

Determinación de distancias seguras para operaciones de prospección sísmica

Jaime Checa

Jefe de Geofísica de HOCOL S.A.

Expresidente de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo.

1. INTRODUCCION

El método sísmico de exploración consiste en el registro de las reflexiones que se producen al generar vibraciones artificiales en la superficie. Es el método geofísico por excelencia para obtener imágenes del

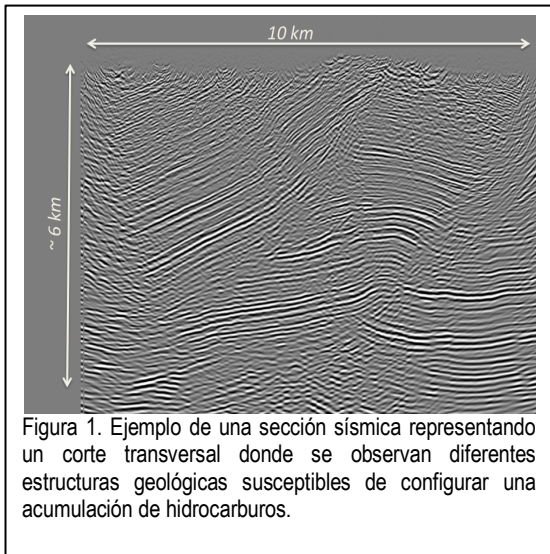


Figura 1. Ejemplo de una sección sísmica representando un corte transversal donde se observan diferentes estructuras geológicas susceptibles de configurar una acumulación de hidrocarburos.

subsuelo a grandes profundidades y es un elemento clave en la prospección de recursos hidrocarburíferos. La figura 1 ilustra una sección sísmica típica en un área de Colombia, donde se observa la geometría aproximada del subsuelo y pueden identificarse diferentes estructuras geológicas como pliegues y fallas.

La fuente de energía con que se crean las vibraciones suele ser la caída de un objeto pesado, la detonación de pequeñas cargas de explosivos especiales (sismigel) y también camiones vibradores de diversas características (Vibroseis).

Hacia mediados de la década de los 90, se suscitaron inquietudes recurrentes de las comunidades atribuyendo a la actividad de prospección sísmica daños ambientales de toda índole. Se generó una enorme conflictividad social y aumentaron los reclamos de comunidades exigiendo compensaciones económicas. Dicha conflictividad ha regresado en los últimos años y amenaza de manera real y preocupante el desarrollo normal de la actividad petrolera en Colombia.

Las palabras del Dr Alberto Sarria en 1996 ilustran la situación que se vivía para la época pero sin duda parecieran haber sido escritas hoy día:

“En Colombia a la detonación de las cargas empleadas para la exploración sísmica se les ha intentado asignar propiedades destructivas casi mágicas que van en contra de las leyes naturales y así surgen confusiones que para un funcionario público mal informado y siempre ocupado, le restan capacidad de acción y le estimulan la toma de decisiones equivocadas que perjudican en el corto plazo a los exploradores y desalientan a la industria petrolera, con el agravante de que en el largo plazo perjudican al país porque si por agotamiento de los yacimientos actuales Colombia debe importar combustibles, el nivel de vida de los colombianos decaerá porque el producto per cápita se reducirá apreciablemente.

Se escucha que los disparos de investigación acaban con las fuentes de agua, que afectan las construcciones de manera grave, que reducen la producción lechera de los hatos, que afectan la frecuencia con que ponen huevos las gallinas, que matan los peces de estanques a cien o mas metros de distancia y que pueden producir deslizamientos de ladera. Es demasiado difícil que en condiciones de ocurrencia tan puntual y tan corta en el tiempo ocurran estos efectos de manera que afecten regiones enteras.

Hay, entonces, un problema cuya trascendencia no puede soslayarse y sobre el cual hay que hacer claridad para evitarle grandes males al país. Ese es el objeto de este escrito.”

Dicha problemática llevó a la conformación de un comité interinstitucional que tras rigurosas deliberaciones técnicas expidió la llamada Guía Ambiental para la adquisición de programas sísmicos Terrestres (1997), documento que contiene una descripción precisa de la actividad, sus posibles impactos y las correspondientes medidas de manejo ambiental”.

Uno de los aportes de la Guía Ambiental fue la formulación de una tabla de distancias seguras a elementos sensibles como viviendas y obras de infraestructura que ha venido siendo utilizada como

referente a nivel nacional por espacio de 20 años, pero que ha sufrido modificaciones por parte de las autoridades ambientales regionales, todo ello sin que se haya abordado de manera rigurosa el origen de dichas distancias y su fundamento técnico.

El objetivo del presente artículo es presentar un brevísimo resumen de este tema, abordando elementos prácticos y complementando la discusión con mediciones reales en el campo, buscando proveer elementos concretos que ayuden a evitar la especulación y ligereza con que en ocasiones se discute esta problemática en ambientes no científicos.

2. BREVE MARCO TEORICO

El daño que pueden llegar a producir las detonaciones utilizadas en minería sobre estructuras de todo tipo es un tema que ha sido estudiado profusamente por más de 80 años y existe abundante literatura que describe con lujo de detalles la forma de aproximarse al tema. Todos los conceptos desarrollados en minería son aplicables a la prospección sísmica con la obvia salvedad de que las detonaciones sísmicas son drásticamente menores que aquellas usadas regularmente en minería.

El movimiento de las partículas de la superficie debido al paso de un tren de ondas producido por una fuente de energía puede describirse por la amplitud del desplazamiento, su velocidad, su aceleración y su frecuencia.

El trabajo empírico de decenas de años (**Duvall, Fogelson, Iverson**) ha permitido establecer que la velocidad pico de partículas – PPV – es la variable que puede asociarse al potencial daño sobre una estructura como resultado de una vibración y por lo tanto se busca establecer distancias seguras para evitar la vibración excesiva. La ecuación más aceptada que describe la dependencia entre distancia y PPV es: (**Bahdari**)

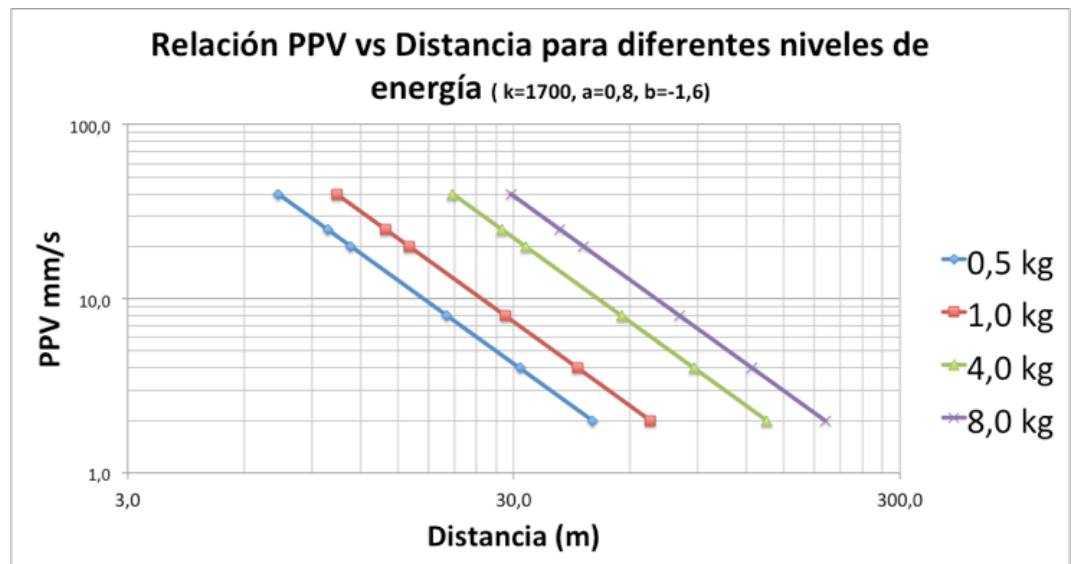


Figura 2. Gráficos de PPV vs distancia en escala logarítmica que ilustran en qué medida aumenta la distancia de seguridad cuando aumenta la energía de la fuente. Ecuación (1).

$$PPV = kW^a D^b \quad (1)$$

Donde

PPV: Velocidad pico de partículas en mm/s

D: Distancia a la fuente en m

W: Carga explosiva en kg

K,a y b: Coeficientes que dependen de las condiciones particulares de cada área y se determinan experimentalmente.

Si a manera de ejemplo, hacemos:

$$K = 1700$$

$$a = 0,8$$

$$b = -1,6$$

Distancia mínima teórica para mantener PPV por debajo de 10 mm/s

Q (Kg)	D (m)
0,5	17,5
1	24,8
2	35,0
4	49,6
8	70,1

Tabla 1. Distancias mínimas teóricas para no sobrepasar un nivel de vibración de 10 mm/s, para diferentes cantidades de carga. ($k=1700$, $a=0,8$, $b=-1,6$)

Podremos calcular la PPV esperada para una detonación de 6 kg de explosivo a 100 m de distancia así:

$$PPV = 1700 \cdot 6^{0,8} \cdot 100^{-1,6} = 4,5 \text{ mm/s}$$

Alternativamente podríamos despejar la distancia y obtener la siguiente expresión:

$$D = \left(\frac{PPV}{kW^a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2)$$

La ecuación [2] es útil para encontrar la distancia mínima requerida para mantenerse por debajo de cierto nivel de PPV, dada una cierta carga explosiva. Por ejemplo, si se fija un valor máximo de velocidad de partículas de 10 mm/s, las distancias seguras para diferentes tamaños de carga son las que se relacionan en la Tabla 1. Nótese cómo un aumento de 4 veces en la carga (de 2 a 8 kg) implica apenas la duplicación de la distancia segura (de 35 a 70 m).

Ahora, si se mantiene la carga constante durante un experimento y llamamos $K=kW^a$, entonces (1) puede escribirse así:

$$PPV = KD^b \quad (3)$$

Donde la relación entre PPV y distancia dependerá de dos constantes empíricas (K y b) que se determinan experimentalmente en el terreno como se explicará más adelante. (**Rappin**)

Hasta el momento, se ha establecido que el nivel de vibraciones producido en el terreno (y eventualmente

transferido a una estructura) por la detonación de una carga W disminuye exponencialmente con la distancia.

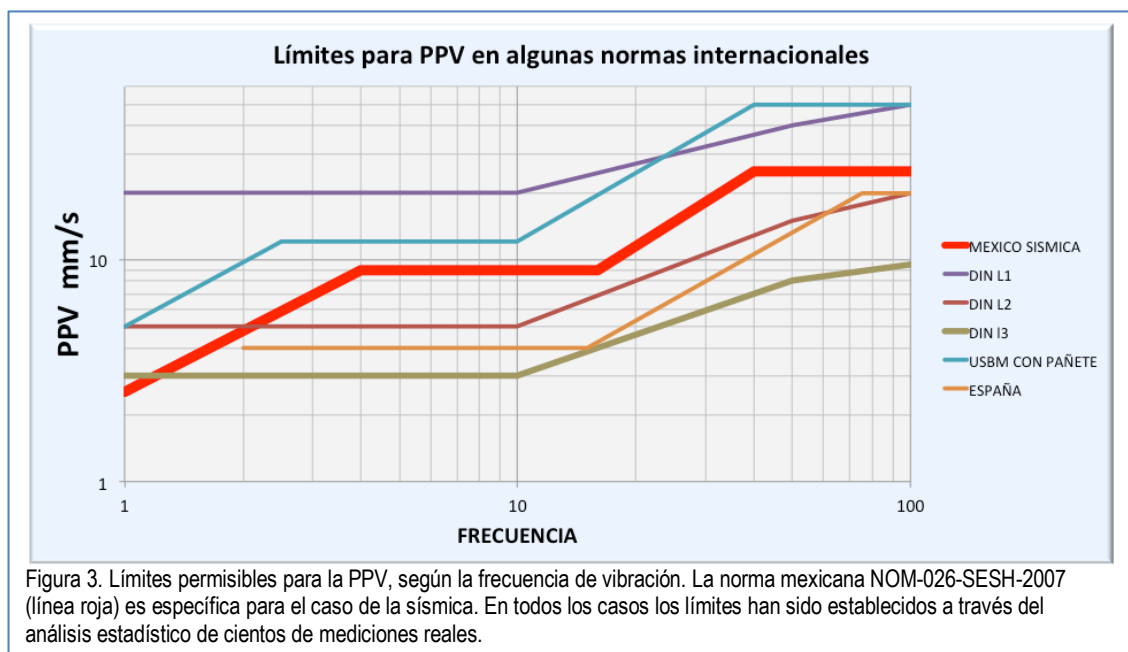
Se abordará ahora el tema de la limitación de la velocidad pico de partículas -PPV- como medida preventiva y de control.

3. REGULACIONES INTERNACIONALES

Sin excepción, todas las normas internacionales reconocen a la Velocidad Pico de Partículas como el parámetro que debe regularse para prevenir la ocurrencia de daño. Las normas entonces se orientan a especificar un límite máximo para la PPV. Reconociendo que las frecuencias bajas poseen un mayor poder destructivo, dicho límite suele ser más restrictivo para las frecuencias bajas, de manera que generalmente se especifica como una línea escalonada, por debajo de la cual el usuario debe mantenerse. La figura 3, contiene una selección de varias de las normas internacionales vigentes y que son de amplia aplicación. Se destaca la norma mexicana, que fue adoptada en 2007 y está contenida en la norma técnica NOM-026, por la cual se regula la prospección sísmica en territorio mexicano.

Los valores límite han sido establecidos a través de la medición de cientos de vibraciones experimentales en muchas de las cuales se ha llegado a provocar la rotura de los elementos estructurales objeto de la prueba (**Siskind, Chapot**).

4. APLICACIÓN PRACTICA



Con el fin de comprobar la validez del marco teórico referido, se presentan a continuación dos experimentos con diferentes fuentes, orientados a:

1. Medir la velocidad de partícula generada por una fuente para varias distancias y su frecuencia asociada.
2. Verificar la relación entre PPV y Distancia y determinar las constantes K y b.

Las mediciones se tomaron usando un sensor de tres componentes SUMMIT M VIPA, diseñado especialmente para este tipo de monitoreo. El sensor permite la lectura del valor de PPV en cada una de las tres componentes de movimiento así como las frecuencias a que están asociados dichos valores pico. Figura 4.

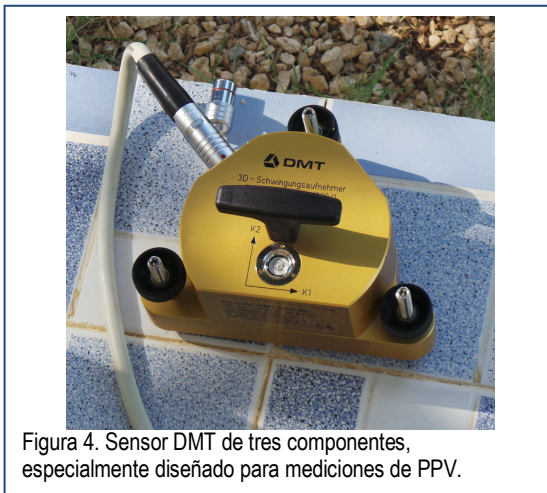
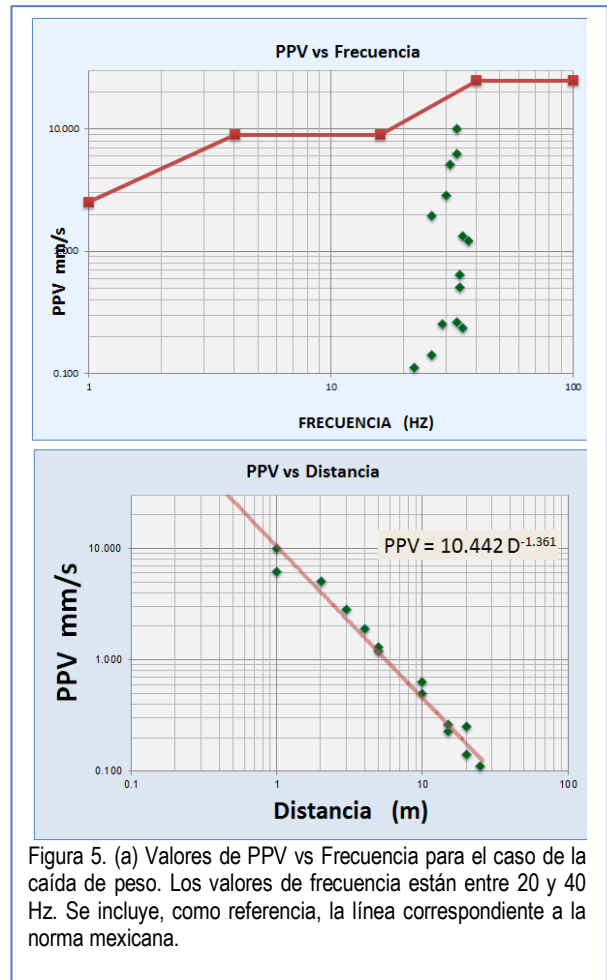


Figura 4. Sensor DMT de tres componentes, especialmente diseñado para mediciones de PPV.



Los datos medidos confirman el comportamiento esperado.

Caso 1. Caída de un peso

En este caso la fuente es la caída de una pequeña roca desde una altura aproximada de 1.5 metros. Se midieron las vibraciones sobre un piso de cemento, variando las distancias entre 1 m y 30 m.

La figura 5 superior muestra los valores de PPV graficados contra la frecuencia dominante. Las frecuencias varían entre 20 y 40 Hz y presentan relativamente baja dispersión.

Por su parte, la figura 5 inferior, ilustra la relación entre las distancias y el nivel de vibración. El uso de la escala log-log evidencia claramente un comportamiento lineal, que puede caracterizarse por la ecuación:

$$PPV = 10.442D^{-1.362}$$

Caso 2. Fuente vibratoria

Se utilizaron 2 vibradores sísmicos INOVA tipo UNIVIB. Se vibró con un barrido lineal de 12 segundos entre 8 y 80 Hz, usando un 50% de la fuerza. Se midieron los valores de PPV para distancias entre 2 m y 100 m del elemento de interés usando primero un solo vibro y después los 2 vibros simultáneamente. Finalmente se realizaron medidas utilizando los dos vibros simultáneamente al 75% de la fuerza.

Para el caso de una fuente vibratoria con un solo vibro operando al 50% de la fuerza. La figura 6 muestra los gráficos de PPV vs frecuencia y PPV vs Distancia, en escala log-log. En el primero de ellos se aprecia como los valores de frecuencia se encuentran preferentemente en el rango de 20 a 40 Hz. La norma

mexicana indicaría para estos datos un límite de PPV de 15 mm/s aproximadamente. Por su parte el gráfico de PPV vs Distancia, exhibe una clara tendencia lineal que permite determinar las constantes K y b y por lo tanto la ecuación analítica correspondiente. Dicha línea nos indica que la distancia de seguridad, para garantizar un PPV menor de 15 mm/s es de 3 metros aproximadamente. Nótese que esta distancia es considerablemente menor que la distancia especificada

resultan extremadamente conservadoras.

El mismo análisis realizado para el caso de dos UNIVIBs operando simultáneamente al 50% fuerza, arroja resultados similares al igual que el caso de dos vibros operando al 75% de la fuerza. La figura 7 muestra los tres casos en un solo gráfico, donde se evidencia el comportamiento esperado de la línea recta, que es un desplazamiento hacia la derecha a medida que se incrementa la energía. Para el mismo límite de 15 mm/s la distancia segura para usar dos vibros al 75% pasa a ser del orden de 7 metros.

5. COMENTARIOS FINALES

Los conceptos ilustrados permiten determinar de manera objetiva las distancias seguras que deben observarse para minimizar el potencial de daño de una vibración causada por una fuente de energía en sísmica. En los dos casos analizados se confirmaron las relaciones esperadas entre distancia, energía y nivel de vibraciones. Esto comprueba que la determinación de distancias seguras es un proceso medible, que puede y debe estar exento de apreciaciones subjetivas.

No existe en Colombia una norma que especifique niveles de vibración admisibles en sísmica. Existen numerosos trabajos de análisis de vibraciones (especialmente relacionados con actividades de minería) que se remiten a las numerosas normas internacionales citadas (**Benjumea**). Sería importante que se acometieran campañas de mediciones de PPV en diferentes áreas y sobre diferentes escenarios geológicos con el fin de ampliar la base de conocimiento y estar en capacidad de formular nuestra propia regulación.

Como parte del experimento se realizaron mediciones de vibración ocasionada por algunas detonaciones de sismigel en un programa de adquisición sísmica. Para cargas máximas de 1,800 gramos a distancias entre 100 y 150 m, los valores de PPV no sobrepasaron los 3 mm/s, valores muy inferiores a las vibraciones máximas especificadas en la mayoría de las regulaciones internacionales.

Vale la pena no perder de vista que las detonaciones usadas en sísmica son órdenes de magnitud más pequeñas que las voladuras utilizadas habitualmente en minería y que su impacto está muy lejos de llegar a producir impactos catastróficos como se ha querido hacer ver desde algunos sectores desinformados.

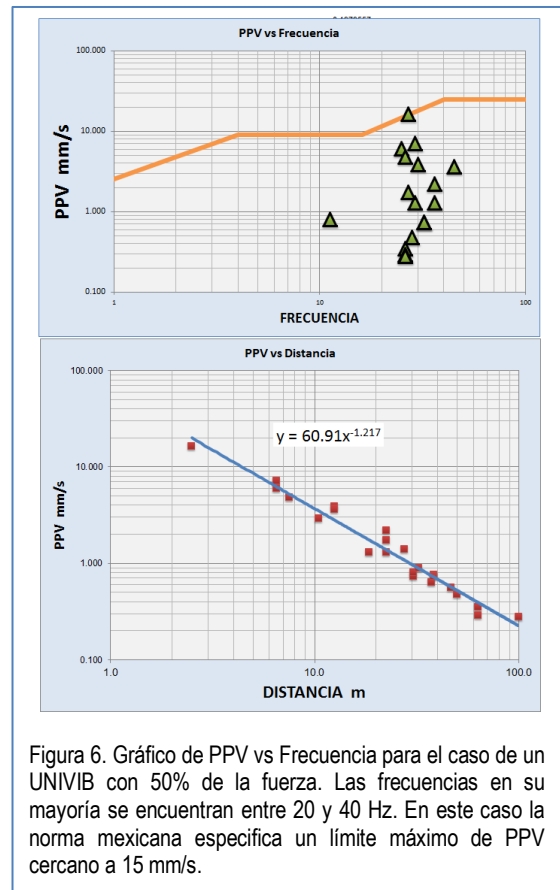


Figura 6. Gráfico de PPV vs Frecuencia para el caso de un UNIVIB con 50% de la fuerza. Las frecuencias en su mayoría se encuentran entre 20 y 40 Hz. En este caso la norma mexicana especifica un límite máximo de PPV cercano a 15 mm/s.

en muchas de las regulaciones colombianas que

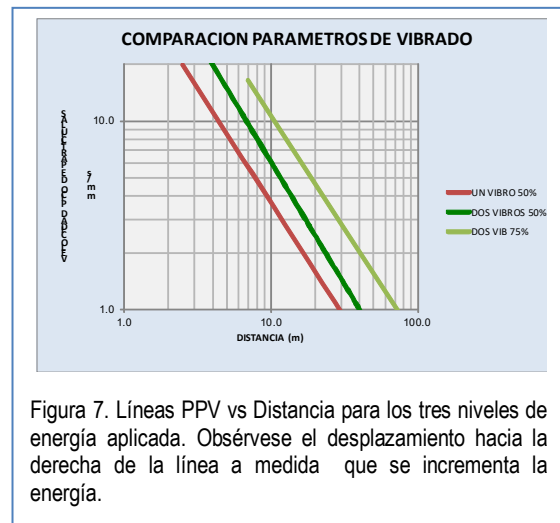


Figura 7. Líneas PPV vs Distancia para los tres niveles de energía aplicada. Obsérvese el desplazamiento hacia la derecha de la línea a medida que se incrementa la energía.

BIBLIOGRAFIA

Badhari, S. Engineering Rock Blasting Operations, 1997, Pag 303.

Benjumea, J. Vibraciones causadas por actividad humana: caracterización, efectos y manejo en la Ingeniería Civil. U del Valle, 2003

Chappot, P; Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux. France, 1981

Duvall, W; Fogelson, D. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations. US Bureau of Mines, 1968

Iverson-S; Kerkering-C; Hustrulid Application of the

NIOSH-modified Holmberg-Persson approach to perimeter blast design. Proc 34th Ann Conf Explos Blasting Tech 2008 Jan; 2:1-33

Ministerio del Medio Ambiente. Guía básica ambiental para programas de exploración sísmica terrestre. Bogotá, 1997

Rappin, P. Faure, C. Determination of safety distances and source monitoring during land seismic acquisition. Total Exploration and Production, Geophysical Operations and technology, France

Sarria, A., Exploración geofísica y medio ambiente. Publicación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Los Andes. Bogotá.

Secretaria de Energía de México, NORMA Oficial Mexicana NOM-026-SESH-2007, Lineamientos para los trabajos de prospección sísmológica petrolera y especificaciones de los niveles máximos de energía. México, 2007.

Siskind D., Stagg S., Kopp J. W., and Dowding C. H., Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting", RI 8507, Bureau of Mines, Report of Investigations, 1980



Figura 8. Experimento Caso1. Una roca de aproximadamente 5 kg de peso se deja caer desde una altura de 1.5 m a distancias sucesivamente mayores del sensor.



Figura 9. Experimento Caso 2. Fuente utilizando dos **UNIVIBs** de 26,000 lb. La prueba se realizó en cercanías de la población de Sopó, en Cundinamarca. Se registraron vibraciones a distancias variables entre 2 y 100 metros de un bebedero de concreto. Se vibró con barrido lineal de 12 segundos de duración entre 8 y 80 Hz.