

5. NIVELES Y EFECTOS DE LAS VIBRACIONES

5.1. Introducción

Para evaluar los posibles efectos de las vibraciones producidas por voladuras sobre las estructuras se suele recurrir a normas, las cuales están basadas en cientos de observaciones de daños causados a estructuras con diferentes características como respuesta a este tipo de sollicitaciones. En esta sección se compararan los valores calculados en la sección 3.4 (pág. 32) con los datos procesados de vibraciones.

La frecuencia de la vibración es un parámetro importante y a la vez polémico incluido en algunas normas para la evaluación de los efectos de las vibraciones. Como parte del trabajo se comparan los diferentes métodos utilizados para calcular las frecuencias –Fourier, cruce por ceros y frecuencia instantánea–, y se muestra que las técnicas de frecuencia instantánea y cruce por ceros son similares, mientras que la frecuencia evaluada con el método de Fourier diverge respecto a estos dos.

En esta sección también se plantean las relaciones empíricas que son utilizadas en el fenómeno de las explosiones. Con la información disponible, es decir con los parámetros básicos de diseño de las voladuras (carga y distancia al sitio de medición) y los registros de vibraciones se plantea la ley de escalamiento cubico para el caso particular de las voladuras realizadas en la mina La Calera; ley que esta basada en relaciones adimensionales entre las diversas variables que entran en juego en una explosión. Adicionalmente se describirán las causas de dispersión en los datos con los que se planteo la ley de escalamiento.

Por ultimo, con base en las relaciones empíricas descritas y con las base en las referencias disponibles, se plantean posibles vias para la reducción los niveles de vibración.

5.2. Información disponible

La información utilizada para elaborar este proyecto corresponde a datos de las voladuras realizadas por Cementos del Valle en la mina La Calera en el periodo de mayo 1999 a agosto 2002. Parte de esta información corresponde a datos obtenidos en campo mediante instrumentación (registros de las vibraciones causados por las voladuras) y la otra parte de la información fue proporcionada por Cementos del Valle y corresponde a los parámetros involucrados en el diseño de cada una de las voladuras.

Las estaciones dedicadas al monitoreo de las vibraciones producidas por voladuras de la mina La Calera han funcionado con diferentes intervalos de continuidad en las poblaciones de San Marcos y Mulaló (ver sección 2.5.2, página 14). Adicionalmente, no todas las voladuras

reportadas por Cementos del Valle fueron registradas, esto debido a que no superaron el umbral de detección (voladuras pequeñas y/o lejanas) o a que la memoria de los sistemas de adquisición se llenó.

5.2.1. Eventos Registrados

La base de datos de registros tiene en total 4576 eventos, estos fueron catalogados a partir de la forma de la señal así: 3962 (86 %) fueron catalogados como ruido ambiental, es decir, producidos por tráfico vehicular, actividad agraria y/o humana y condiciones medio ambientales como vientos o lluvias; 504 (11 %) correspondieron a voladuras y 110 (aprox. 3 %) se catalogaron como sismos¹. En la Tabla 5.1 se muestran la distribución de los 505 registros de acuerdo a la estación y al sistema de adquisición que los registró.

Tabla 5.1. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Todos los eventos registrados

	Estación				Total
	San Marcos	Mulaló	Leo Sieber	Otro	
GSR18	93	—	289	—	382
GCR16	99	18	—	5	122
Total	192	18	289	5	504

5.2.2. Información de las voladuras de Cementos del Valle

Cementos del Valle proporcionó información básica de todas las voladuras (862) realizadas desde junio de 1999 hasta agosto de 2002. La información incluye: [1] Fecha de la voladura, [2] Código único de la voladura, [3] Sector donde se ejecutó la voladura, [4] Nivel –altura– de la voladura, [5] y [6] Posición de la voladura (coordenadas geográficas), [7] Cantidad de material removido (kilogramos) y [8] Carga de ANFO (kilogramos).

La correlación entre registros y voladuras se llevo a cabo usando los siguientes criterios: 1) se tuvieron en cuenta solo los datos correspondientes a los días en que Cementos del Valle reporta una sola voladura, ya que de esta manera es casi seguro que el registro obtenido en una o ambas estaciones (uno o dos archivos) correspondan a esa voladura; 2) se excluyeron voladuras reportadas con información incompleta – sin posición, carga de ANFO y material desplazado. En total cumplieron con estos requisitos 217 voladuras (260 registros), la información de estas voladuras se incluye en la Tabla E.1 (Anexos, página 150).

¹Las formas de onda en los tres casos –ruido, sismos y voladuras– son diferentes, por tanto mediante inspección visual y con base en la experiencia es posible discriminar las señales.

La Tabla 5.2 muestra la distribución de los 260 registros de voladuras discriminando de acuerdo al equipo utilizado para su adquisición y su ubicación. La distribución espacial de las voladuras correspondientes se muestra en la Figura A.4 (Anexos, página 93).

Tabla 5.2. Distribución de registros de voladuras por ubicación y equipo de adquisición. Eventos relacionados con información de Cementos del Valle

	Estación			Total
	San Marcos	Mulaló	Leo Sieber	
GSR18	62	—	129	191
GCR16	61	8	—	69
Total	123	8	129	260

5.3. Comparación de frecuencias

En procesamiento de señales, y en especial con las señales transitorias, la frecuencia es un tema controversial. Existe una definición clara de frecuencia para señales armónicas, es el número de veces que en la unidad de tiempo se repite el mismo valor de la perturbación; sin embargo existen varias formas de calcularla (p.e.: cruces por cero, transformada de Fourier, frecuencia instantánea) que en algunos casos –señales armónicas– tienen el mismo valor, pero en otros –señales transitorias– los valores calculados de las frecuencias pueden divergir.

Los métodos utilizados para calcular la frecuencia en este proyecto (ver sección 4.6, pág. 62) y comparados gráficamente en la Fig. 5.1 son:

Análisis de Fourier. De todas las frecuencias en el espectro de Fourier la que se escoge y utiliza de aquí es la *máxima dominante*, es decir la frecuencia con el mayor valor de amplitud en el espectro. Esta frecuencia está asociada con la señal que aparece por mayor tiempo en el registro, y esta frecuencia es representativa de todo el registro. Esta frecuencia se le designa como frecuencia dominante.

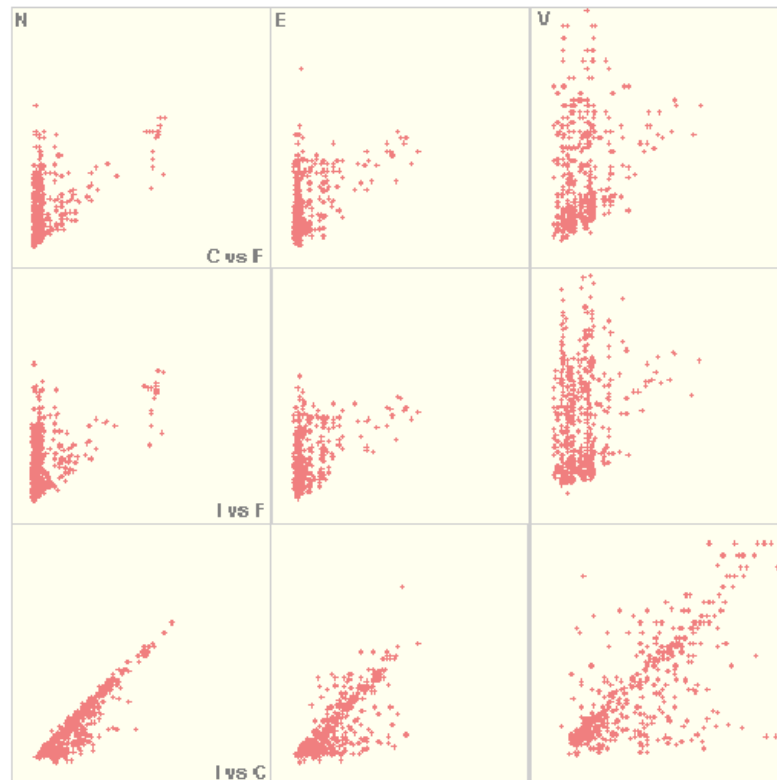
Cruces por cero. La frecuencia es calculada a partir de de dos cruces por cero consecutivos en la parte de la señal donde se encuentra la velocidad pico. Esta frecuencia es representativa de una ventana pequeña de la señal. A esta frecuencia se le designa como frecuencia asociada al [a la] máximo[a] [velocidad].

Frecuencia instantánea. Calculada a partir de la transformada de Hilbert, esta es representativa de una ventana muy pequeña de señal. A esta frecuencia también se le designa como frecuencia asociada al [a la] máximo[a] [velocidad].

De las anteriores descripciones se puede rescatar la idea de que los valores de frecuencias están asociados a una frecuencia dominante (análisis de Fourier) o a la frecuencia asociada a

la máxima velocidad (cruce por ceros y frecuencia instantánea). Sin embargo estos términos no siempre son usados explícitamente, sino que se recurre a utilizar el termino *frecuencia* y el método con el que se calcula (de Fourier, por cruces por cero, etc).

Figura 5.1. Comparación de las frecuencias de Fourier (F), cruce por ceros (C) y frecuencia instantánea (I) de las 504 voladuras en el periodo junio 1999 – agosto 2002, las columnas de izquierda a derecha son las componentes: norte, este y vertical; las filas de arriba hacia abajo son: C vs F, F vs I e I vs C. Todas las sub-gráficas están a la misma escala y va de 0 a 30 Hz en ambas direcciones.



Analizando la Figura 5.1 se puede observar que hay una correspondencia lineal y aproximadamente de 1:1 entre la frecuencia instantánea y los cruces por cero, es decir son valores casi homólogos, mientras que si se observa la relación entre estos dos y la frecuencia hallada con análisis de Fourier, se aprecian resultados dispares. En parte la diferencia de los resultados obtenidos con el análisis de Fourier se debe a que se están comparando escalas diferentes, para Fourier se utiliza toda la señal de la voladura (representativo de toda la señal), mientras que para el cruce por ceros (por medio de bisección) se utiliza una pequeña ventana y para la frecuencia instantánea se utilizan una ventana mucho mas pequeña que cruce por ceros (representativo de una pequeña parte de la señal).

En los tres casos se observa que las frecuencias en la componente vertical son superiores y presentan mayor dispersión que las componentes norte y este; esto se puede ser debido a que la componente vertical está mas influenciada por ondas de cuerpo como la P , mientras que las componentes norte y este estén influenciadas por ondas superficiales las cuales generalmente tienen frecuencias más bajas que la P .

También se puede observar que las sub-gráficas en las que está presente el análisis de Fourier (filas 1 y 2) hay concentración de valores de frecuencias alrededor de valores determinados, lo cual no ocurre con los otros dos análisis (cruce por ceros y frecuencia instantánea). Esto se debe a que el análisis de Fourier da más peso a los valores que aparecen en la mayor parte de la señal y que en este caso podrían deberse a condiciones particulares del terreno (efecto local) o a efectos de la fuente.

Las normas internacionales permiten usar las frecuencias halladas a partir de un análisis de Fourier o un análisis de cruces por cero, aunque como se ve en la primera fila de la Figura 5.1 no hay realmente una relación muy clara entre ellas. No obstante, si se permite usar cruces por cero, entonces podríamos justificar el uso de la frecuencia instantánea, dada la similitud de los resultados obtenidos con estas dos técnicas (Figura 5.1, tercera línea).

5.4. Conformidad con las normas internacionales

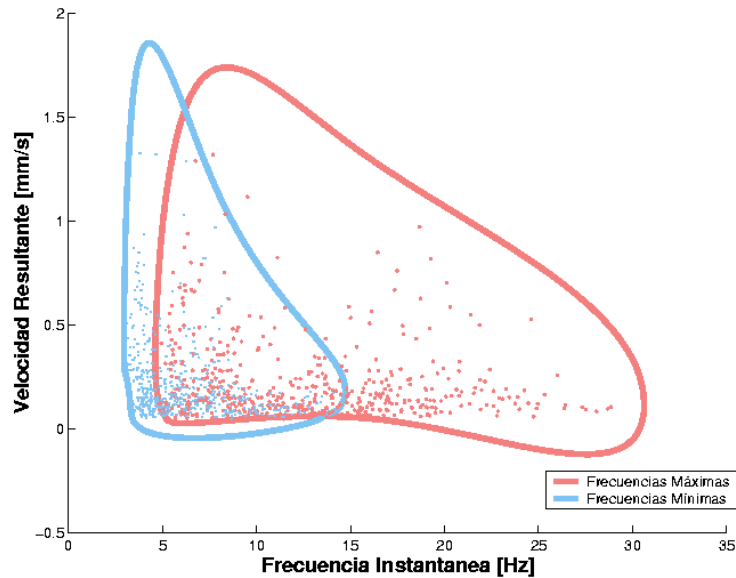
Como parte de los objetivos de este proyecto se planteó verificar que las vibraciones generadas en las voladuras de la mina La Calera hayan cumplido con las normas internacionales. Para cumplir este objetivo se comparan los valores impuestos por las normas para el caso particular (iglesia de Mulaló, en sección 3.4, pág. 32), con los valores de velocidad máxima (resultante o por componente) y la frecuencias (de Fourier, cruce por ceros e instantánea) asociadas.

Para efectuar la comparación se realizan representaciones gráficas en las cuales las abscisas representan la frecuencia (de Fourier, cruce por ceros o instantánea) y las ordenadas los valores de velocidad, en esta gráfica se incluyen los valores máximos permitidos por las normas (p.e.: Figura 3.2, pág. 34) y los valores puntuales obtenidos de los registros de vibraciones causados por voladuras.

Los valores puntuales de velocidad y frecuencia se escogieron así: 1) el valor de velocidad depende de la norma, algunas utilizan la velocidad pico en la componente vertical, otras la resultante, sin embargo en este proyecto se utilizara indistintamente de la norma la velocidad resultante, por ser la más conservativa; 2) se suele escoger la frecuencia asociada a la velocidad como la mas pequeña de las tres (una por componente), escogerla de esta manera implica que los valores van a ser conservativos, ya que las velocidades máximas permitidas por las normas usadas en este trabajo son siempre menores hacia las frecuencias bajas. En la Figura 5.2 se pueden observar los valores (504 registros) de velocidad resultante máximos y su frecuencia instantánea asociada mínima –azul– y máxima –rojo–, se puede

observar que la franja azul se concentra hacia las frecuencias consideradas críticas por algunas normas (aprox. 4 Hz, ver Figura 3.2 en pág. 34).

Figura 5.2. Comparación entre las frecuencias instantáneas máximas y mínimas



Para garantizar la conformidad con las normas se estudiaron todos los registros disponibles en el catálogo (504), sin importar su posible correspondencia con la información suministrada por Cementos del Valle. Aunque este trabajo propone el uso de la frecuencia instantánea, la verificación de la conformidad con las normas se hizo utilizando las tres técnicas: análisis de Fourier (Fig. 5.4-a- , en el final de esta sección), frecuencia instantánea (Fig. 5.4-c-) y cruce por ceros (Fig. 5.4-b- bisección).

En general, de la Figura 5.3 se puede concluir que los 504 registros de vibraciones producidas por las voladuras en la mina La Calera—Cementos del Valle, cumplen con la normatividad internacional para el caso mas crítico (Iglesia de Mulaló), ya que en ningún momento sobrepasaron los niveles máximos exigidos por ellas.

En la Figura 5.4-a- se evidencia la tendencia de las frecuencias obtenidas mediante Fourier a concentrarse alrededor de ciertos rangos (aprox. 3 Hz), mientras que las otras dos técnicas (Fig. 5.4-b- y 5.4-c-) tal tendencia no existe. Esta tendencia posiblemente se deba, como ya se explicó, a un efecto local o de la fuente.

Por otra parte las Figuras 5.4-b- y 5.4-c- (cruce por ceros y frecuencia instantánea respectivamente) son relativamente parecidas, sin embargo frecuencia instantánea tiene menor dispersión respecto a cruce por ceros. Las frecuencias altas en estas gráficas –aproximadamente mayores a 8 Hz– posiblemente se deban a ondas de cuerpo o acústicas (P , S y P_{ac}), mientras las frecuencias bajas posiblemente estén asociadas a ondas superficiales R .

5.5. Relaciones entre vibraciones y parámetros de voladuras

Existen varios procedimientos empíricos y estadísticos de clasificación para relacionar las variables medidas en las voladuras (frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración) y los parámetros de diseño de las voladuras (cantidad de explosivos, secuencia de retardos, etc.). En esta sección se utilizara las relaciones empíricas aplicables al caso concreto de vibraciones producidas por voladuras en la mina La Calera – Cementos del Valle.

Los procedimientos estadísticos de clasificación, que buscan encontrar relaciones y agrupaciones en datos multidimensionales (velocidad, carga, distancia, tipo de materiales, etc). Estos tipos de análisis de datos pueden ser gráfico y/o estadísticos. Los métodos estadísticos que pueden ser aplicados a este tipo de datos son los de estadística multivariada, entre los cuales encontramos: el análisis de cúmulos (*Cluster Analysis*), el análisis de componentes principales (*Principal Component Analysis*), análisis de correspondencia (*Correspondence Analysis*), entre otros. Sin embargo, dado los alcances de este proyecto estos métodos de clasificación estadística (y gráfica) no serán utilizados.

5.5.1. Relaciones empíricas

Las relaciones empíricas están enfocadas en la predicción de valores de vibraciones –desplazamiento, velocidad, aceleración de partícula y frecuencia asociada a la vibración máxima– producidos por explosiones con el fin de ser utilizados para conocer y controlar los efectos sobre construcciones civiles y equipos delicados.

Teniendo en cuenta las variables significativas en el fenómeno de una explosión y por medio de un análisis dimensional, aplicando el teorema II de Buckingham² se obtienen tales relaciones empíricas. En la Tabla 5.3 se incluyen las variables que se ha visto explican el fenómeno de una explosión en un medio homogéneo e isotrópico, en ella se muestran las variables independientes, relacionadas con la fuente de las vibraciones (p.ej.: cantidad de explosivo utilizado), y las dependientes, relacionadas con las vibraciones. En total se tienen nueve variables que explican el fenómeno y éstas están formadas únicamente por tres dimensiones (F , Fuerza; T , tiempo y L , longitud), por lo tanto existen seis términos adimensionales que describen una explosión.

²En general define que si un fenómeno tiene N variables y M dimensiones (Tabla 5.3 para las explosiones) entonces hay $N - M$ términos adimensionales que relacionan dichas variables.

Tabla 5.3. Variables consideradas en el análisis adimensional del fenómeno de explosiones

Variable	Símbolo	Dimensión [†]
Independiente		
Energía liberada en la explosión [‡]	W	FL
Distancia desde la fuente hasta sensor	R	L
Velocidad de las ondas en el suelo/roca	c	LT^{-1}
Densidad de la roca y el suelo	ρ	FT^2L^{-4}
Tiempo	t	T
Dependiente		
Desplazamiento máximo del suelo	u	L
Velocidad máxima del suelo	\dot{u}	LT^{-1}
Aceleración máxima del suelo	\ddot{u}	LT^{-2}
Frecuencia asociada a la máxima vibración	f	T^{-1}

Tomado de Dowding (2001).

[†] F , fuerza; L , longitud; T , tiempo.

[‡] Se utiliza el peso del explosivo (W) ya que es proporcional a la energía.

En Dowding (2001), existen seis parámetros o términos adimensionales –proporcionales entre sí– que relacionan las variables de la Tabla 5.3, estos son: u/R , \dot{u}/c , $\ddot{u}R/c$, ft , tc/R , $W/\rho c^2 R^3$. Los cuatro primeros términos enlazan las variables dependientes e independientes mientras que los dos últimos solo combinan variables independientes. Los seis términos adimensionales son proporcionales entre sí.

De los seis términos adimensionales los más utilizados son aquel que relaciona la velocidad máxima de partícula y la velocidad de propagación de la onda, \dot{u}/c y el que relaciona la distancia y la energía de la voladura, $W/\rho c^2 R^3$, de la proporcionalidad entre estos términos tenemos

$$\frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{W}{\rho c^2 R^3}.$$

La anterior ecuación puede ser convertida en una igualdad si se añade una constante de proporcionalidad M ; adicionalmente, eliminando un término de velocidad en ambos lados de la ecuación, se obtiene

$$\dot{u} = M \left(\frac{1}{\rho c} \frac{W}{R^3} \right),$$

que es una ecuación dimensional respecto a la velocidad, en ella ρc es la impedancia del medio, que en un medio (p.ej.: suelo) es una medida de la resistencia de la partícula a moverse. Específicamente en elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la velocidad de partícula (Aki y Richards, 1980).

Si las vibraciones viajan por un solo medio y este se supone homogéneo e isotrópico, entonces, el término de impedancia ρc es constante, y por lo tanto $M/(\rho c)$ puede ser reemplazado por una constante cualquiera, por ejemplo K . Sin embargo K no es del todo

constante, puede tener variaciones ya que la suposición, medio homogéneo e isotrópico, no siempre se cumple. Cabe notar que el término de impedancia (ρc) es susceptible a cambios en el tipo de onda (Aki y Richards, 1980). El término W/R^3 es transformado a $R/\sqrt[3]{W}$ para tener una relación directa entre las vibraciones y la distancia, obteniéndose

$$\dot{u} = K \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^\alpha, \quad (5.1)$$

La ecuación 5.1 es llamada ley de escalamiento cubico y la razón $R/\sqrt[3]{W}$ es llamada distancia escalada cubica³. En esta ecuación R es la distancia desde la voladura hasta el sitio de interés (sitio de medición) y W es la carga que genera las vibraciones. A partir de esta ecuación se pueden predecir, con cierta confianza, los valores de velocidad máxima de partícula como función de la carga (W) y la distancia (R).

Los valores K y α son constantes que deben ser estimadas. Ambas constantes dependen directa o indirectamente de las condiciones geológicas de la región. El valor K depende directamente de las condiciones geológicas ya que esta relacionado con la impedancia; El valor α teóricamente tiene un valor de -3, sin embargo puede tener variaciones que dependen de la eficiencia sísmica de la carga (porcentaje de la energía que es convertida en ondas sísmicas) y de cambios en la distancia $-R-$ debido a diferencias en los caminos de las ondas por condiciones geológicas y geotérmicas locales y regionales.

Para calcular las constantes K y α , la velocidad resultante, \dot{u} , y la distancia escalada $R/\sqrt[3]{W}$ se transforman a escala logarítmica de la siguiente manera:

$$\log_{10}(\dot{u}) = \alpha \log_{10} \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + \log_{10}(K),$$

con información de \dot{u} de los registros y $R/\sqrt[3]{W}$ de diseño y por medio de mínimos cuadrados (Norma L_2), se encuentra la mejor recta que se ajuste a los datos, y tendremos que $\log(K)$ es el intercepto con $\log \left(R/\sqrt[3]{W} \right)$ y α es la pendiente de la recta.

La ecuación 5.1 es utilizada en el control y manejo de vibraciones producidas por voladuras, sin embargo existen otras relaciones empíricas basadas en los términos adimensionales descritos (ver por ejemplo Sebos, 1999), las cuales no se han estudiado a fondo, y por lo tanto no se incluyen en este trabajo.

5.5.2. Aplicación de la ley de escalamiento cubico a los datos de la mina La Calera – Cementos del Valle

³Para diferenciarlo del escalamiento cuadrático, $R/\sqrt[2]{W}$, que ha sido encontrado experimentalmente y que es apropiado para describir el fenómeno cuando la carga es tiene una forma cilíndrica.

Para aplicar la ley de escalamiento cubico se utiliza la información de diseño de la voladura y los registros de vibración asociados a estas. Cementos del Valle suministró información de la carga total utilizada en la voladura (W_{total}) y la posición de la voladura, con este ultimo dato y la posición de la estación se puede calcular la distancia R .

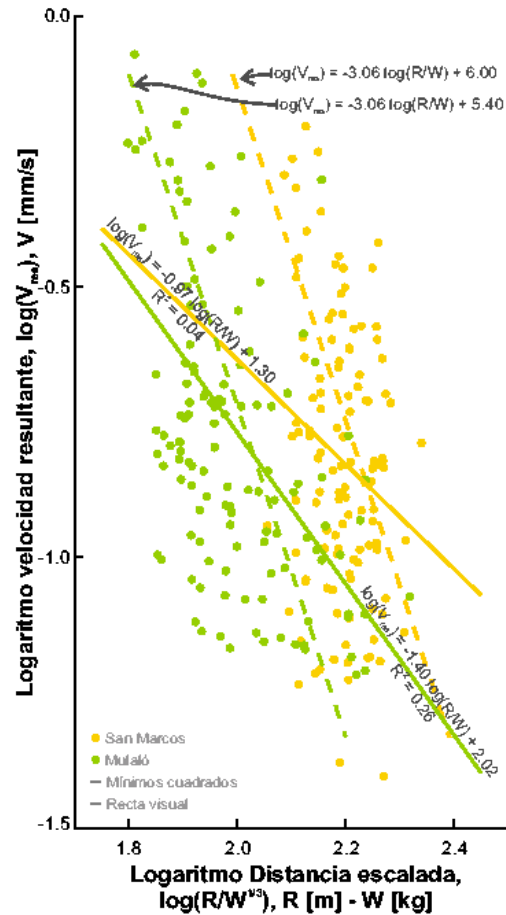
Como las constantes K y α varían con las condiciones geológicas, y como las estaciones han estado sobre dos depósitos de vertiente independientes (Q. San Marcos y Q. Mulaló), se realizó el análisis para cada caso por separado. El número de registros de vibraciones cotejados con la información de Cementos del Valle de voladuras es de 129 para la estación Mulaló y de 123 en la estación San Marcos. De estos registros se obtuvo la velocidad máxima de partícula.

Para estimar las constantes K y α se utilizó el método tradicional (descrito al final de la sección 5.5.1), que consiste en una estimación por mínimos cuadrados de dichas constantes a partir de los datos de velocidad de partícula máxima (\dot{u}) y distancia escalada ($R/\sqrt[3]{W}$). El resultado de la regresión se muestra en la Figura 5.4 en líneas continuas, donde el color verde corresponde a datos de Mulaló y amarillo a San Marcos, los datos de vibraciones son círculos del mismo color. La ecuación lineal de escalamiento cúbico (línea recta en escala log-log) para la estación Sieber en Mulaló es

$$\log(\dot{u}) = -1,40 \log\left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}}\right) + 2,02.$$

De la anterior ecuación se obtiene que el valor α es aproximadamente -1.40 y K es aproximadamente 104 (unidades??). El R^2 de la estimación por mínimos cuadrados es de 0.26; es

Figura 5.4. Ley de escalamiento cubico para los datos de la mina La Calera.



decir, esta línea recta no explica muy bien los datos⁴. La anterior ecuación puede ser expresada como la ecuación 5.1 con los valores de α y K mostrados anteriormente, obteniéndose

$$V_{\text{res}} = 104 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-1,40} \quad (5.2)$$

Para la estación en San Marcos se realizó también la estimación por mínimos cuadrados de la recta de escalamiento cúbico (línea amarilla continua en la Fig. 5.4), fue necesario dejar por fuera el 5% (6) de los datos debido a su dispersión (*outlayers*), la recta resultante es

$$\log(\dot{u}) = -0,97 \log \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right) + 1,30,$$

de esta ecuación se obtiene un valor α de aproximadamente -0.97 y K aproximadamente 20 (unidades??). El valor R^2 de estimación de esta recta es muy bajo, 0.04, lo que indica que no hay una correspondencia entre los datos y la recta estimada. La anterior ecuación puede ser expresada en términos de la ecuación 5.1 y con los valores α y K estimados por mínimos cuadrados, con lo cual se obtiene

$$\dot{u} = 20 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-0,97} \quad (5.3)$$

Debido a la baja correlación entre las rectas estimadas por mínimos cuadrados y los datos (R^2 0.26 en Mulaló y 0.04 en San Marcos) y a la aparente tendencia que tales datos muestran en la Figura 5.4, se trazaron dos rectas (líneas discontinuas) una para Mulaló (en verde) y otra para San Marcos (amarillo). La pendiente de las dos rectas se escogió visualmente sobre los datos de la estación con mayor velocidad resultante, es decir la estación Mulaló, se supuso pendientes iguales ya que las variaciones en distancia y energía liberada en las voladuras no deben variar en ordenes de magnitud. Los datos en la estación Mulaló presentan una tendencia más o menos clara, la pendiente (α) con estos datos es aproximadamente de 3.04, valor que es compatible con lo expuesto en la sección anterior. El valor $\log(K)$ también se escogió visualmente y tratando que este sea representativo de los datos.

Las ecuación de que muestran la tendencia (visual) de los datos para Mulaló puede ser

$$\dot{u} = 251190 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-3,06}, \quad (5.4)$$

y para San Marcos la ecuación puede ser

$$\dot{u} = 1000000 \left(\frac{R}{\sqrt[3]{W}} \right)^{-3,06} \quad (5.5)$$

⁴El valor R^2 indica que tan bien o mal la recta estimada se ajusta a los datos, si este valor es cercano a cero la recta no describe bien los datos y si es cercano a uno la recta los describe bien aunque esto no implica que el modelo sea el adecuado.

El cambio en el valor de K en las dos últimas ecuaciones (5.4 y 5.5), tendencia que también se aprecia en la Figura 5.4 puede tener dos explicaciones: 1) como K depende de una constante de proporcionalidad M (supuestamente iguales en las dos ecuaciones) y de la inversa de la impedancia del medio, $1/\rho c$, una posibilidad es que la impedancia en Mulaló sea mayor que en San Marcos, esto implicaría mayores velocidades de onda o densidad en el sitio de medición en Mulaló; 2) que la diferencia entre la energía liberada y el peso total explosivos (cambios en diseño de voladuras) haya cambiado en el periodo que funcionó la estación Sieber (Mulaló) respecto a los datos de San Marcos. En la siguiente sección se discutirán otras posibles explicaciones a esta observación.

5.5.3. Dispersión en la distancia escalada

Cuando se gráfica la velocidad máxima resultante (\dot{u}) contra la distancia escalada cubica ($K(R/\sqrt[3]{W})^\alpha$, Figura 5.4) o cuadrática ($K_\beta(R/\sqrt[2]{W})^\beta$), en escala normal o logarítmica, se puede ver que existe dispersión entre la recta estimada (mínimos cuadrados o visual) y los datos. Esta dispersión puede deberse a varios factores como:

- **Factores asociados con el medio**

- las condiciones geológicas (presencia de fallas locales) y geotécnicas ,
- las fluctuaciones del nivel freático,

- **Factores asociados con la voladura**

- la geometría de los barrenos y su orientación
- las condiciones de confinamiento de la carga (Rendimiento de los explosivos)
- el tipo de explosivo utilizado,
- los tiempos de retardo entre cargas,

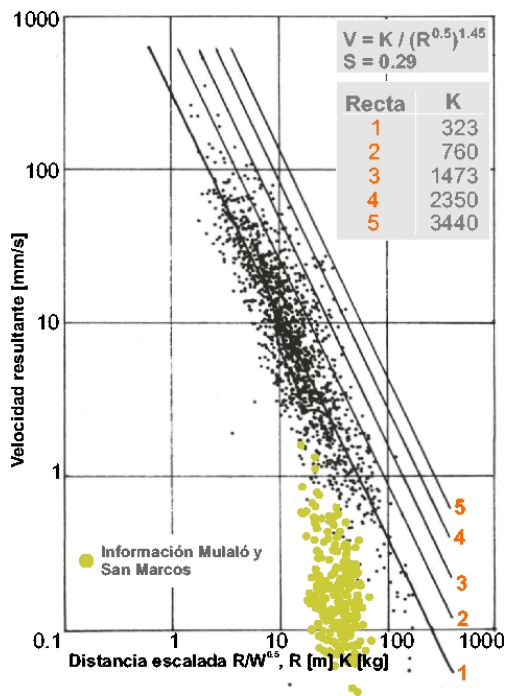
- **Otros factores**

- cobertura de los datos,
- diferentes tipos de onda en los cuales está presente el máximo resultante, como las de cuerpo (P y S) y las de superficie (R y L),
- errores en las mediciones o durante el análisis de la información, (Persson et al., 1994).

Los dos factores que podrían ser más importantes en la dispersión de los datos en la Figura 5.4 son:

1. La correlación entre la carga total (W_{total}) con la velocidad resultante máxima (\dot{u}),
2. resolución de la información.

Figura 5.5. Comparación de las relaciones de atenuación de la USMB (Persson et al., 1994, pág. 362) y los datos de las voladuras registradas en San Marcos y Mulaló



En cuanto al primer factor, la correlación entre la carga total y la velocidad resultante máxima no es correcta ya que no se detona todo el explosivo instantáneamente en un solo punto, sino que se recurre a distribuir el explosivo en una cantidad de barrenos que son detonados en intervalos de tiempo regulares. El procedimiento adecuado es correlacionar la velocidad resultante máxima con la máxima cantidad de explosivos detonado por retardo⁵. Sin embargo, la información detallada de la disposición y secuenciación de barrenos no fue suministrada por Cementos del Valle.

El segundo factor –resolución de la información–, se presenta en la Figura 5.5, en esta se gráfico la información de este trabajo (puntos amarillos, en la forma cuadrática) y las relaciones de atenuación para voladuras realizadas por la USBM (*U.S. Bureau of Mines*). El punto importante es que la información de distancia escalada cuadrática de los datos de la mina La Calera están concentrados solamente en un orden de magnitud debido a que las distancias y cargas no varían mucho, con lo cual la observación del fenómeno no es adecuada.

5.6. Reducción de niveles de vibraciones en el suelo causados por las voladuras

5.6.1. A partir de las relaciones empíricas

Las relaciones de equivalencia mostradas en la sección 5.5.1, y de nuevo incluidas aquí (ecuación 5.6) establecen una relación entre la causa y el efecto en las voladuras. Los efectos –vibraciones

⁵También se suele utilizar la máxima cantidad de explosivos detonados en ventanas de 8 ms (USACE, 1989).

y frecuencias asociadas– que aparece en la parte izquierda de la ecuación 5.6, pueden ser reducidos modificando una o mas de las variables asociadas con la causa (W o R) en la parte derecha de la misma ecuación.

$$\left(\frac{u}{R} \propto \frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{\ddot{u}R}{c} \propto ft \right) \propto \left(\frac{tc}{R} \propto \frac{W}{\rho c^2 R^3} \right) \quad (5.6)$$

Estas relaciones (5.6) se cumplen para cualquier tipo de carga (concentrada o cilíndrica) y distancia. Sin embargo, si se construyen ecuaciones de predicción con estas relaciones (p.ej.: la ley de escalamiento cubico) solo serían validas para cargas concentradas o a una distancias suficientemente grande de la voladura coma para ser considerada concentrada.

En la ecuación 5.6, las vibraciones (desplazamiento, velocidad y aceleración) estan relacionadas con la fuente y trayectoria (W y R) de la siguiente forma:

$$\left(\frac{u}{R} \propto \frac{\dot{u}}{c} \propto \frac{\ddot{u}R}{c} \right) \propto \left(\frac{W}{\rho c^2 R^3} \right).$$

En esta ecuación, si mantenemos la distancia R constante y variamos la carga W , el desplazamiento, la velocidad y la aceleración resultante (u , \dot{u} y \ddot{u} respectivamente) varían proporcionalmente, es decir una reducción en la carga implica una reducción con la misma proporción en las vibraciones. Por otro lado, si mantenemos la carga W constante y variamos la distancia R , la variaciones entre las vibraciones no son proporcionales, es decir si variamos la distancia, por ejemplo alejándonos, se espera que las aceleraciones varíen menos que la velocidad y aun menos que la aceleración.

Para regular los niveles de las vibraciones se puede controlar la distancia (R) o la carga (W). Sin embargo, la distancia es un parámetro que no se varia, ya que esta determinado por la ubicación de la obra civil o mina, entonces el único parámetro que fácilmente se puede cambiar es el tamaño de la carga.

La frecuencias asociadas a las vibraciones están relacionadas en la ecuación 5.6 en el cuarto y el quinto termino, entonces tenemos que

$$(ft) \propto \left(\frac{tc}{R} \right),$$

esto indica que para aumentar el valor de la frecuencia f (situación que es favorecida en la normatividad internacional aumentando los niveles de velocidad admisibles) hay que disminuir la distancia desde la fuente hasta el sitio de interés (R), aumentando a la vez los niveles de vibración –situación no deseable.

5.6.2. Recomendaciones generales para la reducción de vibraciones

Existe una gran cantidad de recomendaciones para la reducción de los niveles de vibraciones producidos por voladuras; sin embargo, se incluirán unas pocas encontradas en Dowding (2001); Persson et al. (1994); USACE (1989); OCE (1972) que el autor considera adecuadas para este proyecto.

En general, la reducción de los niveles de vibración se realiza adaptando, o ajustando los métodos, patrones de barrenos, esquemas de carga y de ignición, y teniendo en cuenta que las vibraciones dependen de

- la cooperación entre cargas, es decir la adición constructiva y destructiva de las ondas producidas por las cargas,
- las condiciones de confinamiento,
- las características de la roca,
- la distancia desde el sitio de la voladura hasta el sitio de interés,
- las características geológicas y geotécnicas.

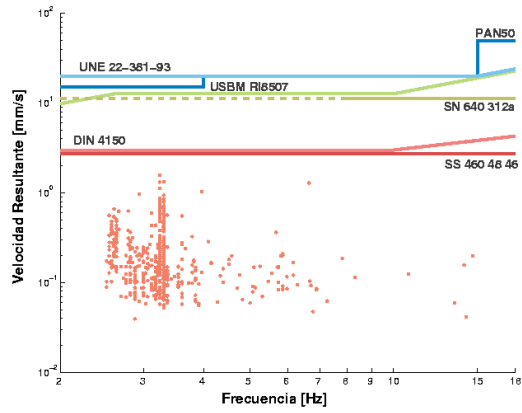
Los métodos comúnmente usados para reducir la vibraciones se basan en la reducción la cantidad de explosivo por unidad de tiempo y en la adición destructiva de las ondas (cooperación entre cargas), esto se logra por medio de

- la adaptación de los patrones de ignición con el fin de que las cargas estén repartidas en un intervalo mayor de tiempo,
- la reducción del número de barrenos y su diámetro,
- el uso de secuencias en cada barreno, con lo cual se divide la carga en mas intervalos de ignición,
- el desacople de las cargas, esto es utilizar diámetros menores de explosivos que el diámetro del barreno (no aplicable a lechadas explosivas).
- la división de un banco grande en varios pequeños.

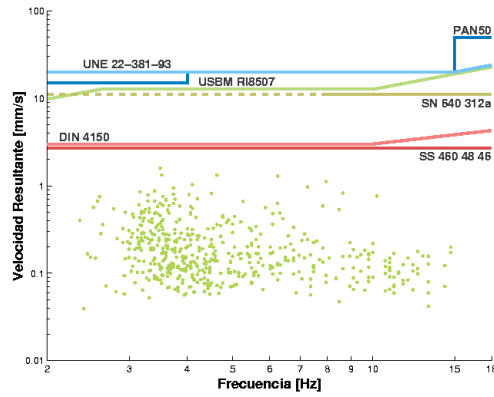
Otra recomendación encontrada es que en el momento de la detonación debería haber el menor confinamiento posible, esto se logra por medio del

- incremento de la inclinación del barreno,
- disminuyendo la distancia entre la cara libre y el barreno mas cercano.

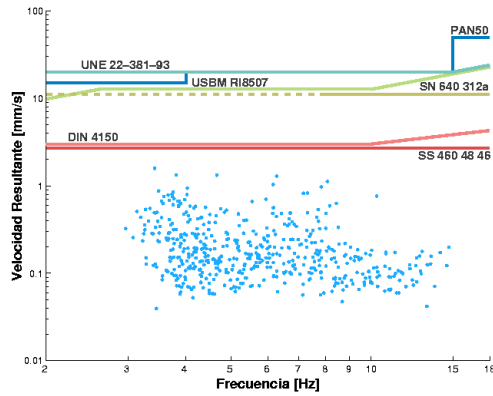
Figura 5.3. Conformidad con las normas



-a- Fourier



-b- Bisección



-c- Frecuencia instantánea