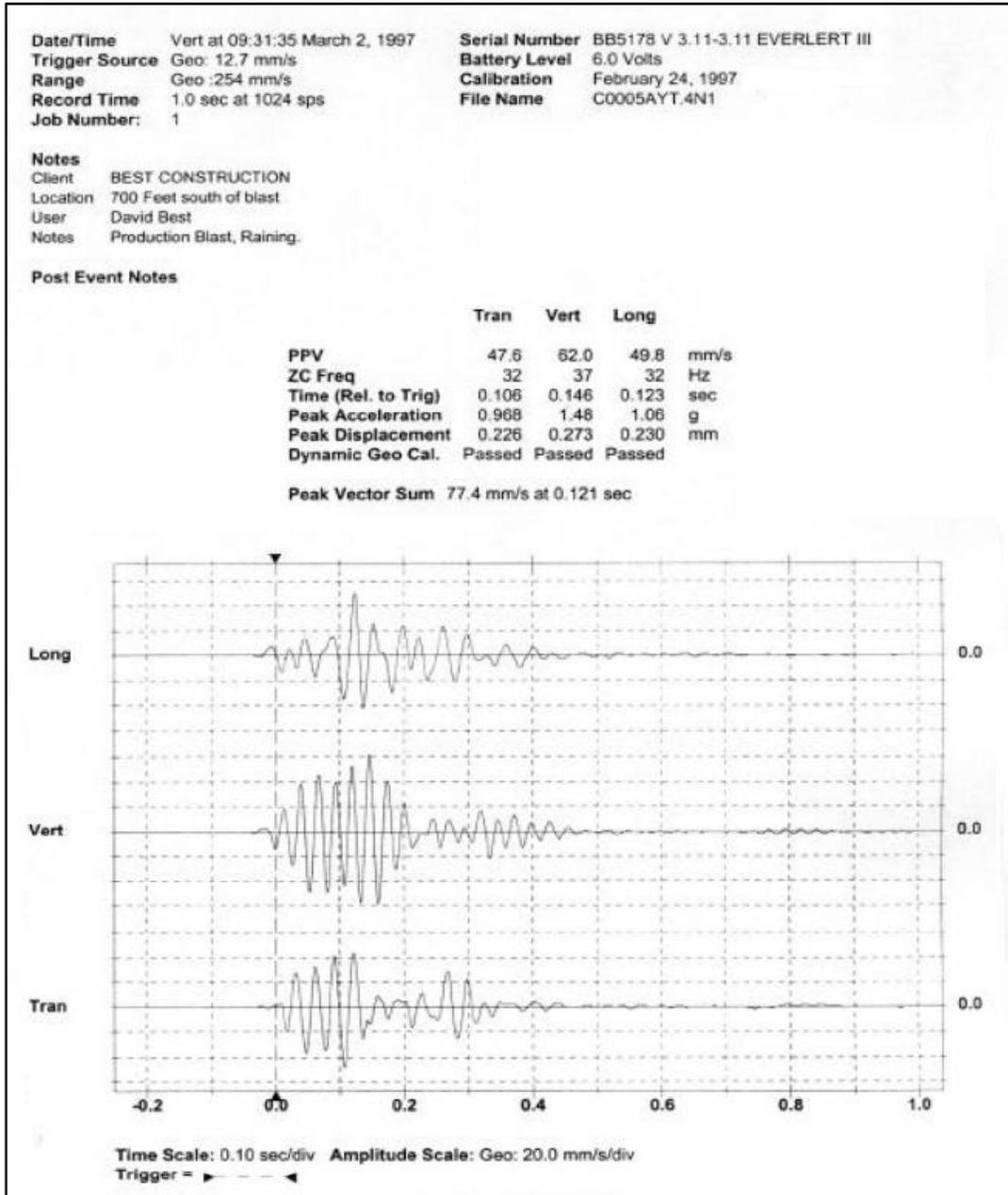


Figura G-2: Ejemplo de registro n°2.

## ANEXO H - Densidad aparente de diversos materiales

A continuación se presenta una tabla con la densidad aparente de algunos materiales. Este parámetro se calcula dividiendo la masa en el volumen aparente, o sea, el volumen que considera poros y cavidades.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
Adobe	1.500
Agua	1.000
Arcilla	2.100
Arena	1.700
Asfalto	2.100
Basalto	2.770 - 3.280
Brucita	2.300 - 2.400
Caliza	2.600 - 2.900
Carbón vegetal	200
Cuarcita	2.400 - 2.650
Diabasa	2.820 - 3.100
Dolomita	2.800 - 2.900
Gneis	2.600 - 3.120
Grava	1.700
Granito	2.640 - 2.750
Hielo (°C)	917
Hormigón armado	2.400
Ladrillo	1.700
Madera	600
Magnetita	5.000 - 5.200
Marga	1.500 - 2.000
Mármol	2.600 - 2.730
Norita	2.700 - 3.000
Pumita (Pómez)	800
Peridotita	3.100 - 3.300
Riolita	2.400 - 2.600
Sal gema	2.160 - 2.600
Traquita	2.600
Tierra común	1.540 - 2.000
Vidrio	2.500
Yeso	2.330 - 3.300

Tabla H-1: Densidad aparente de distintos materiales.

**ANEXO I - Velocidad de propagación de ondas sísmicas en  
distintos tipos de rocas.**

<b>Tipo de roca</b>	<b>velocidad de propagación (m/s)</b>
<b>IGNEAS</b>	
<i>Gabros</i>	6.700 - 7.300
<i>Diabasas</i>	5.800 - 7.100
<i>Granito</i>	3.000 - 6.000
<i>Basaltos</i>	2.400 - 4.000
<i>Granito meteorizado</i>	1.200 - 1.600
<b>METAMORFICAS</b>	
<i>Cuarcitas</i>	5.000 - 6.000
<i>Gneis</i>	3.000 - 6.000
<i>Pizarras metamórficas</i>	1.800 - 3.000
<i>Gneis meteorizado</i>	1.200 - 1.600
<b>SEDIMENTARIAS</b>	
<i>Dolomias</i>	5.000 - 6.000
<i>Conglomerados</i>	1.200 - 7.000
<i>Calizas</i>	1.500 - 6.000
<i>Areniscas</i>	1.400 - 4.500
<i>Margas</i>	1.800 - 3.500
<i>Morrena glaciár</i>	1.200 - 2.100
<i>Pizarras sedimentarias</i>	1.200 - 2.100
<i>Mezclas de grava y tierras consolidadas</i>	1.200 - 2.100
<i>Arcillas</i>	1.000 - 2.000
<i>Mezclas de grava y tierras sueltas</i>	450 - 1.100
<i>Arenas sueltas</i>	250 - 1.200
<i>Suelos consolidados</i>	450 - 600
<i>suelos normales</i>	250 - 450
<b>VARIOS</b>	
<i>Sal</i>	4.500 - 6.500
<i>Anhidrita</i>	3.000 - 6.000
<i>Yeso</i>	3.000 - 4.000
<i>Hielo</i>	3.000 - 3.700
<i>Carbón</i>	900 - 1.500

**Tabla I-1: Velocidad de propagación en distintos materiales.**

**ANEXO J – Resultados de la investigación desarrollada por el  
instituto de mecánica de roca de la india, 2005.**

Tronadura	MIC (kg)	d (m)	Tipo de montaje	PPV (mm/s)
1	56	88	Libre	28,80
			Saco de arena	29,80
			Estaca	30,60
			Enterrado	32,40
2	50	212	Libre	7,37
			Saco de arena	8
			Estaca	7,37
			Enterrado	7,49
3	56	77	Libre	31,1
			Saco de arena	31,4
			Estaca	30,7
			Enterrado	31,4
4	50	192	Libre	13,3
			Saco de arena	12,7
			Estaca	12,4
			Enterrado	13,3
5	50	272	Libre	6,98
			Saco de arena	6,6
			Estaca	6,48
			Enterrado	6,48
6	50	287	Libre	3,05
			Saco de arena	2,67
			Estaca	2,79
			Enterrado	2,67
7	50	158	Libre	17,8
			Saco de arena	11,4
			Estaca	11,4
			Enterrado	11,7
8	50	229	Libre	3,56
			Saco de arena	3,94
			Estaca	3,68
			Enterrado	3,68
9	56	245	Libre	9,91
			Saco de arena	8,13
			Estaca	7,49
			Enterrado	7,49

Tabla J-1: Resultados (fuente: instituto de mecánica de roca de la india, 2005).

Tronadura	MIC (kg)	d (m)	Tipo de montaje	PPV (mm/s)
10	43	276	Libre	6,3
			Saco de arena	6,37
			Estaca	6,37
			Enterrado	5,94
11	43	170	Libre	4,95
			Saco de arena	5,08
			Estaca	4,7
			Enterrado	5,08
12	50	101	Libre	48,4
			Saco de arena	51,4
			Estaca	49,9
			Enterrado	49,5
13	50	167	Libre	9,65
			Saco de arena	9,78
			Estaca	10
			Enterrado	9,65
14	50	302	Libre	4,06
			Saco de arena	4,44
			Estaca	4,19
			Enterrado	4,57

**Tabla J-1: Resultados (fuente: instituto de mecánica de roca de la india, 2005).**