

SEGUIMIENTO Y ANÁLISIS DE LA MEDICIÓN  
DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS  
GENERADAS POR VIBRACIONES SÍSMICAS  
EN LA LÍNEA 13 DEL PROYECTO DE  
ADQUISICIÓN GEOFÍSICA VSM 2D-2017 EN  
EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA.



MARTIN ALFONSO DIRGUA ANGARITA

2018

---

**SEGUIMIENTO Y ANÁLISIS DE LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS  
GENERADAS POR VIBRACIONES SÍSMICAS EN LA LÍNEA 13 DEL PROYECTO DE  
ADQUISICIÓN GEOFÍSICA VSM 2D-2017 EN EL DEPARTAMENTO DEL TOLIMA.**

**MARTIN ALFONSO DIRGUA ANGARITA**

**Trabajo de grado modalidad práctica empresarial para optar al título de INGENIERO  
GEÓLOGO**

**Director:**

**Fredy Alexander Fonseca Benítez**

**Ingeniero Geólogo M.Sc.**

**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA**

**FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO**

**ESCUELA DE INGENIERIA GEOLOGICA**

**SOGAMOSO**

**2018**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION .....	8
2. JUSTIFICACION .....	9
3. OBJETIVOS .....	10
3.1.    Objetivo General.....	10
3.2.    Objetivos Específicos.....	10
4. LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	11
5. DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA .....	13
5.2.    Misión .....	14
5.3.    Visión.....	14
6. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA SÍSMICO.....	15
7. GEOLOGIA REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	18
7.1.    Historia Geológica .....	18
7.2.    Unidades Litológicas .....	18
7.3. Geología Estructural .....	22
8. METODOLOGÍA.....	24
8.1.    Recopilación de información bibliográfica.....	24
8.2.    Descripción de unidades geológicas del área de estudio. ....	24
8.3.    Generación y medición de las vibraciones.....	24
8.5.    Elaboración del informe final y sustentación del proyecto.....	24
9. MARCO TEORICO .....	25
9.1.    Vibraciones .....	25
9.2. Tipos De Ondas.....	26
9.3 Naturaleza De Las Vibraciones Y Definición De Los Límites Tolerables.....	27
10. CARACTERISTICAS DE LA FUENTE VIBRATORIA_VIBROCAMIÓN LITTON 315	
30	
10.1 Especificaciones.....	30
11. MEDICIÓN DE LAS VIBRACIONES.....	32
11.1 Instrumentación.....	32
11.2 Equipos Utilizados.....	32
12. NORMATIVIDAD.....	34

---

12.1 Normatividad Vigente.....	35
13. PRUEBAS DE VIBRACIONES .....	44
13.1. Procedimiento: .....	44
13.2. Registro en campo.....	45
13.3 Análisis De Las Señales Adquiridas .....	46
14. CONCLUSIONES .....	68
15. RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFIA .....	70
ANEXOS .....	72

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Localización regional de la zona de estudio Fuente (Vector Geophysical SAS).....	11
Figura 2 Localización de los puntos de prueba. Fuente (Vector Geophysical) .....	12
Figura 3 Logo empresa (fuete Vector Geophysical SAS).....	13
Figura 4 Localización del proyecto sísmico. Fuente (Vector Geophysical) .....	15
Figura 5 flujograma de actividades del proyecto Fuente (Vector Geophysical).....	16
Figura 6 Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio. Fuente (vector Geophysical SAS).....	20
Figura 7 Onda compresional. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	26
Figura 8 Onda de corte. Fuente (PetroBlast SAS, 2017) .....	26
Figura 9 Onda Rayleigh. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	27
Figura 10 Ficha técnica del Vibrocamión Litton 315. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	30
Figura 11 Representación gráfica del sistema de adquisición. Fuente (PetroBlast SAS, 2017) .....	33
Figura 12 Espectro de la normativa española. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	36
Figura 13 Tipos de estructuras y velocidades pico para la norma española. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	36
Figura 14 Gráfico de velocidad vs frecuencia según la norma alemana DIN 4150,1985. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	39
Figura 15 Valores admitidos por la norma alemana DIN 4150 para daños en edificios. Fuente (bacci, 2000, adaptado por berta, 1985).....	39
Figura 16 Curva límite de referencia. Fuente (PetroBlast SAS, 2017).....	41

Figura 17 Representación gráfica de la generación de ondas en el terreno. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 44

Figura 18 Distribución general de equipos de registro en campo y fuente de vibración. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 45

Figura 19 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre una vivienda. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 49

Figura 20 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 51

Figura 21 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 51

Figura 22 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 52

Figura 23 . Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 52

Figura 24 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 53

Figura 25 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 53

Figura 26 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Alemana Din 4150. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 54

Figura 27 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 54

Figura 28 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre un puente. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 57

Figura 29 . Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 59

Figura 30 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 59

Figura 31 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Alemana Din 4150.  
 Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 60

Figura 32 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 60

Figura 33 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre estructuras sensibles a vibraciones-iglesias. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 63

Figura 34 Sismograma de velocidad de particula (long, vert, trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 65

Figura 35 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 65

Figura 36 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma alemana DIN 4150. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 66

Figura 37 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)..... 66

---

## NOTA DE ACEPTACION

---

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Wilson Naranjo  
Director de Escuela

---

Jurado

---

Jurado

## 1. INTRODUCCION

Existen varios métodos geofísicos para prospección y exploración petrolera, sin embargo, el más efectivo y cada vez más utilizado a nivel mundial es la sísmica de reflexión, este método trabaja generando ondas en superficie a través de fuentes vibratorias como los explosivos y vibradores mecánicos o Vibrocamiones.

La compañía VECTOR GEOPHYSICAL, actualmente desarrolla el proyecto sísmico VSM 2D 2017, de la Agencia Nacional de Hidrocarburos – ANH, los trabajos se adelantan en el Departamento del Tolima.

De esta manera se presenta una metodología de generación de ondas la cual es amigable con el medio ambiente y no genera daño a estructuras, nacederos o manantiales cercanos a los focos de vibración, la denominamos vibración controlada a través de medios mecánicos como son los Vibrocamiones.

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

El trabajo se desarrolla entre los Municipios de Saldaña y Coyaima en el Departamento del Tolima.

## 2. JUSTIFICACION

Actualmente no se ha cuantificado de manera precisa las distancias de seguridad a estructuras (alcantarillas, puentes, viviendas, etc.) que se deben tener en cuenta en el momento de generar ondas sísmicas a través de camiones vibradores y que se propagan a través del suelo y subsuelo. Por consiguiente, se hace necesario realizar un análisis de velocidad de partículas que provee de una información idónea para nivelar los puntos de vibración a una distancia a la cual se garantice que no se va a generar ningún tipo de afectación las estructuras anteriormente mencionadas.

### 3. OBJETIVOS

El desarrollo del presente estudio se realiza a partir del cumplimiento de los siguientes objetivos:

#### 3.1. Objetivo General

Analizar los resultados obtenidos de la medición de velocidad de partículas generados por vibraciones sísmicas y establecer las distancias de seguridad que se deben tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto de adquisición geofísica VSM 2D-2017 en el departamento del Tolima.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una descripción de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio.
- Registrar los valores de velocidad de ondas P, S, R.
- Comparar los resultados obtenidos con las normas internacionales.

#### 4. LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

El trabajo se desarrolla entre los Municipios de Saldaña y Coyaima en el Departamento del Tolima. En la figura 1, se observa la localización regional y local del sitio de pruebas.

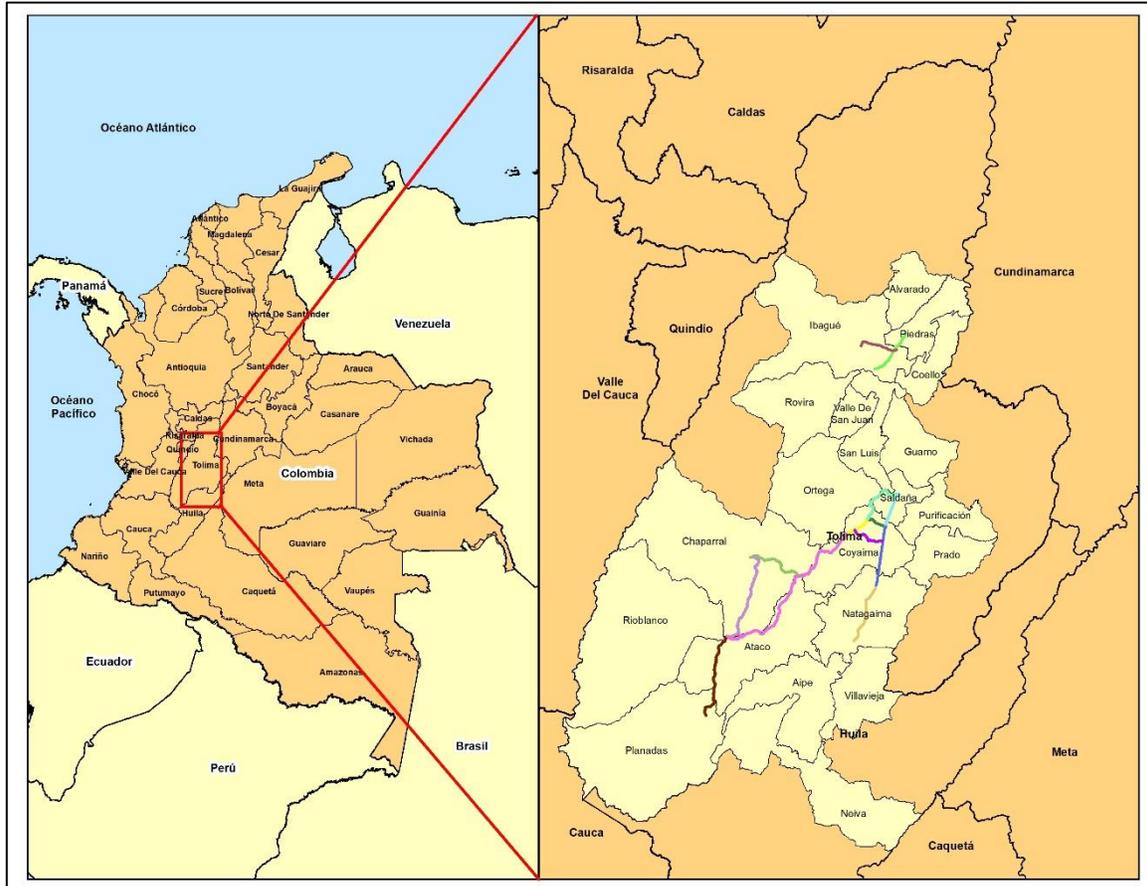


Figura 1 localización regional de la zona de estudio Fuente (Vector Geophysical SAS)

Las pruebas se realizaron en las siguientes coordenadas:

*Tabla 1*

*Coordenadas de los puntos de prueba.*

PRUEBA #	COORDENADAS	
Vibración 1	E: 486701	N: 424433
Vibración 2	E: 497645	N: 433517
Vibración 3	E: 442993	N: 383661

Fuente (Vector Geophysical)

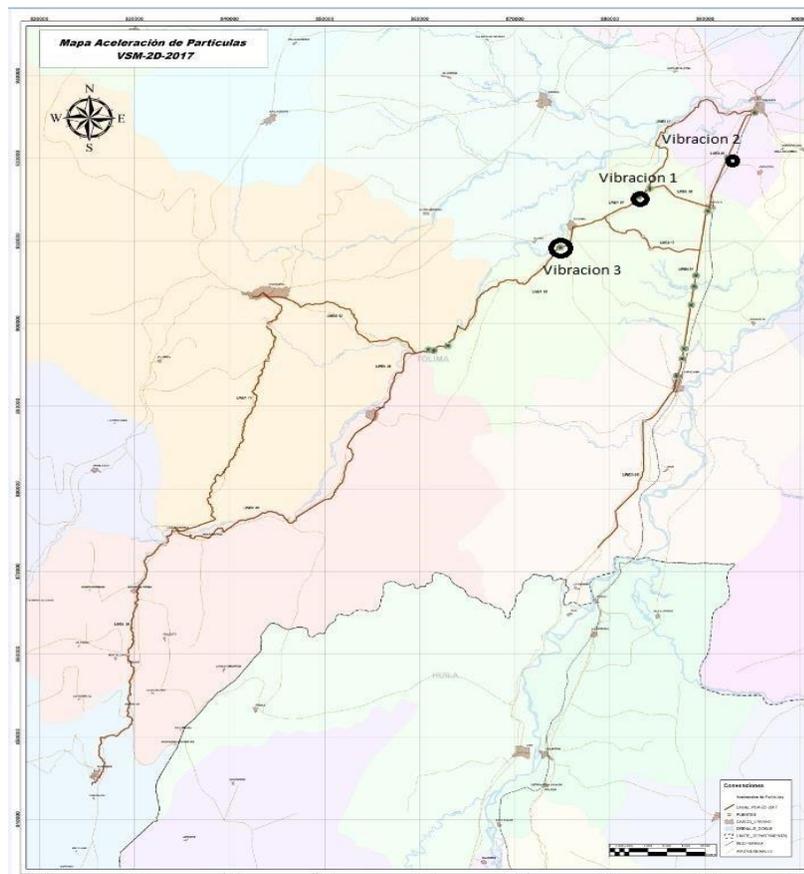


Figura 2 Localización de los puntos de prueba. Fuente (Vector Geophysical)

## 5. DESCRIPCION GENERAL DE LA EMPRESA

### 5.1. Generalidades Vector Geophysical SAS



Figura 3 Logo empresa (fuete Vector Geophysical SAS)

Empresa colombiana fundada con la capitalización de algunos empleados e inversionistas estratégicos. El alcance social principal es: Exploración y adquisición sísmica terrestre y transicional; topografía, perforación, registro y procesamiento en 2D, 3D, 4D, 2D-3C, 3D-3C y 4D-3C. Exploración geofísica terrestre y aérea el levantamiento de sísmica terrestre, exploración geológica, producción de hidrocarburos y minerales.

Vector planifica y ejecuta todas las fases de funcionamiento, adaptándose a las condiciones y ambientes en los que trabaja. Guiados por el compromiso con la seguridad y la responsabilidad social, crea oportunidades para los trabajadores locales, lo que contribuye al compromiso de los clientes de las áreas de exploración.

**Vector Geophysical S.A.S.** ha realizado más de 12.000 Km de sísmica 3D y más de 1.800 km de sísmica 2D, adquiridos en las cuencas más activas de Colombia durante la ejecución de más de 120 programas sísmicos en áreas ambientales difíciles como alta montaña y pantano, razón por la cual cuenta con todas las herramientas necesarias para dimensionar el equipo de trabajo que el Cliente requiere.

## **5.2.Misión**

Ser la empresa líder en exploración geofísica en Colombia, a través de la excelencia operacional. Un ambiente laboral óptimo con oportunidades de crecimiento personal y profesional, al mismo tiempo que trascenderemos fronteras y conquistaremos mercados; todo esto enmarcado en una conciencia ambiental y social que guía nuestro accionar

## **5.3.Visión**

Crear lazos de confianza con nuestros clientes a través del servicio de datos geofísicos con la más alta calidad. Un excelente servicio y el constante relacionamiento con los grupos de interés, para así generar valor agregado a todos los que se encuentran involucrados con las actividades de VECTOR GEOPHYSICAL S.A.S.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA SÍSMICO

La empresa Vector Geophysical desarrolla actualmente un programa de adquisición geofísica utilizando vibros en vías primarias, secundarias y terciarias en el departamento del Tolima en la cuenca del VSM con una longitud de 320 Km. lineales.

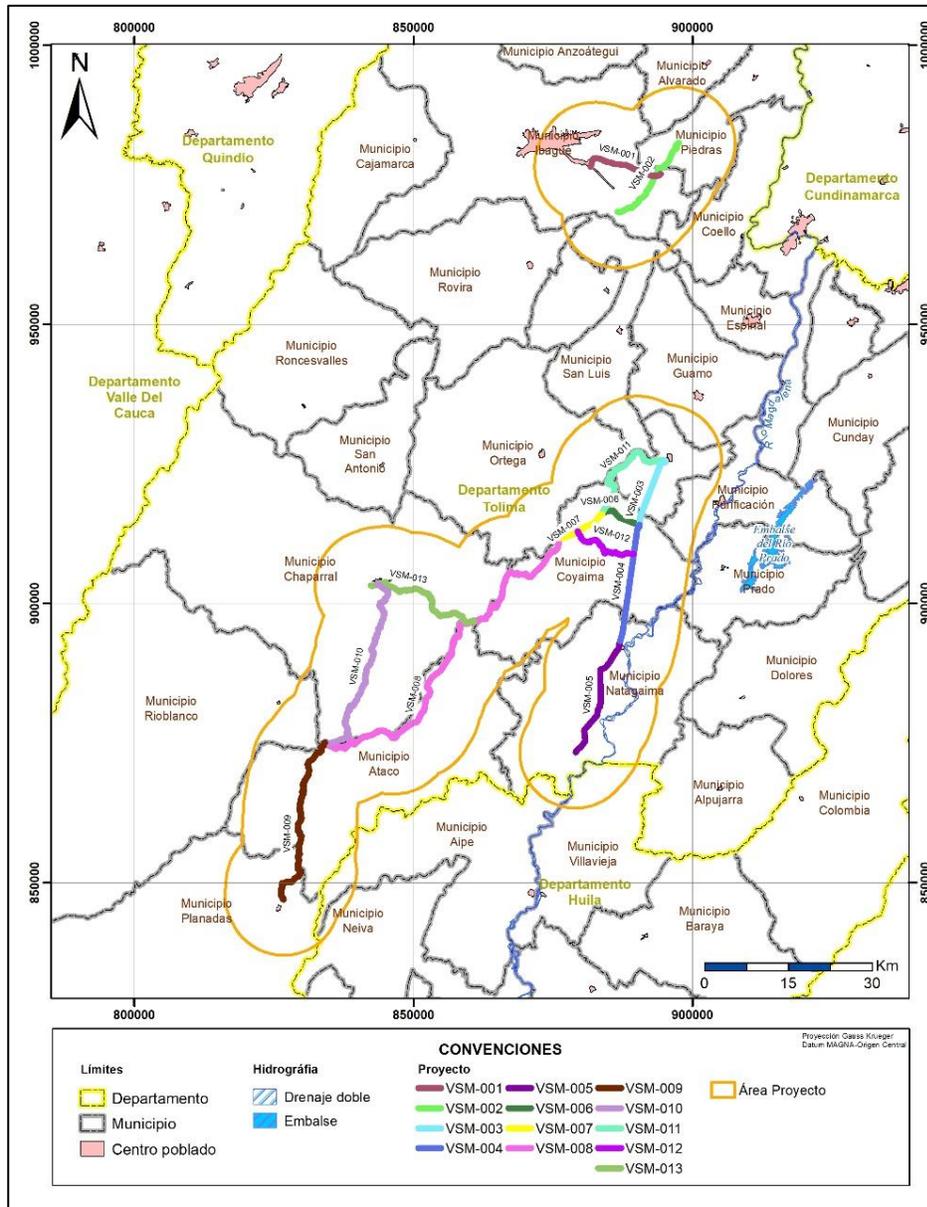


Figura 4 Localización del proyecto sísmico. Fuente (Vector Geophysical)

El Programa Sísmico con Vibros de la Cuenca Sedimentaria del VSM se desarrolla en dos zonas: Norte y Sur, en la primera se localizan dos trazados en los municipios de Ibagué y Piedras y en la segunda 11 trazados en los municipios de Saldaña, Natagaima, Coyaima, Ataco, Chaparral y Planadas

## 6.1. Etapas De Desarrollo Del Proyecto

El desarrollo de las actividades, se pueden visualizar en el flujograma

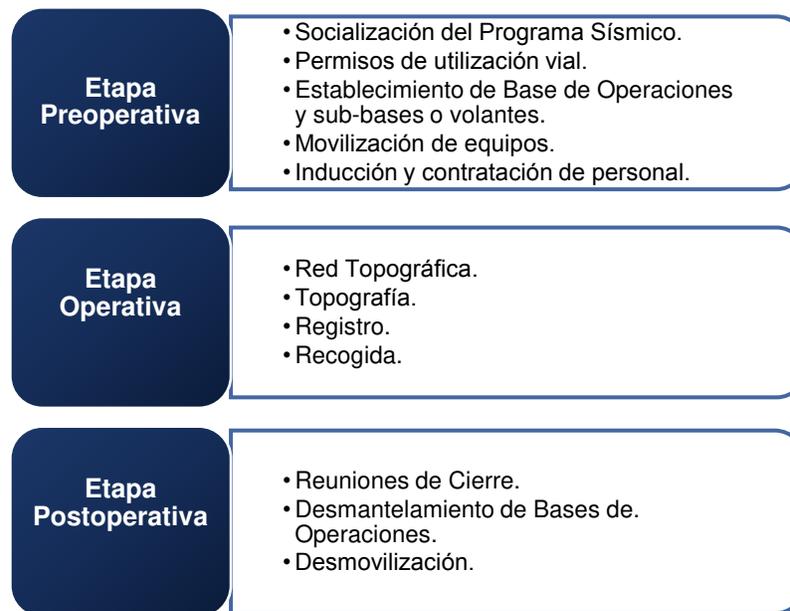


Figura 5 flujograma de actividades del proyecto Fuente (Vector Geophysical)

## 6.2. Características Técnicas

### 6.2.1. Descripción General

#### “Programa Sísmico con Vibros de la Cuenca Sedimentaria del VSM”

**Cuenca:** Valle Superior del Magdalena

**Tipo de Sísmica:** Vibros.

**Longitud del proyecto:** 320 Km lineales.

**Área de influencia:** Departamento de Tolima.

### 6.3. Parámetros geofísicos

Tabla 2 Parámetros Geofísicos de Adquisición.

Distancia entre receptoras	25 metros
Distancia entre puntos de vibración	50 metros
Número de canales	400
Tipo de Fuente	Vibración
Tiempo promedio de vibración	De acuerdo a las pruebas experimentales
Número de Vibros	Máximo 3
Número de barridos	4 (sujeto a pruebas)
Longitud del barrido	12 segundos (sujeto a pruebas)
Tiempo de escucha	5 segundos (sujeto a pruebas)
Geófonos por Estación	Ristra de 6 geófonos con frecuencia natural de 10 Hz
Tasa de muestreo	2 ms
Capacidad de vibros (VP)	De banda ancha con fuerza pico de 75.000 – 120.000 libras siempre y cuando cumplan con las exigencias ambientales y logísticas del área de trabajo

Fuente (Vector Geophysical)

## **7. GEOLOGIA REGIONAL DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Las unidades geológicas en el área están constituidas por rocas que van desde el Jurásico hasta el Reciente así: formación Saldaña (Jrsp y Jsv), stock de San Cayetano (Jsc), formación Yaví (Kiy), formación Caballos (Kic), grupo Honda (Th), y depósitos aluviales recientes (Qal). Geomorfológicamente se observan cuatro zonas principales: zona montañosa estructural denudativa (ZMED), zona montañosa Fluvioerosional (ZMF), zona colinada a semiondulada (ZCS) y una zona de valle (ZV).

### **7.1. Historia Geológica**

El área de estudio se encuentra ubicado geológicamente en la subcuenca de Girardot, donde a principios del Mesozoico se presentaron procesos distensivos que dieron lugar al ascenso de magmas que produjeron inmensos volúmenes de material volcánico, lavas y especialmente piroclastos, que se acumularon en el valle del Magdalena y en las estribaciones de la cordillera Central y Oriental, dando lugar a la formación Saldaña. Posteriormente se emplazó el cuerpo ígneo intrusivo denominado Stock de San Cayetano; en el Cretácico se depositaron sedimentos marinos dando origen a las formaciones Yaví y Caballos. Luego de terminar la Orogenia Andina se da una fase tranquila en la cual se formaron depósitos de llanura aluvial, dando origen al Grupo Honda que posteriormente se plegó por movimientos tectónicos. Los depósitos Cuaternarios se originaron por el arrastre de sedimentos de los Ríos Saldaña y Magdalena principalmente, los cuales forman terrazas y llanuras aluviales.

### **7.2. Unidades Litológicas**

El área de estudio está geológicamente constituida por rocas ígneas y sedimentarias que van como se muestra en la Tabla 1, desde el Jurásico hasta el Reciente, siendo las unidades

dominantes el grupo Honda y la Formación Saldaña. A continuación, se describen las unidades litológicas por orden cronológico (ver Columna Estratigráfica).

*Tabla 1.*

*Formaciones geológicas de la zona de estudio.*

ERA	PERIODO	FORMACIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
Cenozoico	Reciente	Depósitos Cuaternarios	Aluviales conformados por gravas, arena y lodo.
	Terciario	Grupo Honda	Interacciones de areniscas, arcillolitas y conglomerados formando rellenos de canal; color gris verdoso dominante.
Mesozoico	Cretácico	Formación Caballos	Areniscas cuarzosas, areniscas conglomeráticas, lutitas negras y grises; bancos de caliza, que tienen fósiles y concreciones calcáreas.
		Formación Yaví	Conglomerados polimícticos, areniscas y arcillolitas de color rojo violáceo dominante.
	Jurásico	Stock de San Cayetano	Rocas intrusivas de composición cuarzomonzonítica-dacítica.
		Formación Saldaña	Rocas volcánicas compuestas por tobas piroclásticas, lavas, con intercalaciones de limolitas, areniscas y calizas. Rocas Hipoabisales de composición andesítica-dacítica.

Fuente (Vector Geophysical SAS)

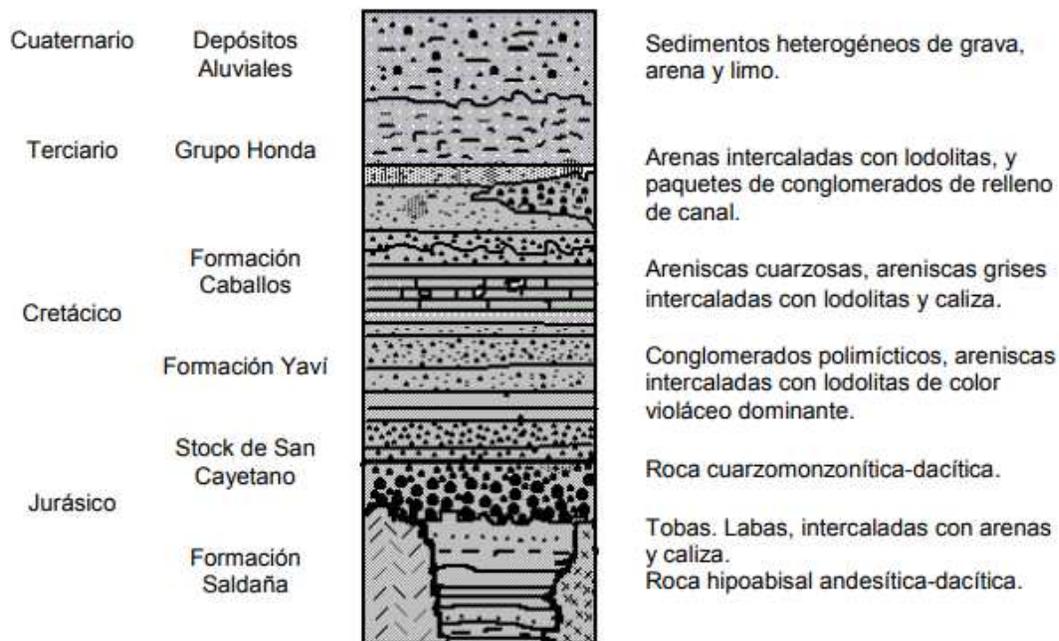


Figura 6 Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio. Fuente (vector Geophysical SAS)

**6.2.1. Formación Saldaña (Jsv, Jrsp).** Está representada por dos (2) grupos de rocas volcánicas. La primera consta de tobas piroclásticas de ceniza y lapilli de color violáceo, verde, morado y gris, aglomerados de composición lítica; flujos de lava andesítica de color gris, verde y ocasionalmente violeta, con textura porfírica y cristales de plagioclasa en matriz afanítica; intercaladas con areniscas tobáceas, areniscas feldespáticas y lutitas rojas; también se encuentran además zonas conglomeráticas con cantos de caliza, limolita, areniscas sucias, limolitas grises y verdes, lodolitas y chert; la segunda constituida por cuerpos porfíricos hipoabisales que intruyen las rocas volcanosedimentarias del grupo anterior, de tipo intrusivo de composición andesítica-dacítica, matriz afanítica con fenocristales de plagioclasa principalmente. Afloran en el área como montículos en forma dispersa.

**6.2.2. Stock de San Cayetano (Jsc).** Es un cuerpo masivo de color gris de composición cuarzomonzónica-dacítica, de textura fanerítica media a gruesa, con zonas de textura porfírica;

su composición mineral consta de plagioclasa, biotita, hornblenda y piroxeno. Generalmente se presenta muy meteorizado, generando suelos arcillo-arenosos de color rojizo; en algunos sectores se encuentra fracturado debido a controles estructurales. Este cuerpo intruye las rocas de la Formación Saldaña.

**6.2.3. Formación Yaví (Kiy).** Estas rocas reposan discordantemente sobre la formación Saldaña, contando hacia la base de conglomerados polimícticos, con cantos de tamaño variable en una matriz areno arcillosa; los cantos son de rocas piroclásticas, cuarzo, chert negro y rojo; hacia la parte intermedia se encuentran areniscas conglomeráticas con capas de areniscas de grano medio a grueso de espesor variable, presentando colores que van de gris a violeta alternando con capas de lodolitas de colores gris a violáceas; en la parte superior se encuentra una alternancia de areniscas arcósicas, arcillolitas y limolitas de color variado.

**6.2.4. Formación Caballos (Kic).** Su base está constituida por areniscas conglomeráticas, con cantos de cuarzo, chert, y escasos guijos de vulcanitas en matriz areno-arcillosa, así como niveles delgados de areniscas feldespáticas; hacia la parte media se encuentran bancos de caliza de color gris claro, caracterizado por tener concreciones calcáreas y restos fósiles de amonites y bivalvos el cual se encuentra en forma de lajas; la parte superior de la formación consta de areniscas cuarzosas, ocasionalmente conglomeráticas, con niveles delgados de limolitas con concreciones piritosas.

**6.2.5. Grupo Honda (Th).** Este grupo está constituido por intercalaciones de areniscas de media compactación, de color amarillo pardo y estratificación cruzada inclinada a plana, con lodolitas grises a pardas y en menor proporción areniscas conglomeráticas y pequeños lentes de conglomerados correspondientes a rellenos de canal constituidos por guijos de chert, cuarzo y fragmentos de rocas. La geometría de las capas es tabular a lenticular con superficies de

discontinuidad plana y levemente onduladas. Se encuentra además en contacto discordante con la formación Saldaña, las rocas cretácicas y el stock de San Cayetano.

**6.2.6. Depósitos Cuaternarios (Qal).** Representado por zonas planas, formando terrazas y depósitos aluviales de los ríos Meche, Chenche, Guaguarco, Hilarco, Saldaña y Magdalena principalmente. Estos depósitos están conformados por gravas y arenas embebidos en matriz arcillo - arenosa, no consolidados y selección regular.

### 7.3. Geología Estructural

La tectónica dominante es de tipo compresivo, con el desarrollo de grandes fallas inversas y de tipo transformacional, la cual ha tenido su formación desde el Cretáceo hasta el Cuaternario, íntimamente ligadas a los procesos orogénicos de levantamiento de las actuales cordilleras y formación de la Cuenca del Valle del Medio Magdalena.

El Valle del Río Magdalena se caracteriza por un estilo estructural compresivo de cabalgamiento y plegamiento, ocasionada por fuerzas con dirección NW-SE, originando fallas de cabalgamiento. Estos procesos generan fracturamientos y diaclasamiento, los cuales favorecen, dependiendo de las condiciones hidrometeorológicas, la descomposición acelerada de la roca y desarrollo de movimientos masales de diferente magnitud. El fallamiento presenta direcciones predominantes Norte-Sur y Noreste - Suroeste con algunos sistemas transversales asociados a fallas mayores.

La Falla del Río Saldaña (HIMAT, 1985), clasificada como de cabalgamiento, que puede involucrar únicamente sedimentos recientes, al producirse un desprendimiento de los sedimentos sobre el basamento cristalino; se extiende en dirección N 25° E desde la localidad de Buenavista hasta Coyaima, dando la sensación de desaparecer hacia el sur de Buenavista, bajo una serie de

sedimentos recientes, sin embargo, cerca de la localidad de Tamarindo aparecen afectados con su desplazamiento sedimentos de edad muy reciente, lo que presupone que esta sea una falla activa, o de actividad reciente. La falla de Zanja Honda (HIMAT, 1985), la que igual que la anterior, se encuentra afectando únicamente terrenos de la Formación Honda; por su traza paralela a la Falla de Saldaña, parece pertenecer al mismo sistema, es decir, su plano solo afecta desprendimiento del terciario sobre el basamento.

Como rasgos geomorfológicos y estructurales se encuentran los pliegues en el área Suroccidental asociados al sinclinal del Río Saldaña (Municipio de Chaparral), siendo estos sinclinales amplios y anticlinales apretados, orientados principalmente en dirección NE-SW, afectando la cubierta sedimentaria cretácica.

El anticlinal de Hilarco con eje de dirección  $N20^{\circ}E$ , y buzamiento de  $15^{\circ}N$  está conformado por las rocas del grupo Honda.

Mapa Geológico regional ver en anexos.

## **8. METODOLOGÍA**

### **8.1. Recopilación de información bibliográfica**

En esta fase se recopilará la información existente de la zona de estudio con la que cuenta VECTOR GEOPHYSICAL S.A.S relacionada con; estudios geofísicos anteriormente realizados, medición de velocidad de partículas, formaciones geológicas.

### **8.2. Descripción de unidades geológicas del área de estudio.**

Se realizará un reconocimiento de las formaciones geológicas que se presentan en la zona donde se realizará el análisis de velocidad de partículas.

### **8.3. Generación y medición de las vibraciones**

Se generan las vibraciones en el suelo teniendo en cuenta las distancias programadas y se recolectará la información obtenida este procedimiento.

### **8.4. Análisis de los resultados obtenidos de las vibraciones**

En base a la información recolectada se realizará el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas. Se hará la comparación con las normas internacionales.

### **8.5. Elaboración del informe final y sustentación del proyecto**

Como última fase se realizará el informe final con el fin de sustentar

## 9. MARCO TEORICO

La simple caída de un objeto sobre la tierra, hasta la detonación de un explosivo enterrado, o un deslizamiento súbito a lo largo de una falla geológica en profundidad causan un sismo, son eventos que se transmiten a través de los suelos ó rocas.

### 9.1. Vibraciones

Sarsby (2000), clasifica las vibraciones en tres clases:

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

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

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

Estos movimientos de propagación ondulatoria se dan a través de terrenos con una velocidad de propagación dada, y que depende de cada tipo de terreno, el cual se verá afectado por las tensiones dinámicas que la onda transporta.

Estas últimas dependen de los desplazamientos oscilatorios, respecto a su posición de reposo, que sufren las partículas del terreno a medida que una perturbación se propaga, denominándose *velocidad vibratoria*.

## 9.2. Tipos De Ondas

Las principales ondas que se propagan por la corteza terrestre incluyen dos clases las de tipo volumétrico y las de tipo superficial, a saber (Kolsky, 1963):

### 9.2.1 Deformaciones inducidas por ondas de tipo volumétrico:

**9.2.1.1 Ondas P**, longitudinales ó de compresión: Son aquellas que provocan la vibración de las partículas en la misma dirección del radio de la onda, siendo análogas a las ondas sonoras, ver figura 4.



Figura 7 Onda compresional. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

**9.2.1.2 Ondas S**, transversales o de corte: con vibración de la partícula perpendicular al radio de la onda, teniendo una velocidad inferior a la de las ondas P, y no se propagan en medios fluidos, ver figura 5.

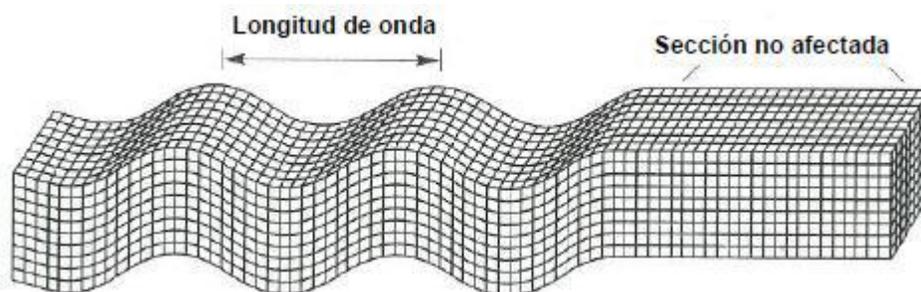


Figura 8 Onda de corte. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

### 8.2.2

## Deformaciones inducidas por ondas de tipo superficial:

9.2.2.1 *Ondas R*, o de Rayleigh: se propagan a lo largo de la superficie de la tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad, transportando la mayor parte de la energía sísmica (semejantes a las ondas que se crean cuando cae un objeto sobre la superficie de un lago), ver figura 6.

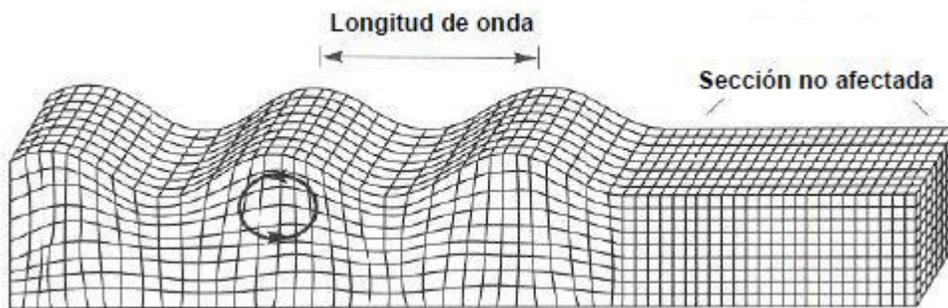


Figura 9 Onda Rayleigh. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

9.2.2.2 *Ondas L*, o de Love: Resultantes del movimiento plano horizontal de las partículas, sin presentar componente vertical.

## 9.3 Naturaleza De Las Vibraciones Y Definición De Los Límites Tolerables

Tres enfoques pueden adoptarse en la definición de límites tolerables en la respuesta de estructuras para evitar daños en las mismas.

Un criterio basado en las aceleraciones o fuerzas máximas instantáneas, otro en las velocidades máximas y otro basado en las deformaciones máximas impuestas a la estructura ante la excitación de una fuerza dinámica.

En las normas y literatura disponible, se han trabajado tradicionalmente con los dos primeros criterios, es decir el de aceleraciones y velocidad de partícula.

En ingeniería las magnitudes de las oscilaciones o vibraciones de las estructuras (frecuencias, aceleraciones, velocidades, desplazamientos...) medidas o calculadas deben evaluarse en función del grado de afectación de estas vibraciones si estas son no tolerables.

A continuación, se describirán distintos criterios de adaptación de vibraciones expuestos en diversas normas de construcción que permiten valorar su grado de afectación a la estructura.

Pueden causar deformaciones, así como pequeñas o grandes afectaciones a los edificios o a los elementos estructurales o no estructurales que los constituyen. Algunas de estas incidencias son:

- Rotura, agrietamiento o fisuración de paredes.
- Empeoramiento de patologías existentes por otras causas de elementos estructurales o no estructurales.
- Caída de elementos desde las edificaciones con los consecuentes daños en equipos o personas.

Las vibraciones continuas, además de los posibles efectos descritos anteriormente, pueden producir en la estructura problemas de fatiga, incremento de tensiones o sobre esfuerzos en los elementos de edificación.

La magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura también depende del comportamiento dinámico de esta y en particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). La probabilidad de daños por vibraciones dependen de muchos otros factores tales como:

- La duración de las vibraciones
- La cantidad de sollicitaciones a las que es sometida la estructura

- La resistencia de los materiales que constituyen la estructura.
- La calidad de la construcción – los esfuerzos estáticos preexistentes (incrementados por ejemplo por asentamientos del suelo).
- El nivel de mantenimiento y conservación de la estructura.

Aunque la mayoría de los criterios de aceptación se toman de manera independiente de la frecuencia, los valores más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia; mientras que el límite para las vibraciones lo marca la velocidad para frecuencias bajas (<100Hz), para frecuencias altas se deben observar las aceleraciones pico. A pesar de esto, la mayoría de los criterios se basan en valores de velocidades.

## 10. CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE VIBRATORIA\_VIBROCAMIÓN

### LITTON 315

#### 10.1 Especificaciones

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron dos Camiones vibradores o Vibrocamiones Marca LITTON, 315 VIBRATOR, los cuales transfieren al terreno una presión de barrido de 47.000 libras con una presión final admisible del 70% la cual se promedia en 35.000 Libras.

El equipo es totalmente hidráulico y consta de una plataforma de transferencia vibratoria rectangular de 2 x 1 metros, la cual es móvil y se adhiere al piso a través de dos pistones accionados hidráulicamente, de esta manera se trasfiere la energía de vibración al terreno en ciclos de 12 a 14 segundos y frecuencias que varían de 10 a 80Hz.

10. CARACTERÍSTICAS DE LA CARROCERÍA (EQUIPO)	
No. HOMOLOGACIÓN CHASIS	
MARCA	LITTON
REFERENCIA	315 VIBRATOR
TIPO	EQUIPO ESPECIAL DEL SECTOR PETROLERO
CAPACIDAD	8.03 m <sup>3</sup>
LONGITUD	5000 mm

Figura 10 Ficha técnica del Vibrocamión Litton 315. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



*Fotografía 1 Vibrocamió Litton 315 (Fuente autor)*

## 11. MEDICIÓN DE LAS VIBRACIONES

### 11.1 Instrumentación

Para establecer la intensidad de las vibraciones generadas por los Vibrocamiones y equipos alternativos de prueba comparativa, se utilizaron equipos especiales de monitoreo de última tecnología y de fabricación americano-canadiense de la compañía InstanTel.

### 11.2 Equipos Utilizados.

Las mediciones se realizaron en el mes de diciembre de 2017. El monitoreo consistió principalmente en registrar, por medio de sismómetros digitales, triaxiales de alta sensibilidad.

La referencia de los equipos es; Minimate Plus, Minimate DS077 y Blastmate III:

Minimate Plus (InstanTel), USACanada

Range 10 in/s (254 mm/s)

Resolution. 0.005in/s (0.127 mm/s)



*Fotografía 2 Sismómetros digitales y accesorios. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*



*Fotografía 3 Sismómetros digitales y accesorios Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*

Los equipos constan de geófonos triaxiales (transductor sísmico externo triaxial), para captar las vibraciones terrestres.

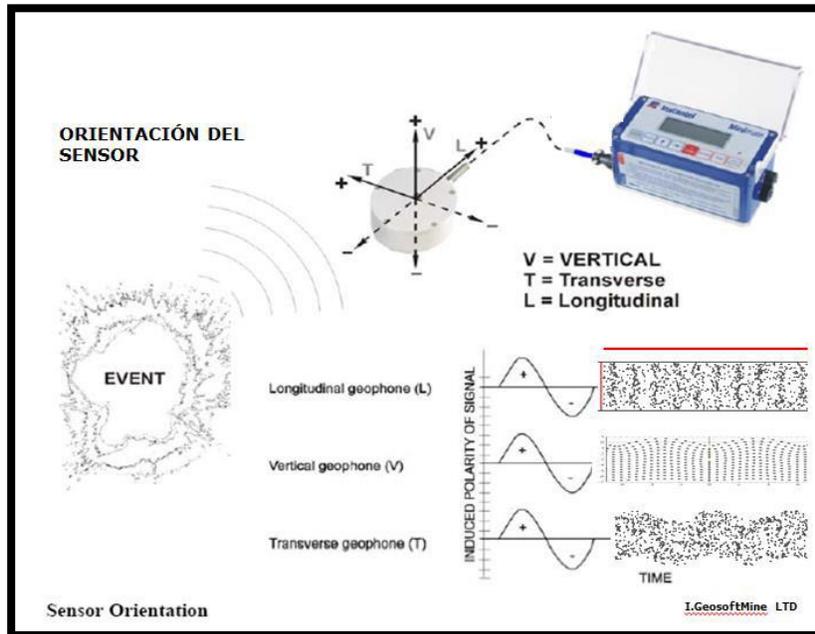


Figura 11 Representación gráfica del sistema de adquisición. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

### 11.2.1. Características Generales

- Su unidad de medida es el Volt/mm/s
- Entregan una medición directa de la velocidad
- Miden bien en el rango de 0.127 mm/s hasta 250 mm/s
- Su respuesta a la frecuencia varía entre 4.5 a 1000 Hz
- La sensibilidad varía entre 0.003Volts/[mm/s] a 0.041Volts/[mm/s]

## 12. NORMATIVIDAD

Los valores máximos que forman parte de la legislación o normatividad técnica utilizada como referencia, son el resultado de realizar varias mediciones y reconocimiento de daños en edificaciones de diferentes tipos a lo largo del tiempo. Estos valores y umbrales incluyen cierto margen de seguridad, por lo tanto, sus valores constituyen en criterios generalmente conservadores. La velocidad pico de vibración de la partícula, registrada en los dos puntos de monitoreo bajo diferentes condiciones de fuente generadora y distancias, es la variable decisiva en los análisis efectuados.

Por esta razón, la mayoría de las normas y recomendaciones relativas al potencial de daños por estremecimientos generados por vibraciones utilizan la velocidad de vibración como variable básica. Adicionalmente, se pueden adoptar criterios de obtención de desplazamientos tanto máximos como acumulados, con base en la integración numérica de los registros de velocidades en el tiempo. Los valores de velocidades pico fueron obtenidos directamente de los registros producto de la medición de vibraciones para los diferentes sitios, luego de realizar un filtrado y corrección por línea base de las señales.

Por otro lado, la magnitud de las deformaciones que un nivel de vibración dado genera en una estructura también depende del comportamiento dinámico de esta, y en particular de sus frecuencias de resonancia o respuesta (las de la estructura en conjunto y las de los elementos individuales). Por esto, la frecuencia de la vibración incidente es la segunda variable básica en la evaluación del potencial de daños.

Es así como las frecuencias de vibración para los diferentes sistemas fueron de un análisis de espectros de Fourier en cada uno de los registros.

Con base en los resultados arrojados por las mediciones y su comprobación con la normatividad vigente, se adoptaron diferentes criterios de análisis.

## 12.1 Normatividad Vigente

A continuación, se describen algunas de las normas de aceptación de vibraciones según criterios de afectación estructural. Con base en esta normatividad se concluirá si los valores registrados durante la instrumentación y monitoreo de vibraciones son o no admisibles, además se realiza una comparación de valores registrados con una norma relacionada con el control de vibraciones generadas por vibraciones mecánicas como es la Norma Mexicana, veamos:

### 12.1.1 Norma española - UNE 22-381-93

La norma española “Control de vibraciones producidas por voladuras” (AENOR, 1993), elaborada por la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) tiene como objetivo principal establecer un procedimiento de estudio y control de las vibraciones producidas por voladuras en trabajos de explotación de minas, canteras, obras civiles, demoliciones y otras técnicas que requieran el uso de explosivos. A continuación, se presentan los valores máximos de velocidad de partícula permitidos por esta norma. La normativa española distingue los siguientes grupos de estructuras:

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

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

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

Los umbrales de perturbación se establecen en función de la frecuencia principal de vibración y tipo de estructura a proteger utilizando como parámetro de medida la velocidad de la partícula, aunque en el intervalo de frecuencias de 15 a 75Hz se utilice el parámetro de desplazamiento.

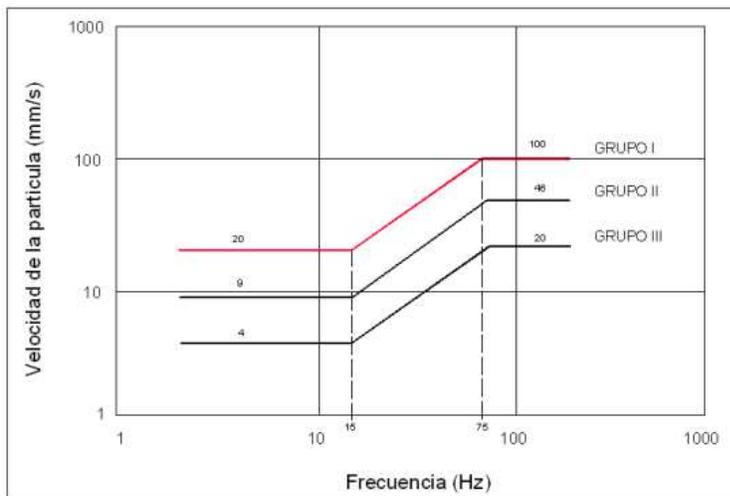


Figura 12 Espectro de la normativa española. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

TIPO DE ESTRUCTURA	FRECUENCIAS PRINCIPALES (Hz)		
	2 - 15	15 - 75	>75
	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)	Velocidad (mm/s)
I	20	0.212	100
II	9	0.095	45
III	4	0.042	20

Figura 13 Tipos de estructuras y velocidades pico para la norma española. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

Con base en la AENOR (Organismo Español de Normalización 1993), En el tramo de las frecuencias comprendido entre 15 y 75 Hz, en los que el nivel esta dado en desplazamiento, se

podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación:  $V = 2\pi fd$  (mm/s).

Donde:

V= Velocidad en mm/s.

$\pi = 3.1416$

f= frecuencia en Hz

d= desplazamiento indicado en la norma.

### 12.1.2 Norma alemana - DIN 4150, PARTE 3 (1999)

La normatividad alemana DIN 4150 (Deutsches Institut für Normung) en su tercera parte trata los efectos de vibraciones producidas interna o externamente sobre edificaciones. Para la valoración de la afectación usando este criterio, las velocidades y frecuencias debidas a las cargas dinámicas, se comparan con los valores de la norma. Partiendo de los tiempos de actuación de las vibraciones aparecen tres criterios de aceptación:

- Vibraciones estructurales de corta duración (transitorias).
- Vibraciones estructurales permanentes.
- Vibraciones permanentes particulares de la mampostería.

Esta norma tiene como objetivo establecer vibraciones límite para evita la pérdida del uso habitual del edificio. La reducción del uso habitual de una edificación pro efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes. En la Tabla 2 se muestran los valores de las velocidades máximas para la cimentación. Si se cumplen estos valores, ningún efecto dinámico debería producir daños importantes para provocar

la pérdida de servicio del edificio cosa que supondría que la posible aparición de patologías tendría otras causas.

En cambio, el hecho de superar estos valores no supone obligatoriamente la aparición de daños.

*Tabla 2*

*Valores máximos de velocidad de partícula (mm/s) para evitar daños (norma din 4150, standard for ground vibration caused by blasting).*

TIPO DE EDIFICACIÓN	FRECUENCIA		
	< 10 Hz	10-50Hz	50-100 Hz
Comercial e Industrial	20	20-40	40-50
Viviendas y Edificios	5	5-15	15-20
Estructuras delicadas, muy sensibles a vibración	3	3-8	8-10

Fuente (norma din 4150)

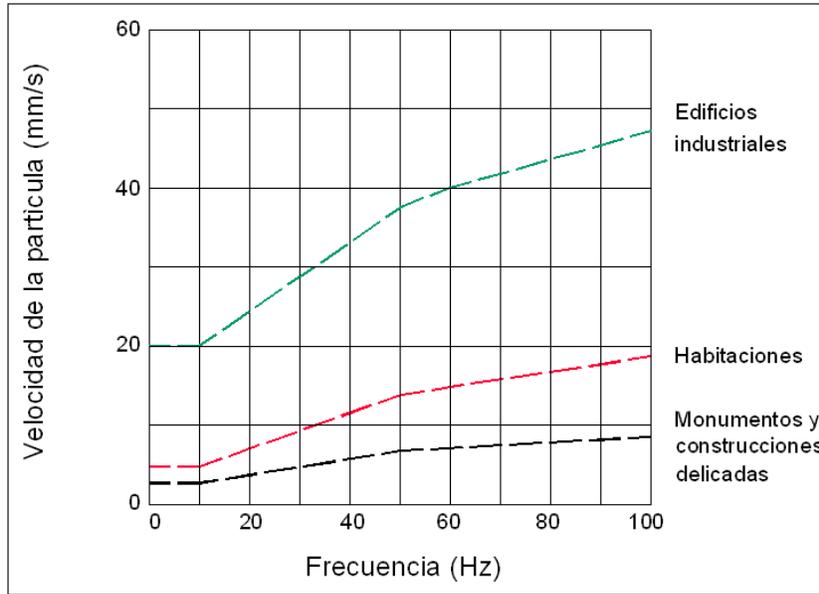


Figura 14 Gráfico de velocidad vs frecuencia según la norma alemana DIN 4150,1985. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

TIPO DE ESTRUCTURA	FUNDACIONES			PISOS MAS ALTOS DE EDIFICIOS
	FRECUENCIAS PRINCIPALES (Hz)			
	< 10	10 - 50	50 - 100	Cualquier frecuencia
Industriales	20 mm/s	20-40 mm/s	40-50 mm/s	40 mm/s
Habitacionales	5 mm/s	5-15 mm/s	15-20 mm/s	15 mm/s
Edificios particularmente delicados	3 mm/s	3-8 mm/s	8-10 mm/s	8 mm/s

Figura 15 Valores admitidos por la norma alemana DIN 4150 para daños en edificios. Fuente (bacci, 2000, adaptado por berta, 1985).

### 12.1.3 Normas oficiales Mexicanas\_Uninet

#### NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-026-SESH-2007

#### LINEAMIENTOS PARA LOS TRABAJOS DE PROSPECCION SISMOLOGICA PETROLERA Y ESPECIFICACIONES DE LOS NIVELES MAXIMOS DE ENERGIA.

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Energía.

MARIO GABRIEL BUDEBO, Subsecretario de Hidrocarburos y con el carácter de presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización en Materia de Hidrocarburos, con fundamento en los artículos 26 y 33 fracciones I, VIII y IX de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 38 fracción II, 40 fracciones XIII y XVIII, 41, 44, 47 fracción I, 68, 70, 73 y 74 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11 y 16 de la Ley Reglamentaria del Artículo 27.

Constitucional en el Ramo del Petróleo; 80 y 81 del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 1, 10 y 21 fracciones I, III, XIV y XVI del Reglamento Interior de la Secretaría de Energía; 1, 3, 5, 7, 16 y 46 del Reglamento de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo.

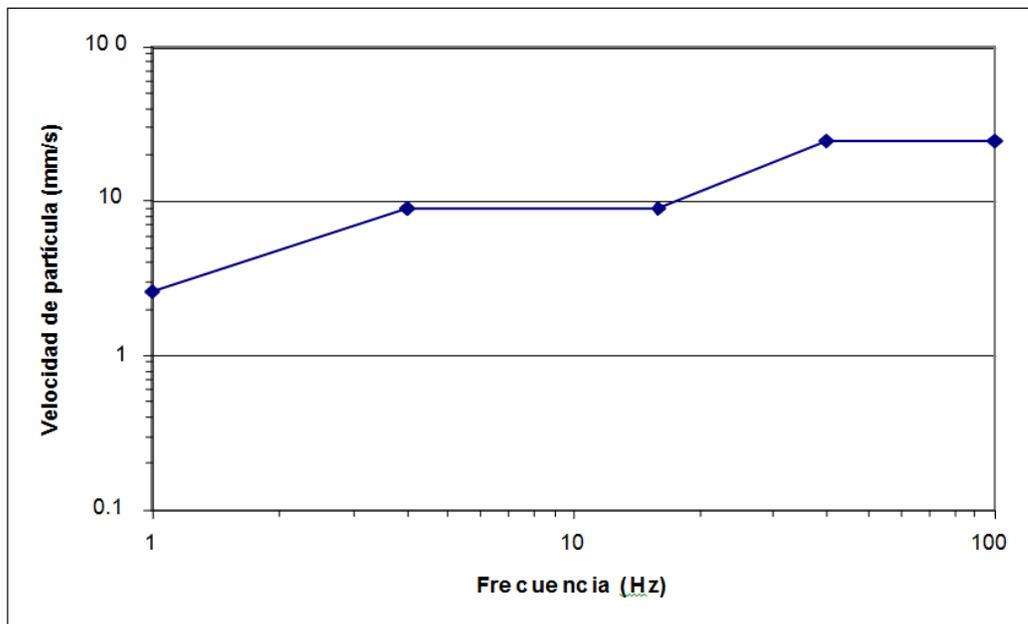


Figura 16 Curva límite de referencia. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

Tabla 3 Especificaciones de Velocidad de partícula

Frecuencia (Hz)	Velocidad de partícula
	(mm/s)
1-4	2.54 - 9
4-16	9
16-40	9-25
40-100	25

Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

#### Apartados de la norma:

- Se deberá generar un gráfico de distancia contra velocidad máxima de partícula que caracterice la respuesta del terreno a las vibraciones superficiales.
- Todas las mediciones y cálculos deberán usar el sistema general de unidades de medida señalado en la NOM- 008-SCFI-2002.
- Procedimiento para efectuar el monitoreo de las vibraciones superficiales.
- Deberán tomarse registros de mediciones en el terreno a diversas distancias de la fuente de vibración superficial, con la finalidad de efectuar un control de calidad de los datos registrados y detectar “efectos de sitio”.
- La secuencia de trabajo del monitoreo de vibraciones superficiales consiste en:
  - I. Seleccionar los inmuebles, sitios cercanos y puntos fuente donde se determine realizar el monitoreo.
  - II. Ubicar geográficamente el lugar donde se llevará a cabo el registro de monitoreo de vibraciones para asegurar la correspondencia de los registros con los puntos fuente y calcular la distancia asociada.
  - III. La actividad de medición debe cumplir con lo siguiente:
    - a. Los equipos de monitoreo de vibraciones deben estar debidamente calibrados.
    - b. Emplear geófonos de tres componentes debidamente acoplados a la superficie de medición.
    - c. Los instrumentos de grabación de datos sismológicos y de monitoreo de vibraciones deberán estar sincronizados en fecha y hora.

- IV. Los sismógrafos de monitoreo de vibraciones tendrán tres canales para registrar los tres componentes sísmicos ortogonales. Los componentes se orientarán de la siguiente manera:
- El radial en el plano horizontal y en rumbo hacia la ubicación del punto fuente.
  - El transversal en el horizontal y a 90 grados del rumbo de la componente radial.
  - El vertical en el plano ortogonal al plano horizontal. Especificar las características básicas de los geófonos como por ejemplo la banda de frecuencia, esto para garantizar la buena calidad de los registros.
- V. Analizar los datos registrados y verificar que no excedan los valores permisibles de la curva límite de referencia.

### 13. PRUEBAS DE VIBRACIONES

La adquisición se realiza con barridos de producción, se utilizaron dos Vibrocamiões totalmente sincronizados, de esta manera fue posible obtener una base de datos representativa del comportamiento de las ondas en el terreno y definir los valores límites para el control de daño sobre estructuras, ver figura 17.

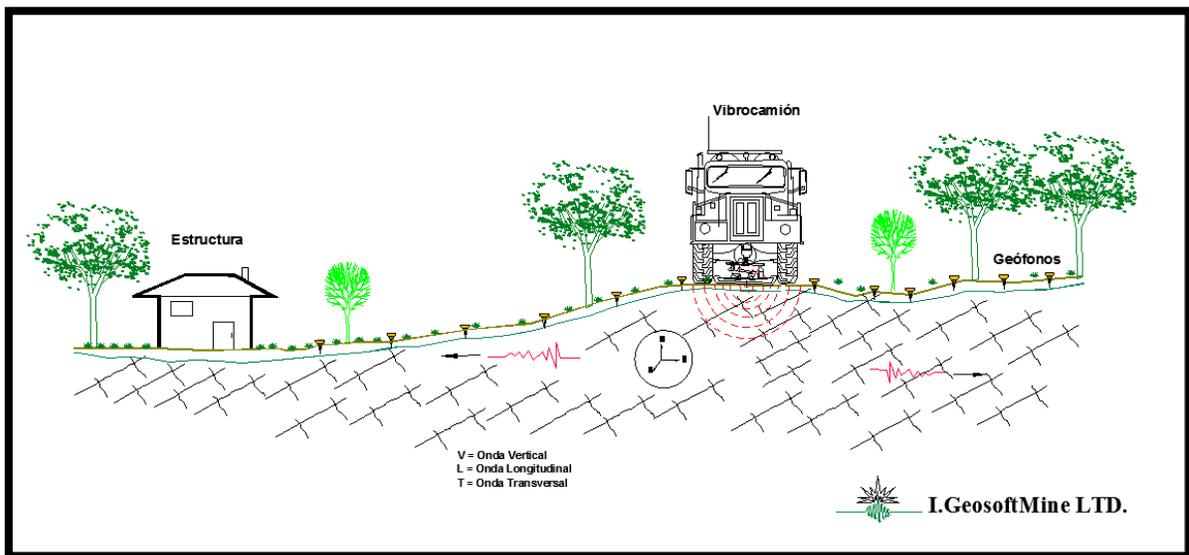


Figura 17 Representación gráfica de la generación de ondas en el terreno. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

#### 13.1. Procedimiento:

Inicialmente se diseñó un arreglo con distribución de captadores cada 10 metros hasta los 120 metros. En las primeras pruebas con Vibrocamião el arreglo demostró que las ondas que pueden generar daño a estructuras se disipan rápidamente con la distancia y no superaron los 100 metros, luego se determina que la distancia máxima propagación o alcance de las ondas con la excitación que producen los Vibrocamiões en el terreno están entre los 80 y 90 m, ver esquema de adquisición.

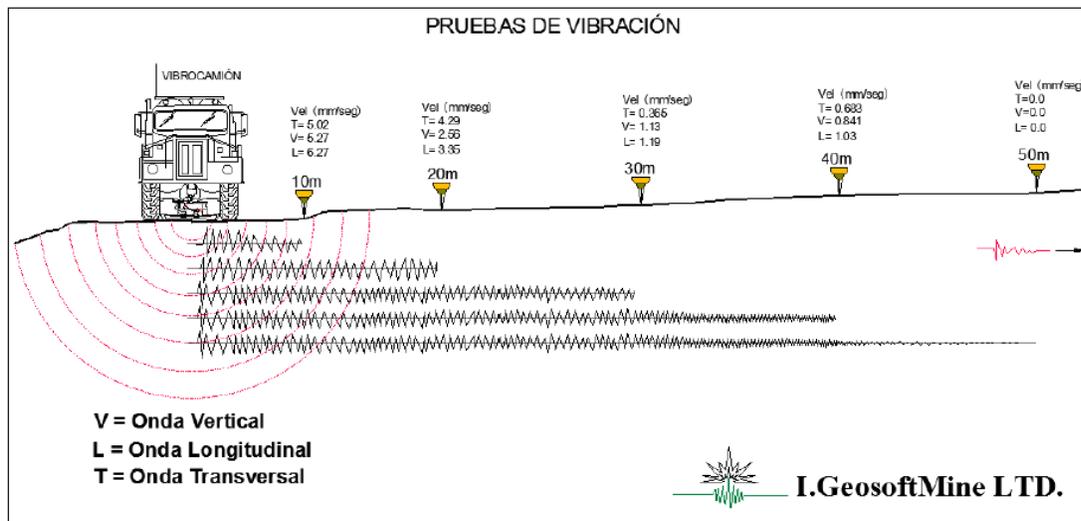


Figura 18 Distribución general de equipos de registro en campo y fuente de vibración. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

### 13.2. Registro en campo

Para determinar el radio de influencia de las vibraciones generadas por Vibrocaciones se realizaron pruebas de vibración cerca de viviendas, puentes y estructuras con Iglesias. En las tablas 4, 5, 6, y 7 se presentan los resultados obtenidos en el presente trabajo y los perfiles de adquisición.

Estas pruebas arrojaron resultados muy confiables, donde los sismogramas presentan gráficos de velocidad de partícula (mm/seg), y frecuencia de las vibraciones (Hz). Se obtuvieron gráficas de velocidad de partícula con registros sísmicos en las tres componentes principales transversal, vertical y longitudinal.

### 13.3 Análisis De Las Señales Adquiridas

Los datos grabados en el monitor de vibraciones se acceden desde una PC a través del software InstanTel Blastware, y automáticamente presentan los Valores Picos de Velocidad (PPV) de las ondas Transversales (T), Longitudinales (L) y Verticales (V), además de sus frecuencias asociadas. Estos valores picos son los máximos de cada componente y generalmente ocurren a diferentes tiempos y frecuencias de vibración.

También presenta los PVS (Pico Vector Suma) que es el valor pico máximo del Vector Suma de las tres componentes y trigonométricamente se calcula como  $PVS = (T^2 + V^2 + L^2)^{1/2}$ . El PVS es la mayor amplitud del vector suma obtenida durante la duración del evento.

Dependiendo de la norma internacional seleccionada, el software presenta un gráfico donde quedan ploteados los valores de Frecuencia versus Velocidad obtenidos de las distintas ondas analizadas, en este caso, ondas Verticales (V), Transversales (T) y Longitudinales (L), y que pueden fácilmente ser comparadas con los umbrales o límites que fijan estas normas respecto a ciertos tipos de construcciones. *Las velocidades de desplazamiento de partículas son más peligrosas a baja frecuencia.* La componente Longitudinal corresponde al Geófono Horizontal orientado mirando al vibrador.

TABLA 4.

RESULTADOS OBTENIDOS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y FRECUENCIA DE VIBRACIÓN A DIFERENTES DISTANCIAS.

Estructura	Fecha	Hora	Distancia (m)	Velocidad de partícula (mm/s)			Frecuencia (Hz)		
				Transversal	Vertical	Longitudinal	Transversal	Vertical	Longitudinal
P1-VIVIENDA	19/12/2017	12:44:56	5	20,400	10,300	15,700	33,2	33,9	33,2
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:47:23	10	3,540	4,890	3,840	28,4	25,8	25,4
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:48:42	20	1,650	3,220	2,860	22,9	27,3	25,0
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:49:12	30	0,603	1,250	2,060	52,1	43,4	43,7
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:53:20	40	1,110	1,080	1,190	22,3	22,3	24,7
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:54:18	50	0,440	0,540	0,397	32,3	24,6	25,8
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:57:37	60	0,159	0,254	0,206	30,8	25,0	21,5
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:02:00	70	0,111	0,175	0,159	27,4	21,4	14,5
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:04:19	80	0,095	0,079	0,127	23,8	20,5	22,8
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:05:48	90	0,127	0,064	0,064	2,5	4,3	2,8
P2-PUENTE	16/12/2017	14:36:12	10	3,240	2,560	4,700	38,3	42,3	28,8
P2-PUENTE	16/12/2017	14:39:22	20	1,190	2,130	2,210	19,8	49,9	62,5
P2-PUENTE	16/12/2017	14:42:10	30	0,064	0,381	0,984	24,5	39,3	26,9
P2-PUENTE	16/12/2017	14:44:35	40	0,492	0,413	0,794	30,1	37,8	23,5
P2-PUENTE	16/12/2017	14:46:17	50	0,111	0,143	0,127	33,0	22,0	27,9
P2-PUENTE	16/12/2017	14:48:02	60	0,127	0,079	0,127	32,5	33,3	33,3
P3-IGLESIA	17/12/2017	10:48:11	10	3,430	2,700	4,870	36,5	41,8	29,2
P3-IGLESIA	17/12/2017	10:48:22	20	1,950	3,060	3,030	56,0	37,5	56,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:04:18	30	1,020	2,050	1,650	44,6	44,6	44,6
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:04:29	40	1,080	1,100	1,170	22,3	22,3	24,2
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:11:10	50	0,508	0,476	0,762	27,7	31,4	30,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:11:22	60	0,270	0,222	0,302	26,3	31,4	37,3
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:25:38	70	0,175	0,111	0,270	20,8	24,5	20,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:25:49	80	0,143	0,111	0,127	20,8	23,4	13,3
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:59:16	90	0,127	0,095	0,095	21,5	23,0	26,5

Datos obtenidos en campo. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

A continuación, se presentan algunos de los sitios de muestreo y gráficos de los sismogramas en las tres componentes principales obtenidas y espectros de frecuencia, los demás resultados se encontrarán en los registros anexos de cada sitio.

### 13.3.1. REGISTRO DE VIBRACIONES GENERADAS POR VIBROCAMIONES SOBRE VIVIENDAS



*Fotografía 4 Vista de la casa. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*



*Fotografía 5 Vista del Vibrocami3n. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*

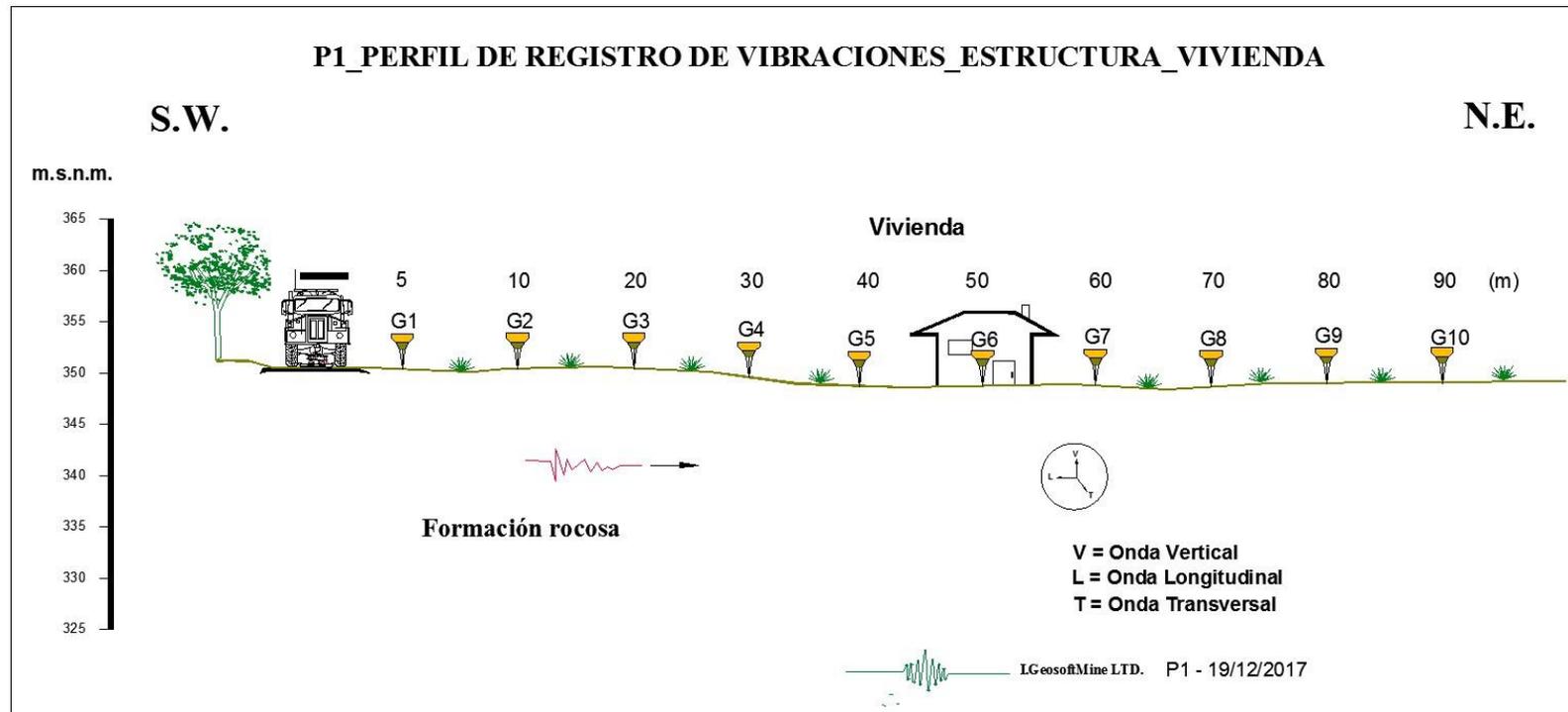


Figura 19 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre una vivienda. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

**TABLA 5.**

*REGISTROS DE VIBRACIÓN OBTENIDOS CERCA DE UNA VIVIENDA \_ MUNICIPIO DE COYAIMA VALORES DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA (MM/SEG) Y FRECUENCIA (HZ).*

<i>Estructura</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Distancia</i> <i>(m)</i>	<i>Velocidad de partícula (mm/s)</i>			<i>Frecuencia (Hz)</i>		
				<i>Transversal</i>	<i>Vertical</i>	<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal</i>	<i>Vertical</i>	<i>Longitudinal</i>
P1-VIVIENDA	19/12/2017	12:44:56	5	20,400	10,300	15,700	33,2	33,9	33,2
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:47:23	10	3,540	4,890	3,840	28,4	25,8	25,4
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:48:42	20	1,650	3,220	2,860	22,9	27,3	25,0
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:49:12	30	0,603	1,250	2,060	52,1	43,4	43,7
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:53:20	40	1,110	1,080	1,190	22,3	22,3	24,7
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:54:18	50	0,440	0,540	0,397	32,3	24,6	25,8
P1-VIVIENDA	19/12/2017	16:57:37	60	0,159	0,254	0,206	30,8	25,0	21,5
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:02:00	70	0,111	0,175	0,159	27,4	21,4	14,5
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:04:19	80	0,095	0,079	0,127	23,8	20,5	22,8
P1-VIVIENDA	19/12/2017	17:05:48	90	0,127	0,064	0,064	2,5	4,3	2,8

Datos obtenidos en campo. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

REGISTRO A 5 METROS DEL VIBROCAMIÓN, REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y ESPECTRO DE FOURIER .

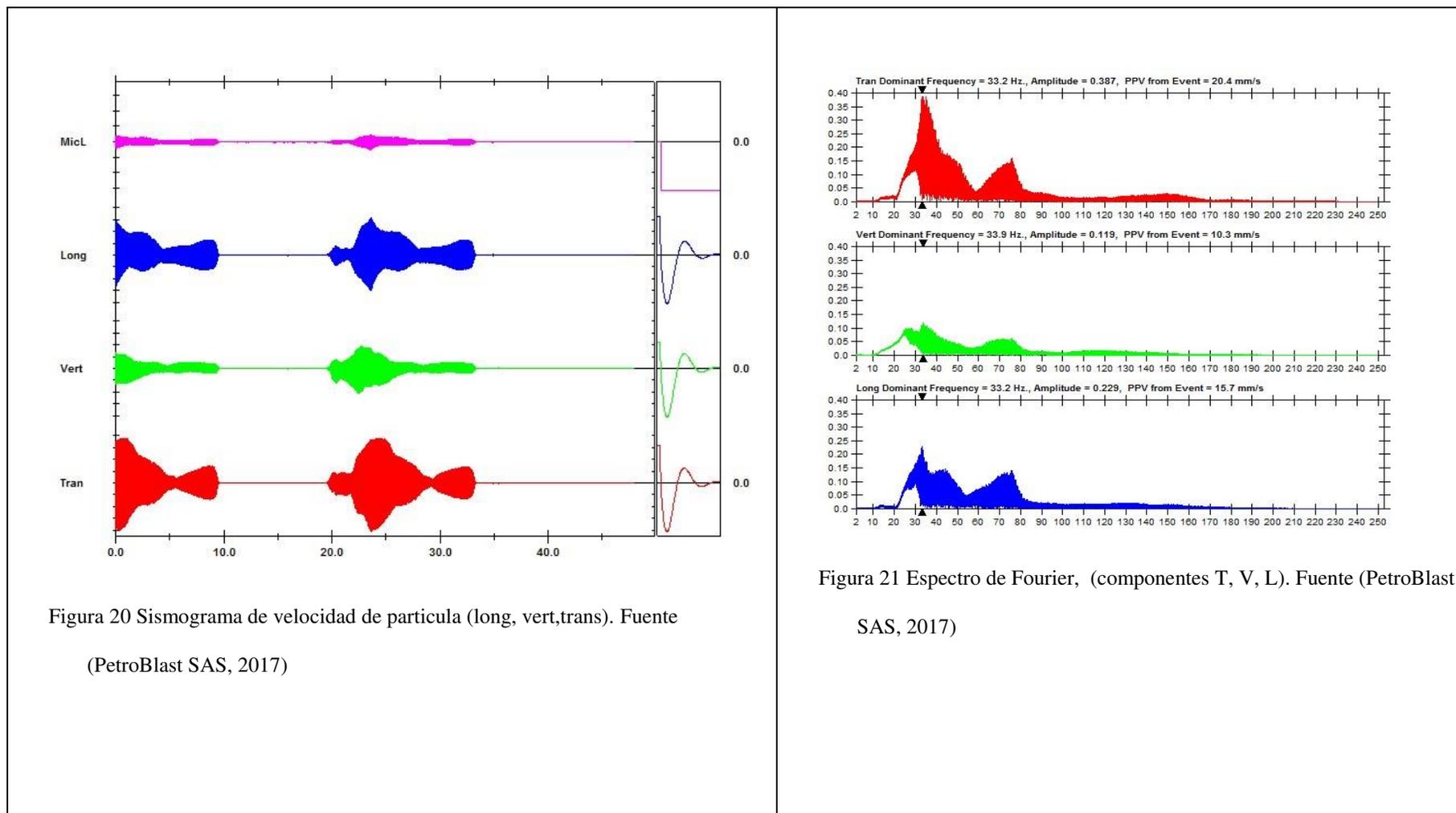


Figura 20 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

Figura 21 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

## REGISTRO A 5 METROS DEL VIBROCAMIÓN, REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y ESPECTRO DE FOURIER.

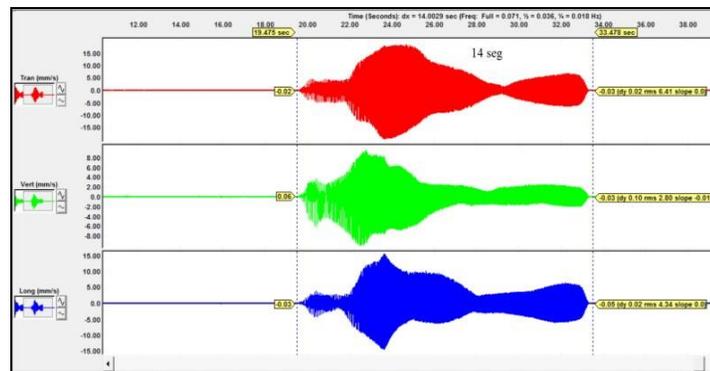
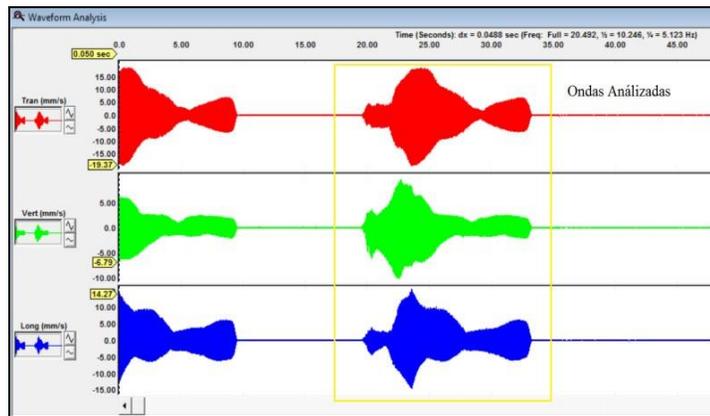


Figura 22 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

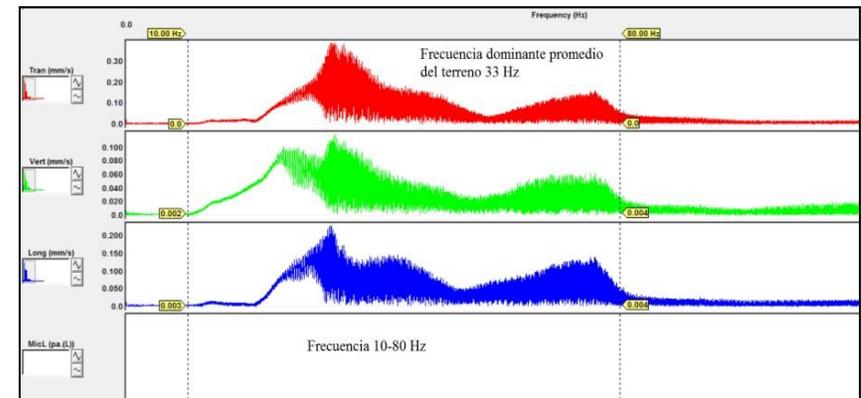


Figura 23 . Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

REGISTRO A 10 METROS DEL VIBROCAMIÓN, REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y ESPECTRO DE FOURIER.

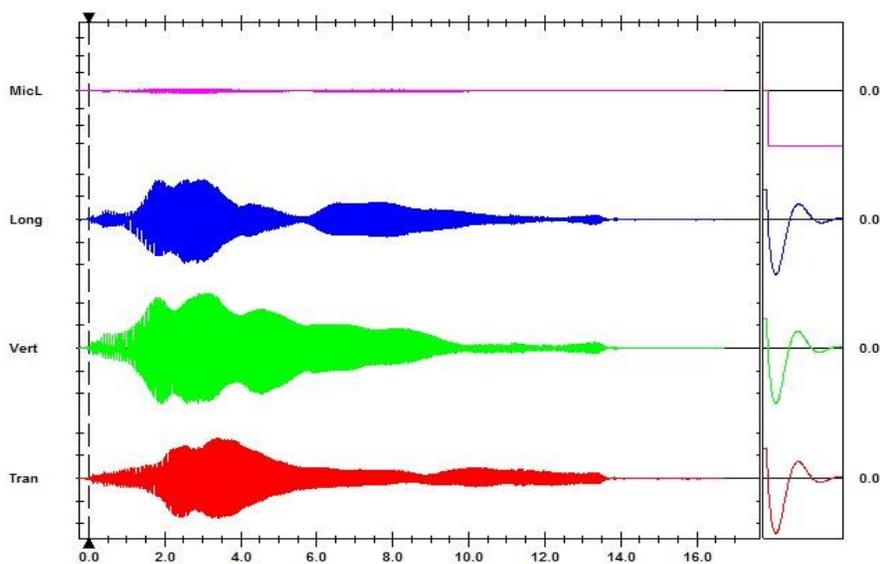


Figura 24 Sismograma de velocidad de partícula (long, vert,trans). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

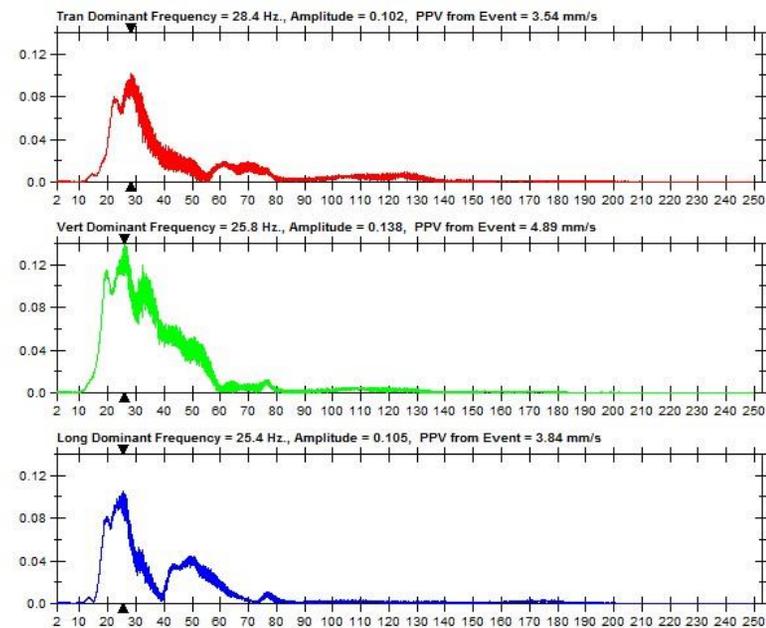


Figura 25 Espectro de Fourier, (componentes T, V, L). Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA CON LAS NORMAS ALEMANA DIN 4150 Y NORMA MEXICANA.

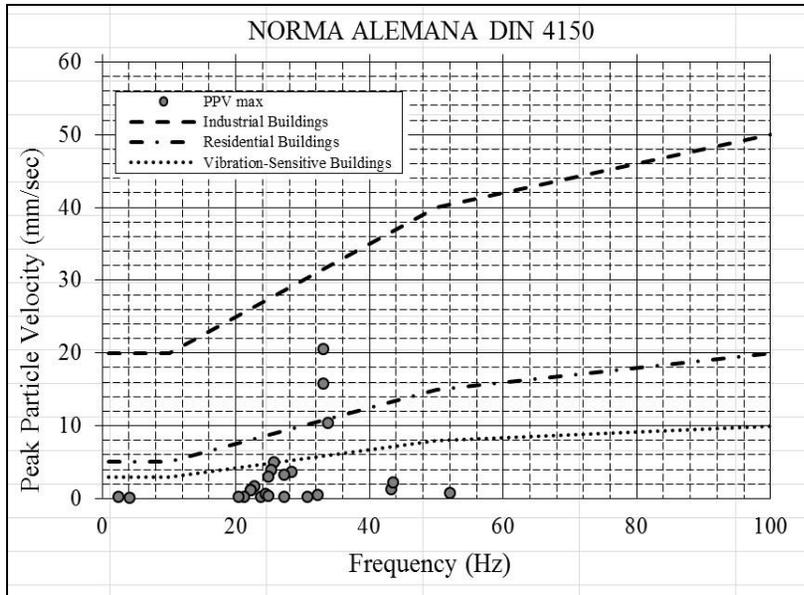


Figura 26 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Alemana Din 4150. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

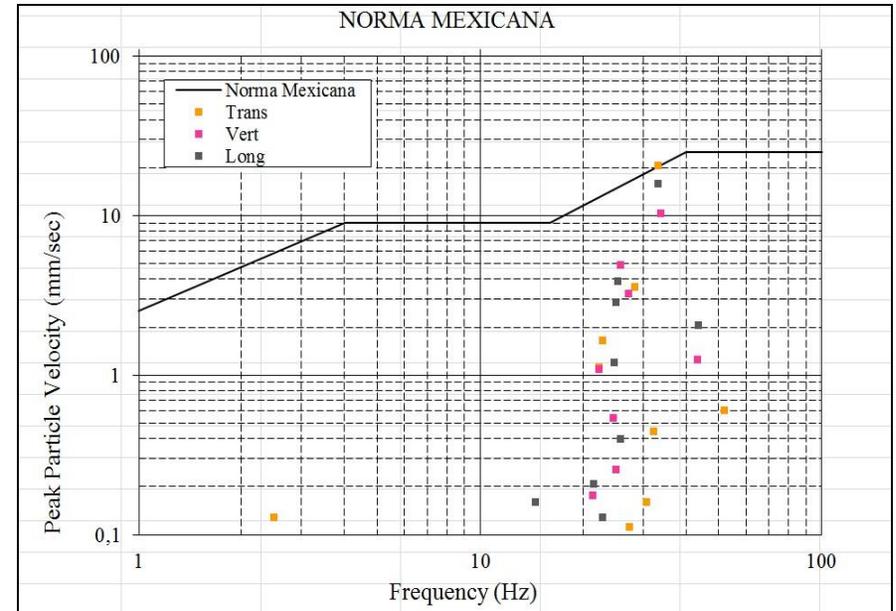


Figura 27 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

#### 14.3.1.1. comentarios sobre límites de vibración hacia viviendas y estructuras sensibles a

*vibraciones.*

Veamos los límites críticos que presenta la Norma Alemana:

1. Para viviendas y edificios habitacionales:

A 10 metros:

Los valores registrados presentan frecuencias mayores a 10 Hz, luego las velocidades máximas permisibles están entre 5 y 15 mm/seg, de esta manera a 10 metros de distancia de una vivienda los valores registrados cumplen con la norma.

### 14.3.2. REGISTRO DE VIBRACIONES GENERADAS POR VIBROCAMIONES SOBRE PUENTES



*Fotografía 6 Vista del Puente. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*



*Fotografía 7 Vista del Vibrocamión. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*

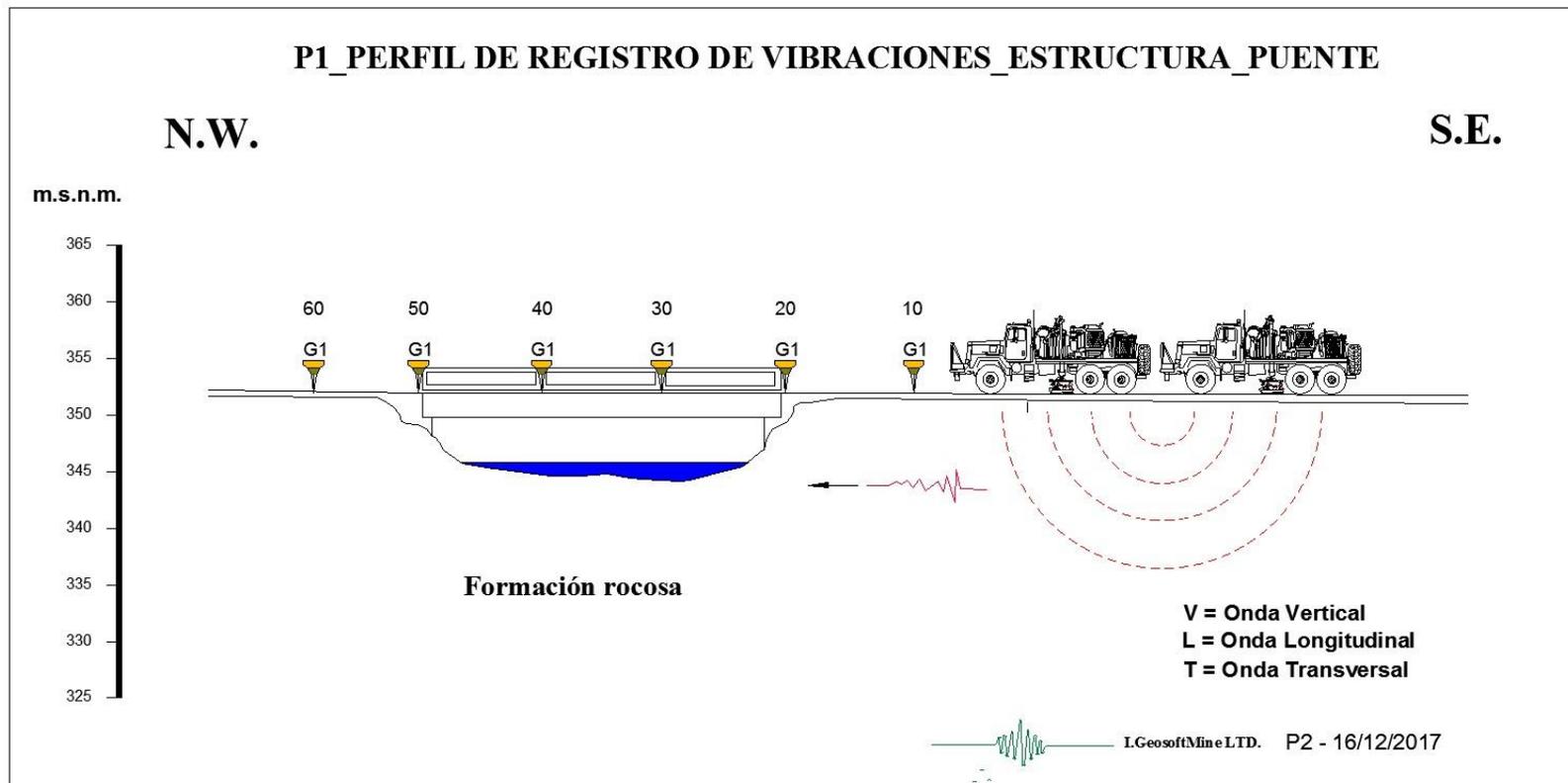


Figura 28 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre un puente. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

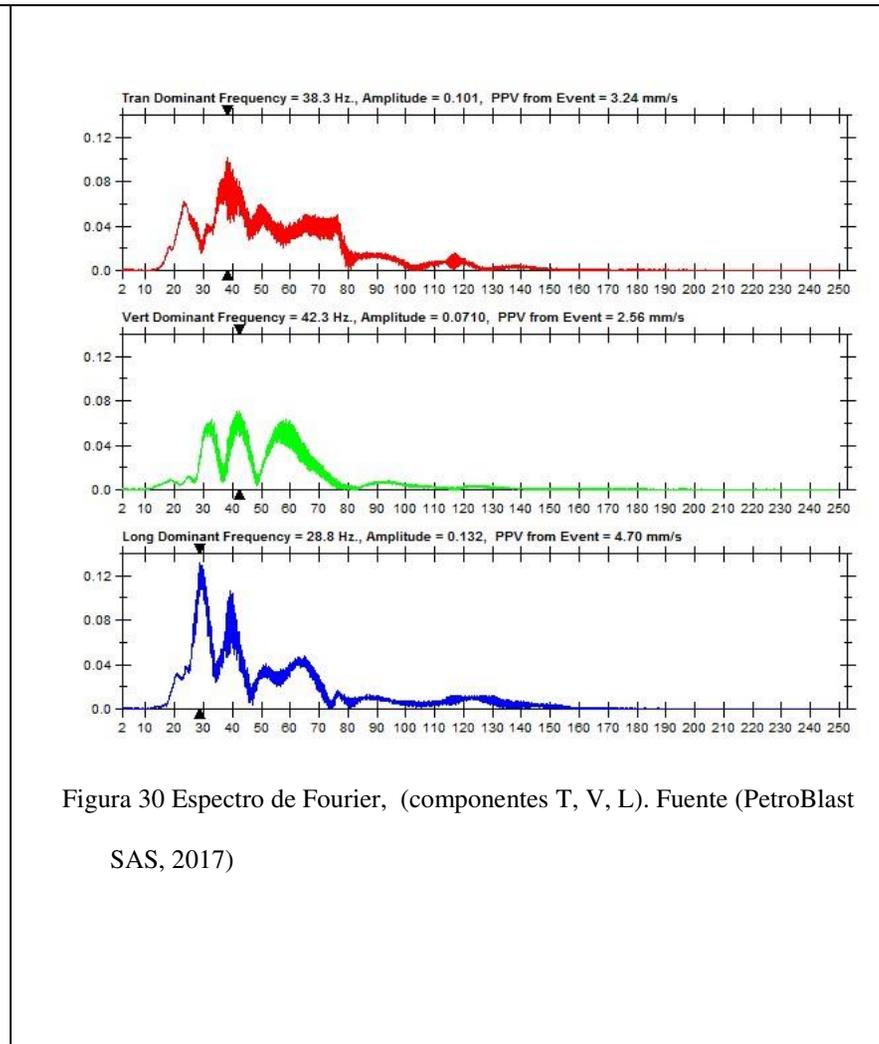
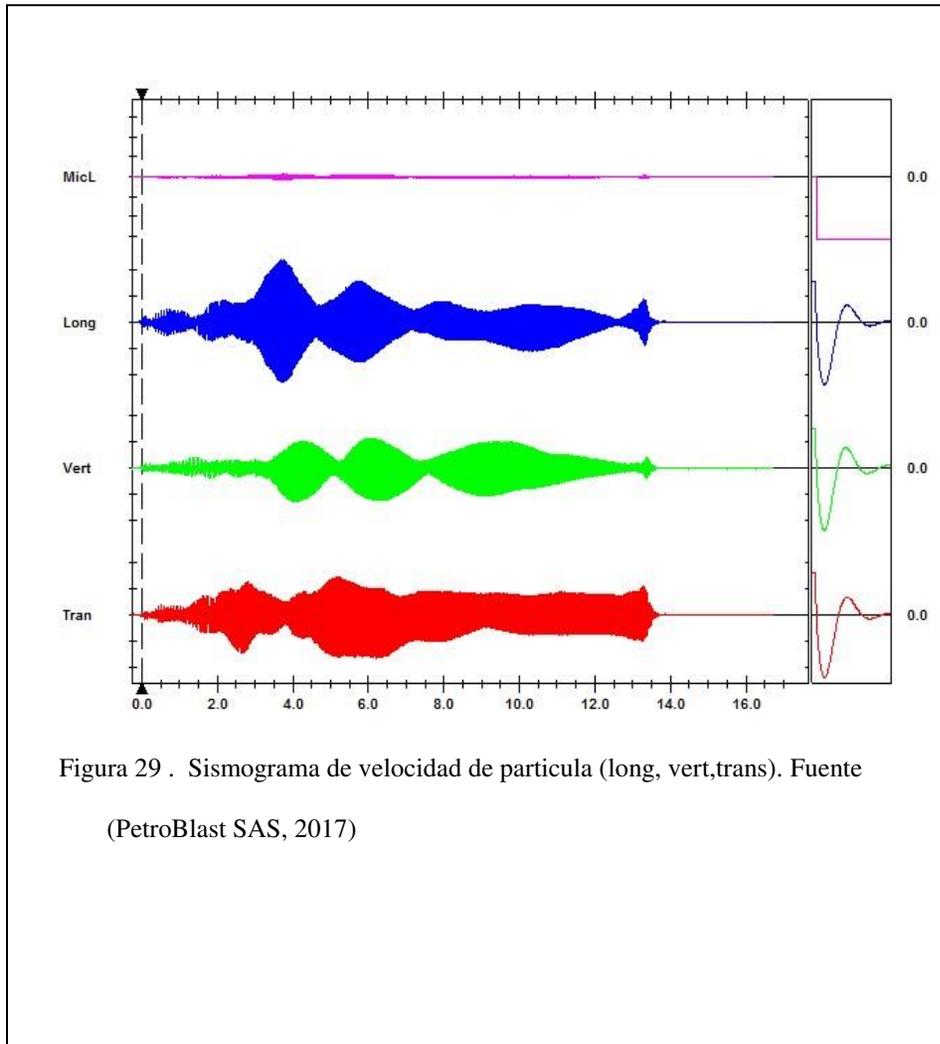
**TABLA 6.**

*REGISTROS DE VIBRACIÓN OBTENIDOS CERCA DE UN PUENTE\_ MUNICIPIO DE COYAIMA VALORES DE VELOCIDAD DE PARTICULA (MM/SEG) Y FRECUENCIA (HZ).*

<i>Estructura</i>	<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Distancia (m)</i>	<i>Velocidad de partícula (mm/s)</i>			<i>Frecuencia (Hz)</i>		
				<i>Transversal</i>	<i>Vertical</i>	<i>Longitudinal</i>	<i>Transversal</i>	<i>Vertical</i>	<i>Longitudinal</i>
P2-PUENTE	16/12/2017	14:36:12	10	3,240	2,560	4,700	38,3	42,3	28,8
P2-PUENTE	16/12/2017	14:39:22	20	1,190	2,130	2,210	19,8	49,9	62,5
P2-PUENTE	16/12/2017	14:42:10	30	0,064	0,381	0,984	24,5	39,3	26,9
P2-PUENTE	16/12/2017	14:44:35	40	0,492	0,413	0,794	30,1	37,8	23,5
P2-PUENTE	16/12/2017	14:46:17	50	0,111	0,143	0,127	33,0	22,0	27,9
P2-PUENTE	16/12/2017	14:48:02	60	0,127	0,079	0,127	32,5	33,3	33,3

Datos obtenidos en campo. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

## REGISTRO A 10 METROS DEL VIBROCAMIÓN, REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y ESPECTRO DE FOURIER.



## COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA CON LAS NORMAS ALEMANA DIN 4150 Y NORMA MEXICANA.

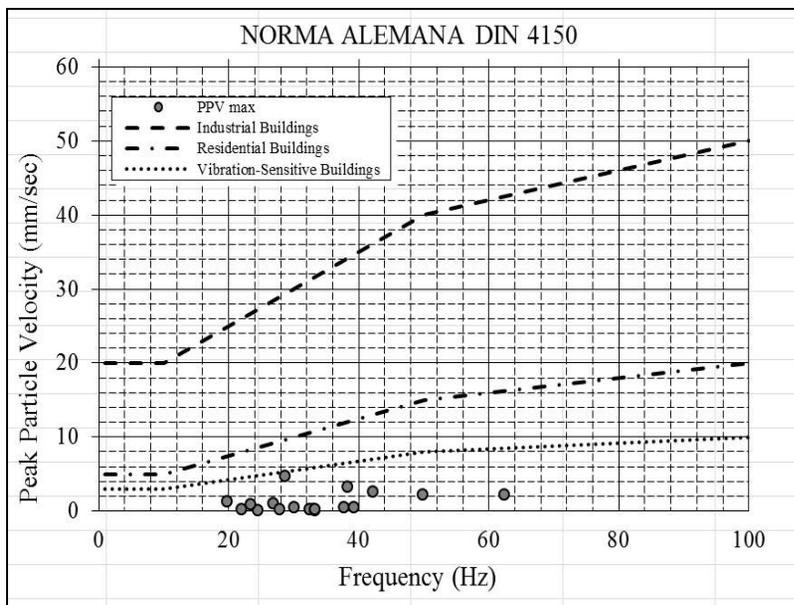


Figura 31 Espectro De Velocidad Vs Frecuencia Según La Norma Alemana Din 4150. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

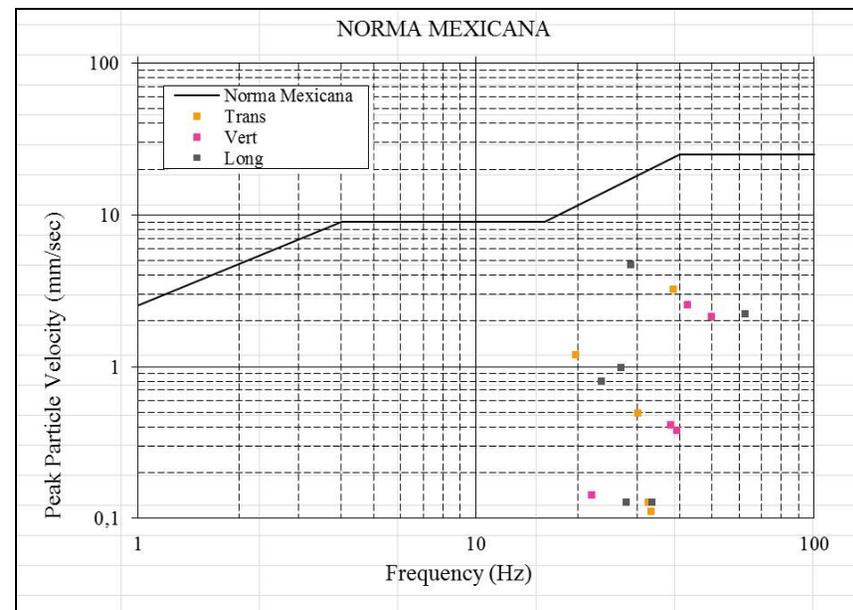


Figura 32 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

### *13.3.2.1. Comentarios sobre límites de vibración en puentes.*

La vibración generada por Vibrocamiones cerca de puentes se atenúa rápidamente sobre el tablero, debido al cambio de medio en la interface suelo\_estructura, los valores obtenidos muestran que la transferencia de energía se disipa rápidamente sobre el tablero del puente, los valores están por debajo de 1 mm/seg, sin embargo, los valores más altos llegan al pie de los estribos, es por esto que se debe tener una distancia de seguridad mínima recomendable de 10 metros.

### 13.3.3. REGISTRO DE VIBRACIONES GENERADAS POR VIBROCAMIONES SOBRE ESTRUCTURAS PARTICULARMENTE DELICADAS COMO IGLESIAS.



*Fotografía 1 Vista de la Iglesia. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*



*Fotografía 2 Vista del Vibrocamión. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)*

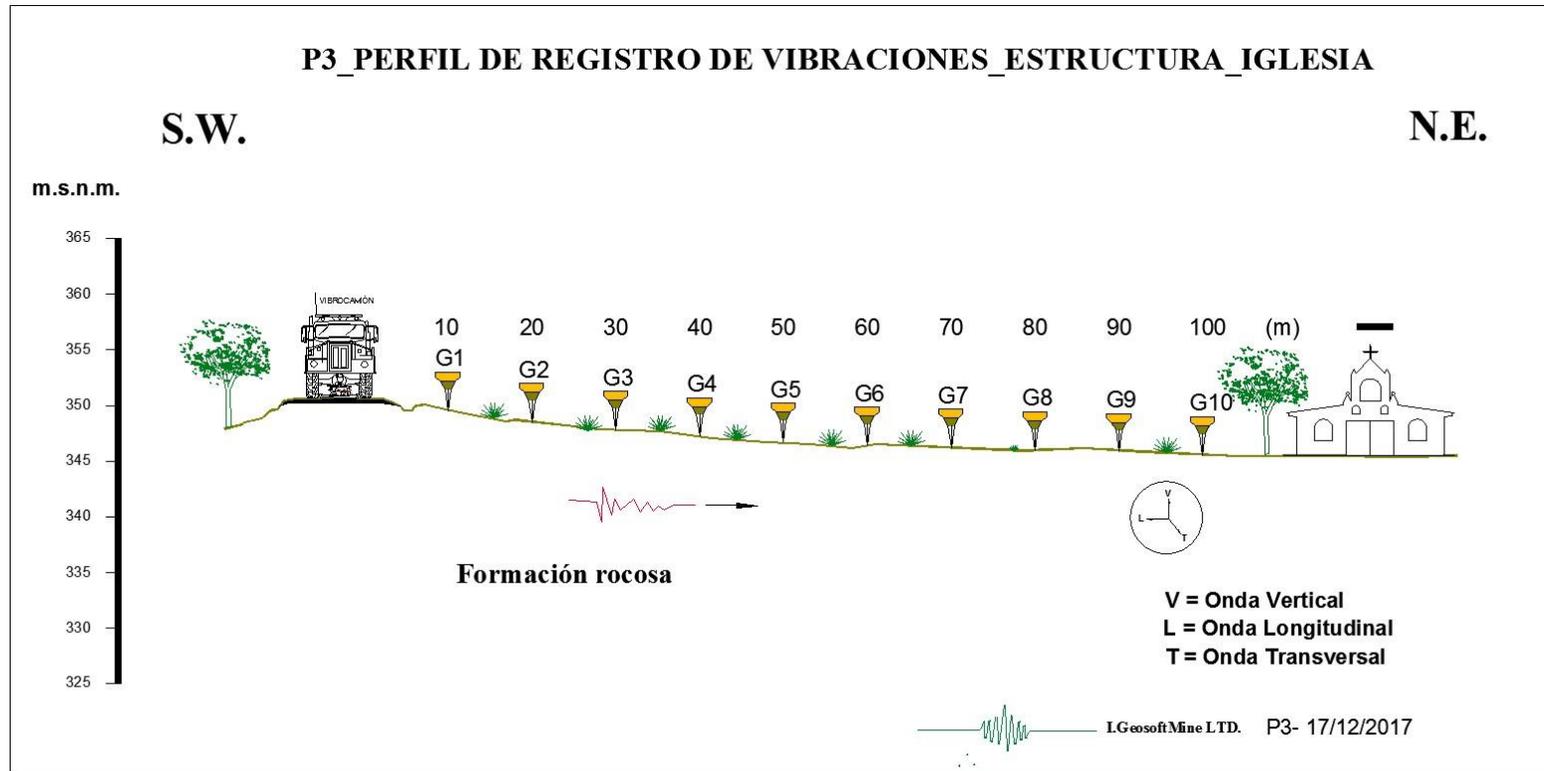


Figura 33 Esquema de localización de sismógrafos y fuente de vibración para control de daño sobre estructuras sensibles a vibraciones-iglesias. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

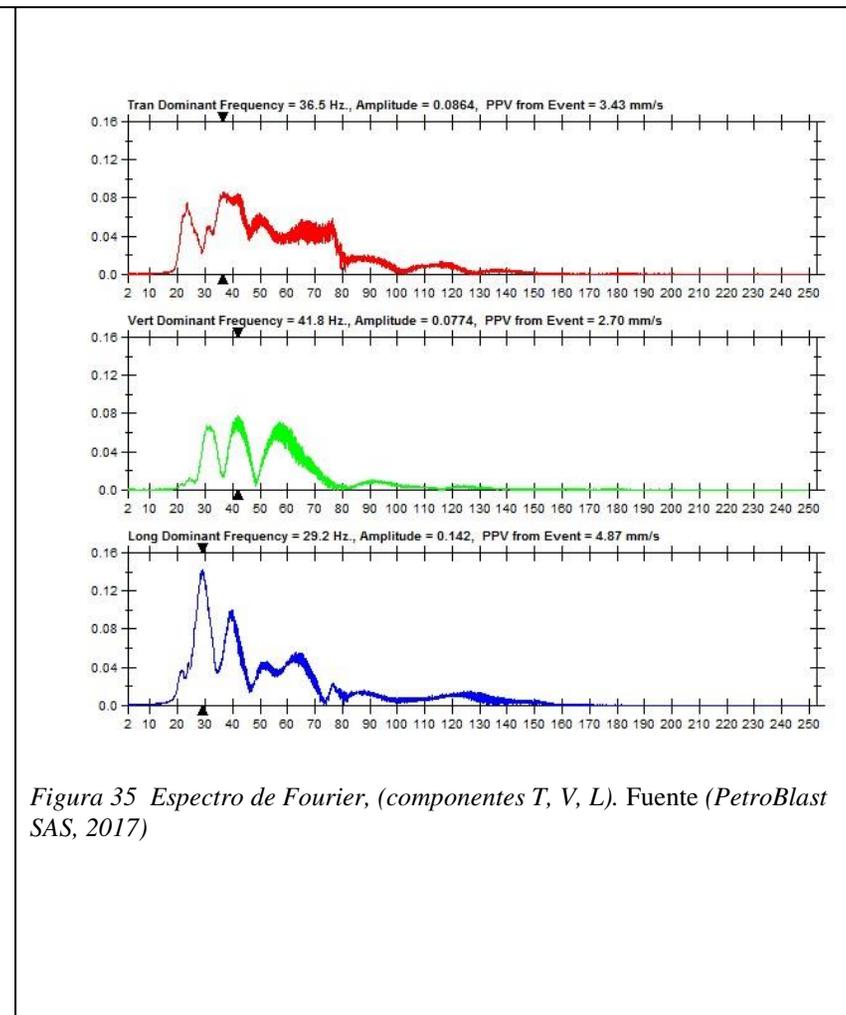
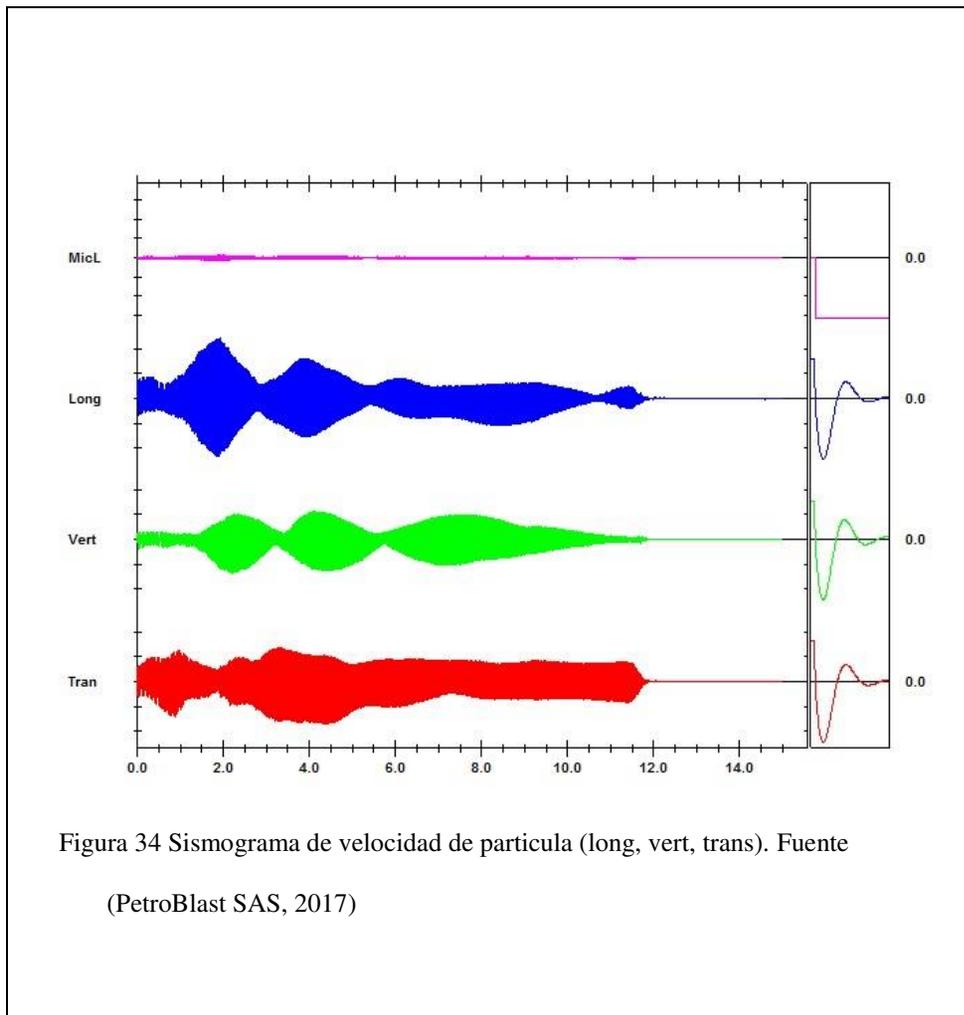
**TABLA 7.**

**REGISTROS DE VIBRACIÓN OBTENIDOS CERCA DE UNA IGLESIA \_ MUNICIPIO DE COYAIMA VALORES DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA (MM/SEG) Y FRECUENCIA (HZ).**

<b>Estructura</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>Velocidad de partícula (mm/s)</b>			<b>Frecuencia (Hz)</b>		
				<b>Transversal</b>	<b>Vertical</b>	<b>Longitudinal</b>	<b>Transversal</b>	<b>Vertical</b>	<b>Longitudinal</b>
P3-IGLESIA	17/12/2017	10:48:11	10	3,430	2,700	4,870	36,5	41,8	29,2
P3-IGLESIA	17/12/2017	10:48:22	20	1,950	3,060	3,030	56,0	37,5	56,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:04:18	30	1,020	2,050	1,650	44,6	44,6	44,6
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:04:29	40	1,080	1,100	1,170	22,3	22,3	24,2
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:11:10	50	0,508	0,476	0,762	27,7	31,4	30,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:11:22	60	0,270	0,222	0,302	26,3	31,4	37,3
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:25:38	70	0,175	0,111	0,270	20,8	24,5	20,1
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:25:49	80	0,143	0,111	0,127	20,8	23,4	13,3
P3-IGLESIA	17/12/2017	11:59:16	90	0,127	0,095	0,095	21,5	23,0	26,5

Datos obtenidos en campo. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

## REGISTRO A 10 METROS DEL VIBROCAMIÓN, REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA Y ESPECTRO DE FOURIER.



## COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA CON LAS NORMAS ALEMANA DIN 4150 Y NORMA MEXICANA.

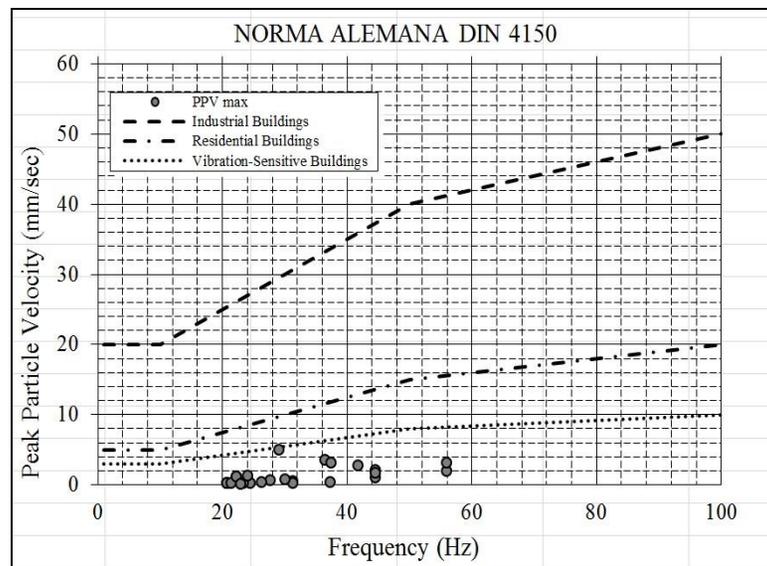


Figura 36 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma alemana DIN 4150. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

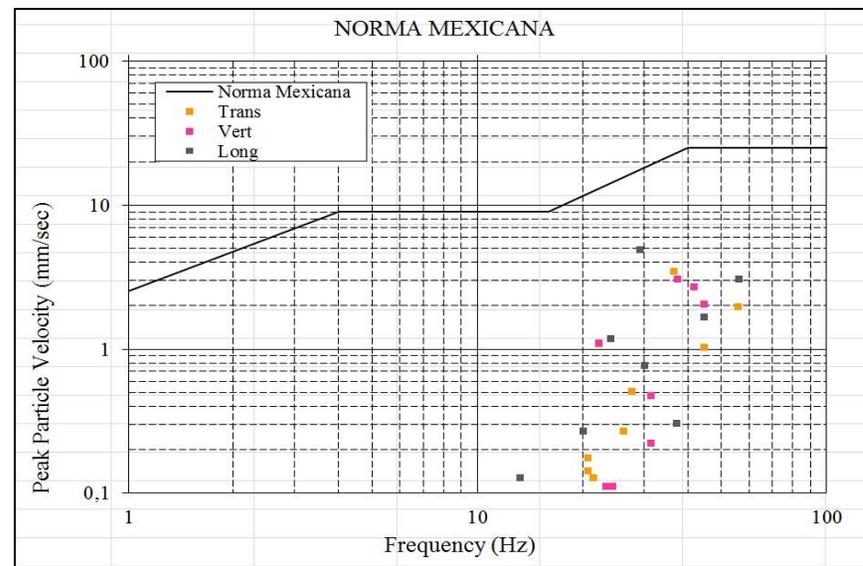


Figura 37 Espectro de velocidad vs frecuencia según la norma mexicana. Fuente (PetroBlast SAS, 2017)

#### **14.3.4. Comparación de límites permisibles según la norma alemana DIN 4150**

*14.3.4.1. Comentarios sobre límites de vibración hacia viviendas y estructuras sensibles a vibraciones.*

Veamos los límites críticos que presenta la Norma Alemana:

1. Edificios particularmente delicados y edificios históricos:

A 10 metros:

Realizados los análisis de ondas, se concluye que las vibraciones generadas por Vibrocamiones presentan frecuencias mayores a 10 Hz, luego las velocidades máximas permisibles están entre 3 y 8 mm/seg, para edificios particularmente delicados y edificios históricos y a una distancia de 10 metros de una vivienda se cumple

## 14. CONCLUSIONES

En función de los resultados obtenidos del análisis a las mediciones realizadas a las tres componentes del vector velocidad de partículas a las diversas distancias monitoreadas (velocidad transversal, longitudinal y vertical), se concluye que la distancia mínima de seguridad para realizar las vibraciones con la fuente sísmica (Vibradores) es de 10 metros. A distancias mayores o iguales al valor mencionado no se generan daños estructurales de acuerdo con las comparaciones realizadas mediante las normas alemana y mexicana.

Para el análisis de las mediciones obtenidas en este estudio, se utilizaron las normas: Norma Española UNE 22-381-93, la Norma Alemana DIN 4150 y la Mexicana NOM-026-SESH- 2007, debido a ser la alemana la norma internacional más estricta con niveles de velocidad máxima permitida muy por debajo del resto de las normas internacionales de mayor aceptación y la Norma oficial Mexicana, la única norma a nivel mundial, elaborada con fines estrictamente para adquisición sísmica mediante camiones Vibradores (Vibro seis).

## 15. RECOMENDACIONES

Realizar mediciones de velocidad de partículas en proyectos de adquisición sísmica a efectuar en otras áreas, con el fin de garantizar que las vibraciones generadas por la fuente sísmica (Vibradores), se encuentren dentro de los rangos y umbrales seguros estipulados tanto en la norma alemana como en la mexicana, lo cual está en función del tipo de terreno y afloramientos locales de las estructuras rocosas.

De necesitarse realizar Puntos Vibrados (VP) a distancias inferiores a 10 metros a estructuras en general, es necesario disminuir el Drive Force de los Vibradores a valores de 60 % o incluso 50%, con el fin de mantener la generación de energía dentro de los niveles establecidos por las normas alemana y mexicana.

## BIBLIOGRAFIA

PetroBlast SAS. (2017). ESTUDIO DE VIBRACIONES GENERADAS POR VIBROCAMIONES LITTON 315, PARA LA EXPLORACIÓN SÍMICA PETROLERA. Coyaima, Tolima.

INGEOMINAS, 1976. Mapa geológico del cuadrángulo K-9 y parte sur del J-9. Escala 1:100.000, Bogotá

ASP. Blastronics, Dr. Carlos Scherpenisse, Adamson W. R. Asesoría técnica en monitoreo de vibraciones para el modelamiento y control de daño, 2004.

STRUCTURE RESPONSE AND DAMAGE PRODUCED BY GROUND VIBRATION FROM SURFACE BLASTING, U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8507, 1980, Siskind et al.

STUDY OF DETERMINING FACTORS FOR TRAFFIC INDUCED VIBRATIONS IN BUILDINGS, Research Programme Sustainable Mobility, Katholieke Universiteit Leuven. Belgica, 2001

VIBRATIONS INDUCED BY CONSTRUCTION TRAFFIC: A HISTORIC CASE STUDY, Justin T. Henwood and Khamis Y. Haramy, Federal Highway Administration, Denver, U.S.A..

ALLARD. P. "Etude des vibrations Engendrées par les Tirs de Mines", Scetaroute. Février, 1986.

BARKLEY, R. C. ,et al.: "Ground and Air Vibrations Caused by Surface Blasting", N.T.I.S., 1983.

BOLLINGER, G. A.: "Blast Vibration Analysis", 1971.

ESTEVEZ, J. M.: "Control of Vibrations caused by Blasting", Memoria 498, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1978. Gama, Dinis C.: Vibrações dos terrenos: da geração ao controle, I semana Iberoamericana de Minas, Portugal, 2004, pp.147- 152.

HINZEN, K. G. et al.: "A New Approach to predict and Reduced Blast Vibration by Modelling of Acelerograms and Using a New Electronic Initiation System". S.E.E, 1987.

LÓPEZ Jimeno, Carlos. Dr Ing. de Minas. Catedrático de proyectos: Manual de Voladura - Manual de minería en túnel y a cielo abierto. ETSIM Madrid, España, 1996.

Normas colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente (NSR-10).

Pinto Morales L. H. y Fuentes M.C.: Estudio sismológico por efecto de vibraciones en Nobsa-Boyacá, Proyecto Dirección de Investigaciones, UPTC, Tunja, Boyacá. 2000.

Siskind et al., "Structure Responce and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Blasting", U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 8507, 1 980.

---

## ANEXOS

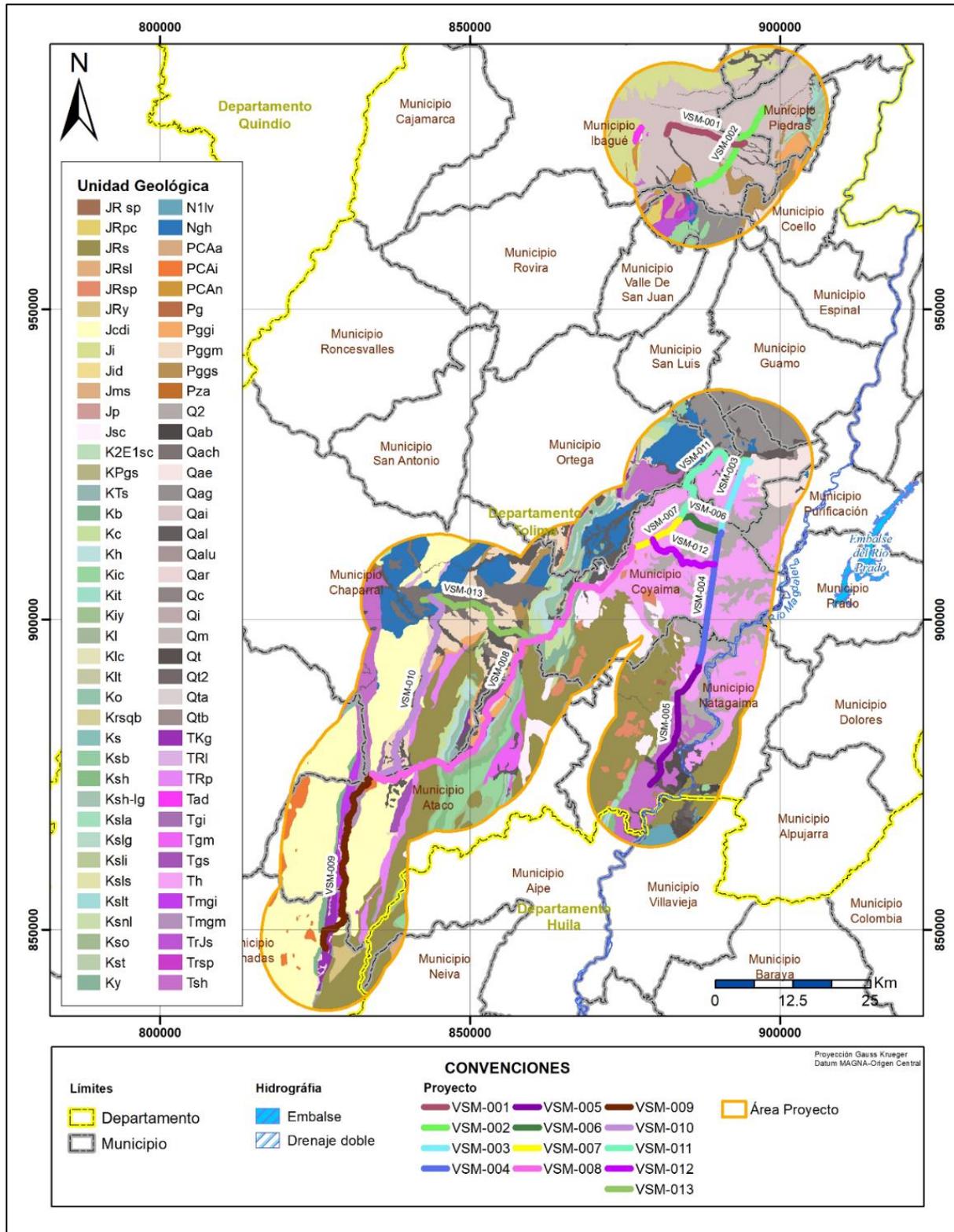
Anexo 1. Mapa Geológico regional de la zona de estudio.

Anexo 2. Registros de velocidad de partícula generadas por Vibrocamiones cerca de viviendas.

Anexo 3. Registros de velocidad de partícula generadas por Vibrocamiones cerca de puentes.

Anexo 4. Registros de velocidad de partícula generadas por Vibrocamiones cerca de estructuras sensibles a vibraciones iglesias.

# ANEXO 1. MAPA GEOLOGICO REGIONAL



Fuente (Vector Geophysical SAS)

# ANEXO 2. REGISTROS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA EN UNA VIVIENDA

5 M



## Event Report

Date/Time Tran at 12:44:58 December 19, 2017  
 Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
 Range Geo : 31.7 mm/s  
 Record Time 47.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.1 Volts  
 Unit Calibration July 24, 2017 by Istantel  
 File Name K732H7DA.2W0  
 Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

**Notes**  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
 General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

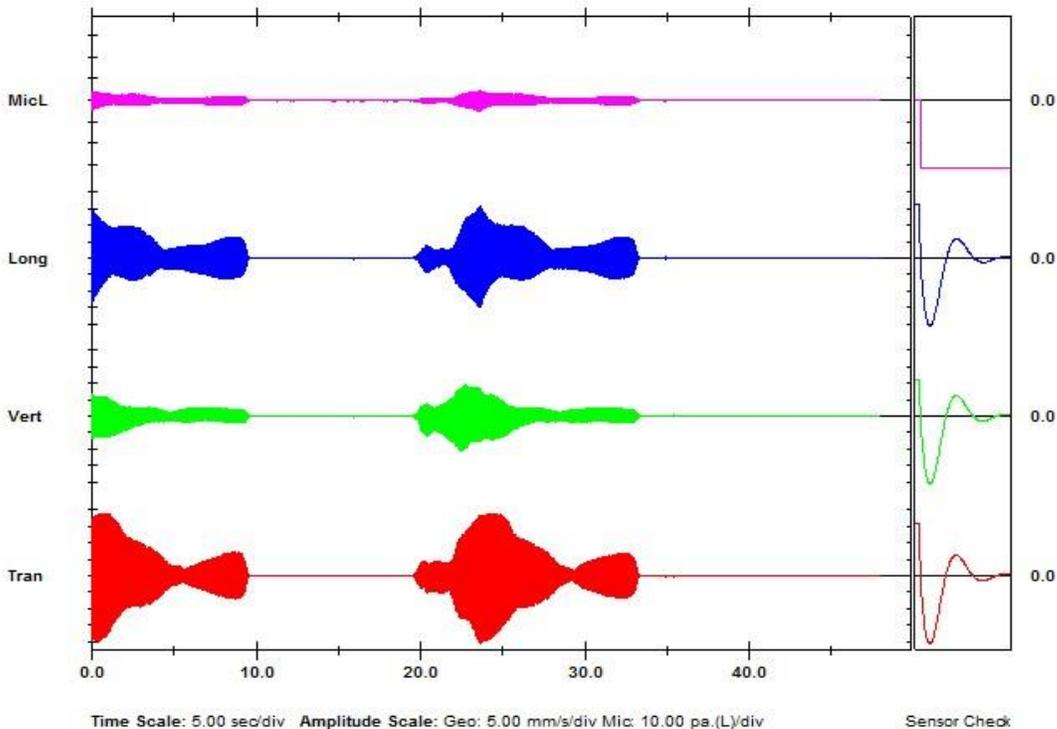
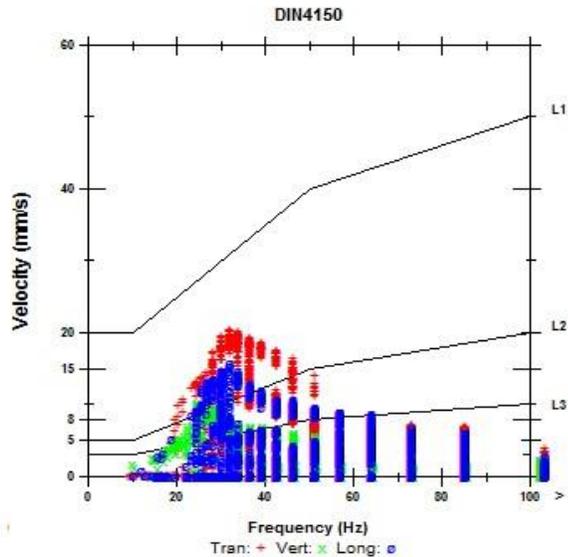
**Extended Notes**  
 PetroBlast S.A.S. Blast Vibrations Controls

**Microphone** Linear Weighting  
 PSPL 5.00 pa.(L) at 23.604 sec  
 ZC Freq 32 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	20.4	10.3	15.7	mm/s
ZC Freq	32	24	32	Hz
Time (Rel. to Trig)	23.635	22.445	23.621	sec
Peak Acceleration	0.606	0.275	0.401	g
Peak Displacement	0.0968	0.0576	0.0720	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.7	7.6	7.5	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.5	3.7	

Peak Vector Sum 26.2 mm/s at 23.603 sec

**Monitor Log**  
 Dec 19 /17 12:44:56 Dec 19 /17 12:45:44 Event recorded.



Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



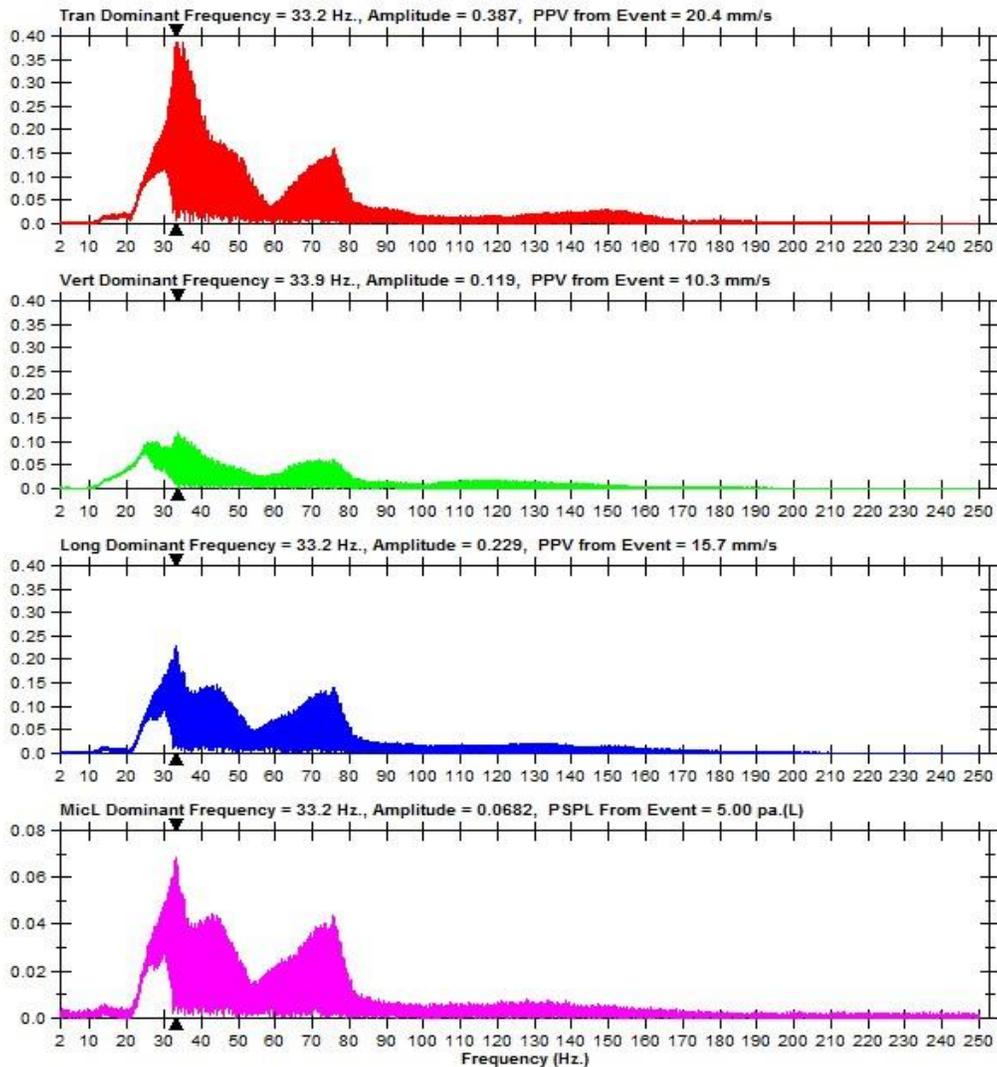
## FFT Report

Date/Time Tran at 12:44:56 December 19, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
Range Geo: 31.7 mm/s  
Record Time 47.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

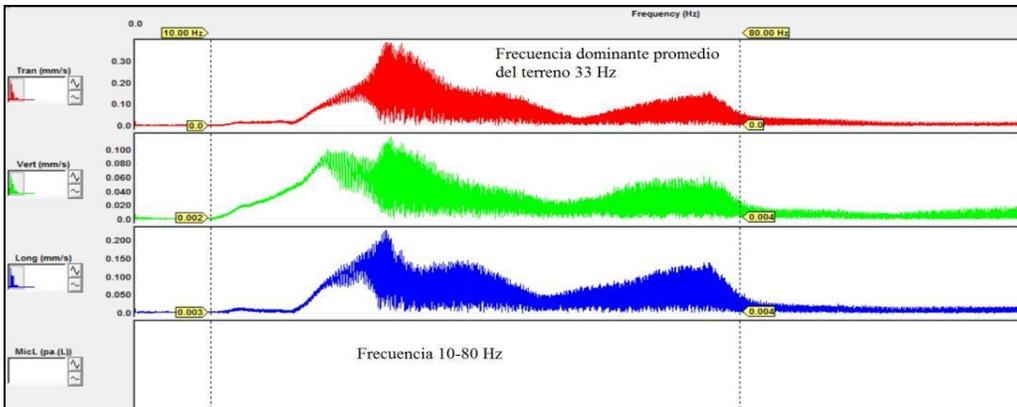
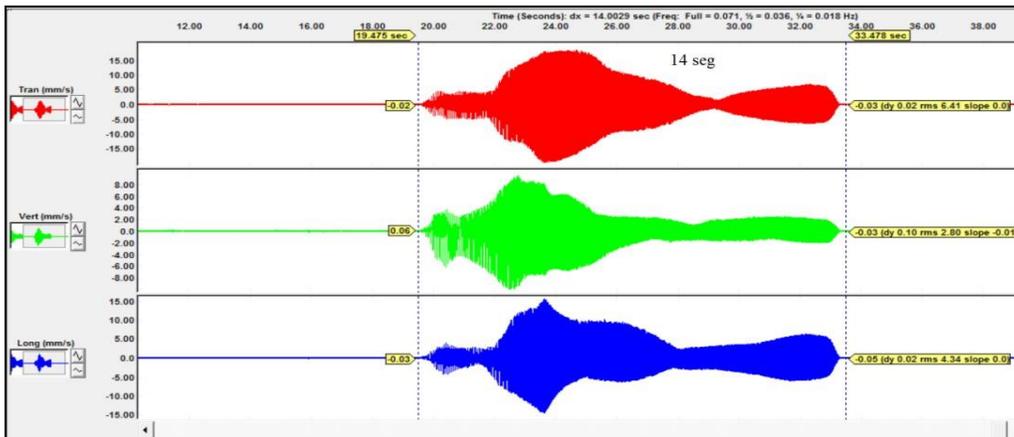
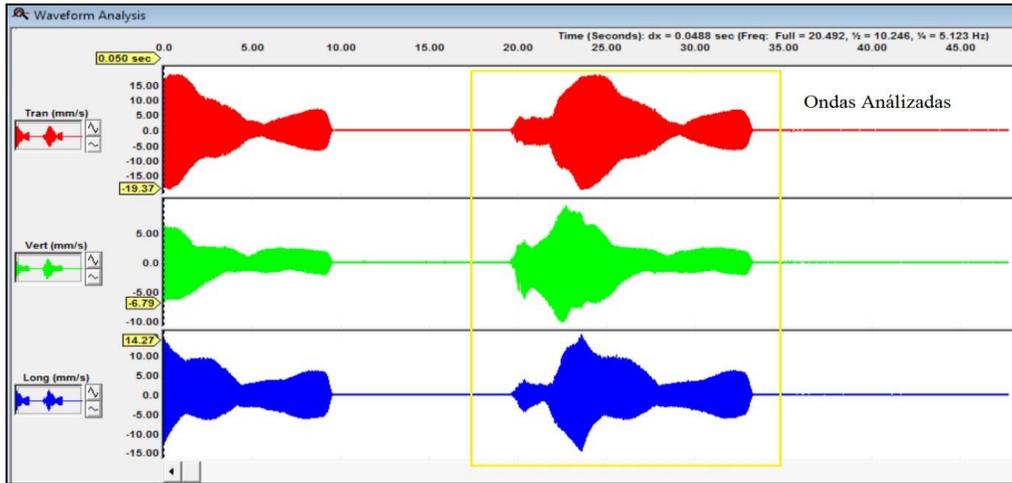
Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration July 24, 2017 by InstanTel  
File Name K732H7DA.2W0  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHISYCAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Blast Vibrations Controls



# ANALISIS ESPECIAL DE ONDAS



Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



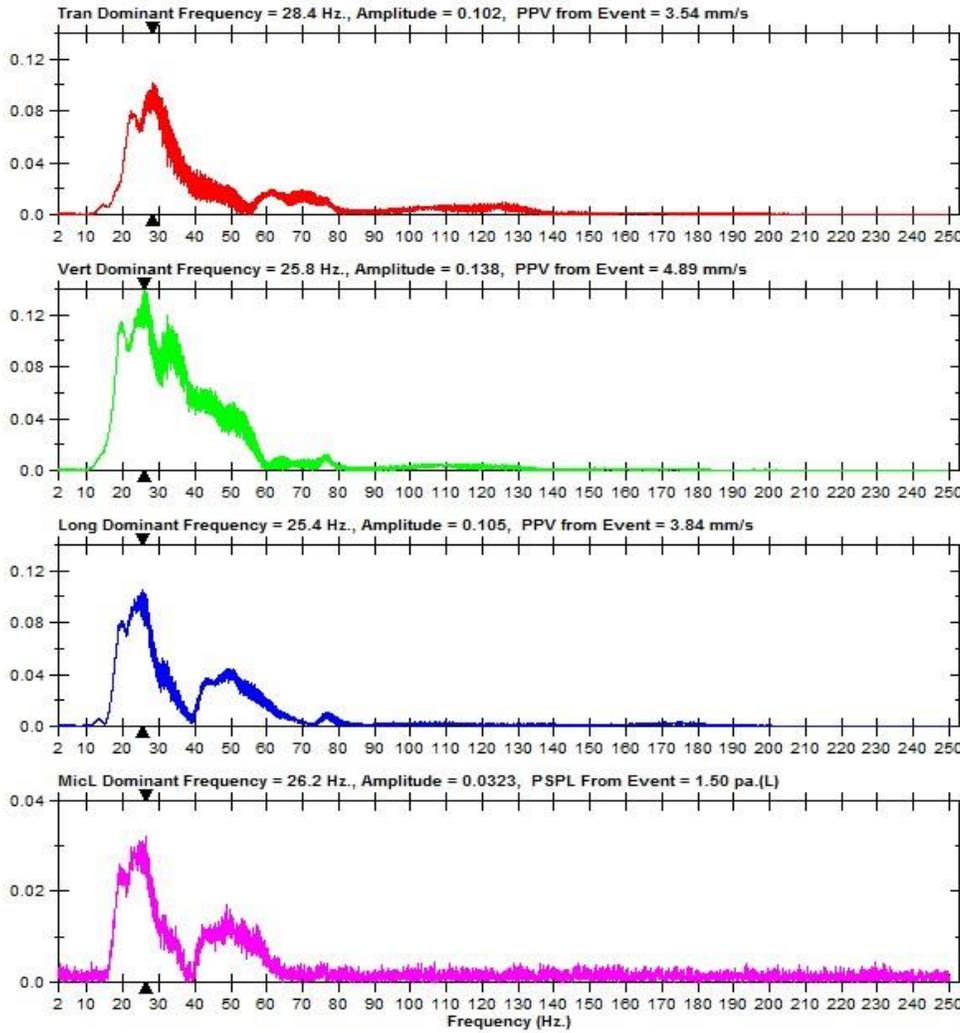
### FFT Report

Date/Time Vert at 16:47:23 December 19, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration July 24, 2017 by Instantel  
File Name K732H7DL.AZ0  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Blast Vibrations Controls





Event Report

Date/Time Vert at 16:48:42 December 19, 2017  
 Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
 Range Geo: 31.7 mm/s  
 Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.2 Volts  
 Unit Calibration July 24, 2017 by Instantel  
 File Name K732H7DL.D60  
 Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

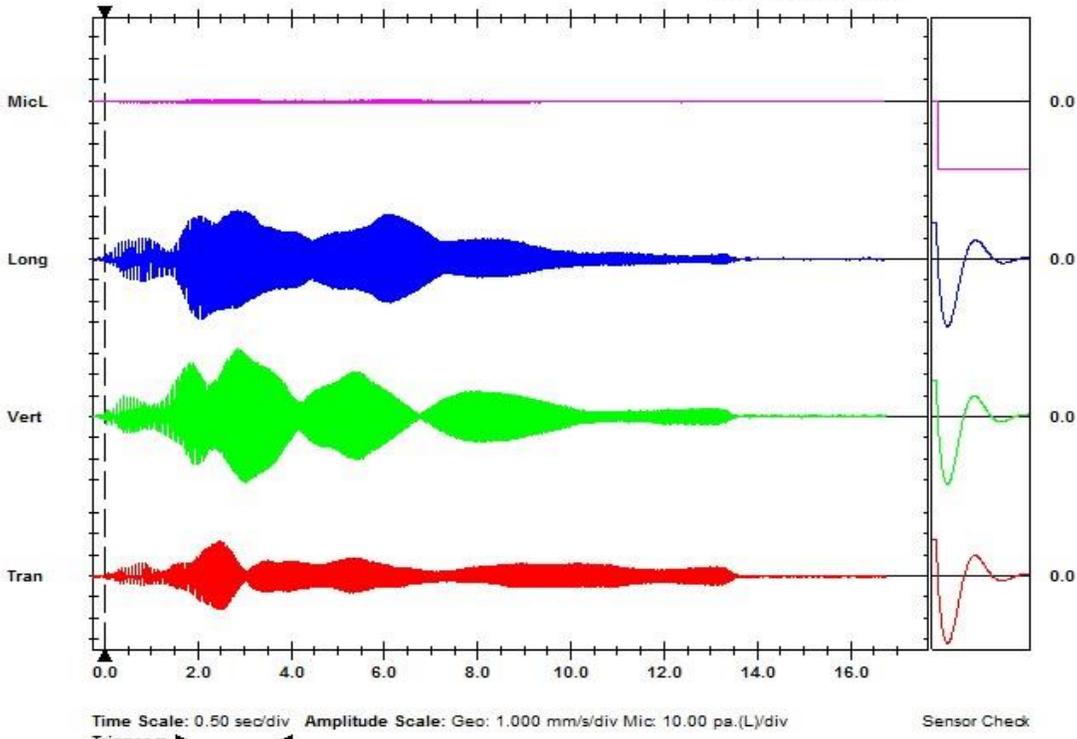
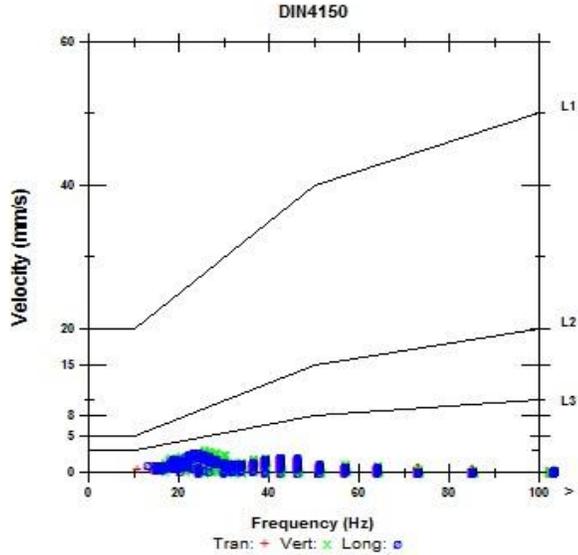
Notes  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHISYCAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
 General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
 PetroBlast S.A.S. Blast Vibrations Controls

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 1.00 pa.(L) at 1.881 sec  
 ZC Freq 34 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.65	3.22	2.86	mm/s
ZC Freq	23	26	23	Hz
Time (Rel. to Trig)	2.443	2.851	2.025	sec
Peak Acceleration	0.0315	0.0630	0.0597	g
Peak Displacement	0.0115	0.0190	0.0186	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.5	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.5	3.8	

Peak Vector Sum 3.49 mm/s at 1.884 sec





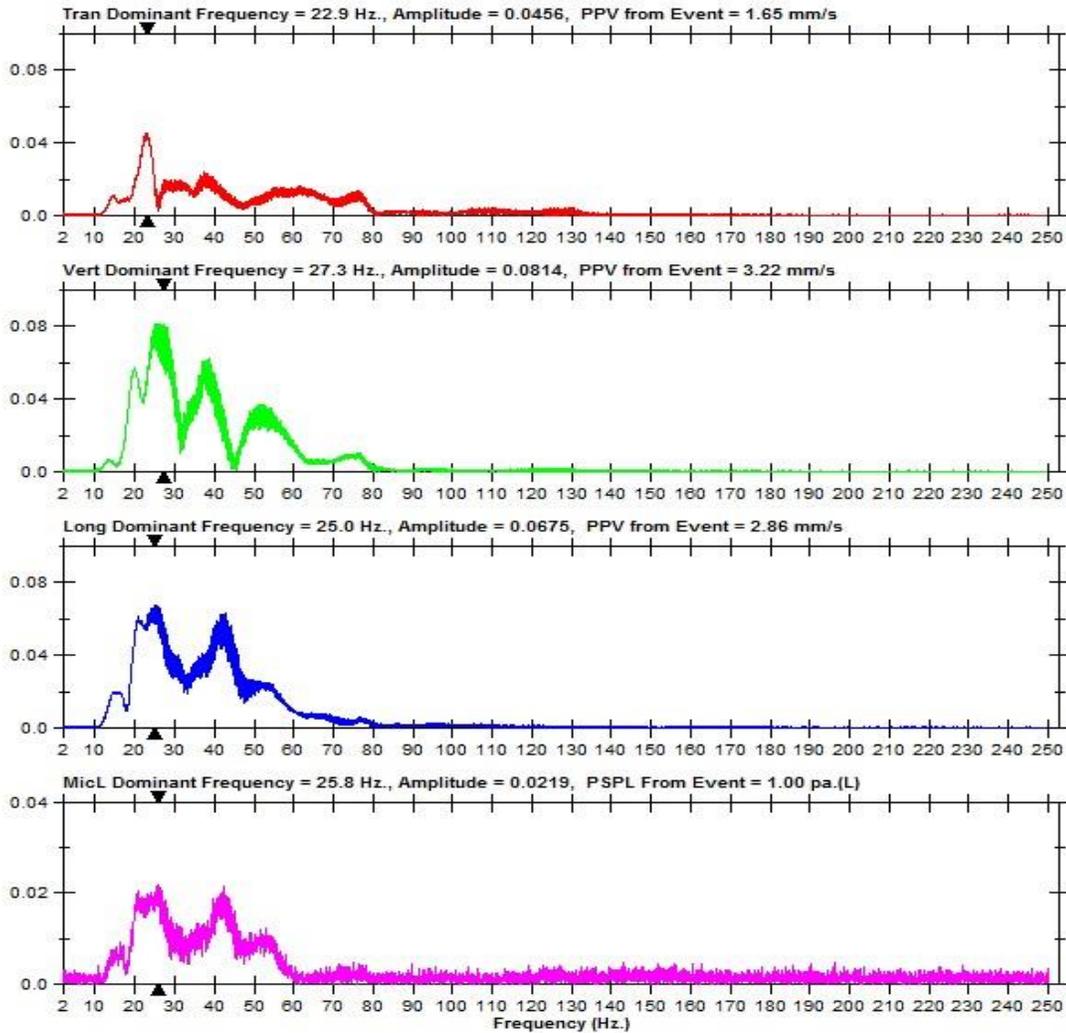
# FFT Report

Date/Time Vert at 16:48:42 December 19, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
Battery Level 6.2 Volts  
Unit Calibration July 24, 2017 by Instantel  
File Name K732H7DL.D60  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Blast Vibrations Controls



# ANEXO 3. REGISTROS DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA EN UN PUENTE

5 M



## Event Report

**Date/Time** Long at 14:38:12 December 16, 2017  
**Trigger Source** Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
**Range** Geo : 31.7 mm/s  
**Record Time** 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 1

**Serial Number** BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** August 31, 2017 by Instantel  
**File Name** P894H7DB.TCO  
**Scaled Distance** 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

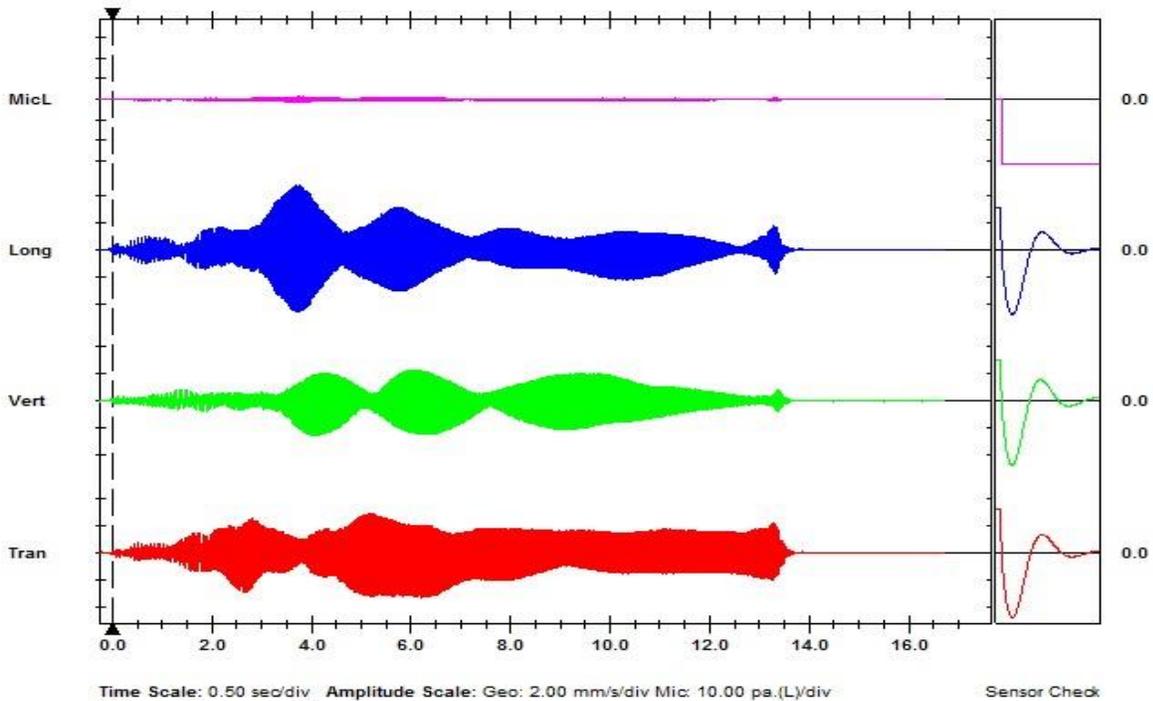
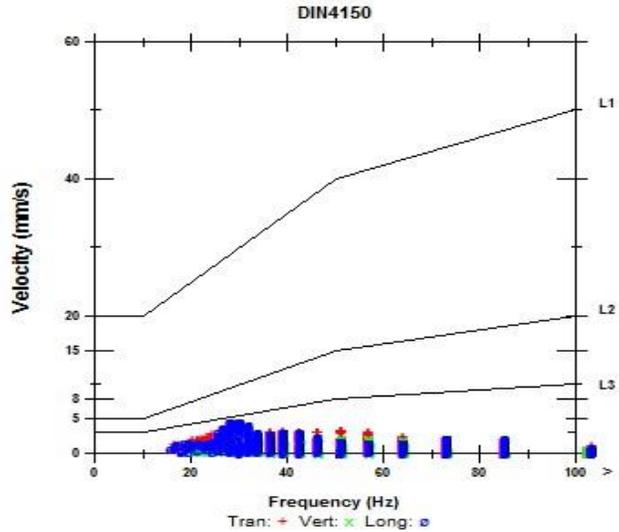
**Notes**  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_YSM  
 Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMION  
 General: PETROBLAST SAS

**Extended Notes**  
 PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 1.50 pa.(L) at 3.766 sec  
**ZC Freq** 32 Hz  
**Channel Test** Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	3.24	2.56	4.70	mm/s
ZC Freq	51	34	28	Hz
Time (Rel. to Trig)	6.213	4.064	3.681	sec
Peak Acceleration	0.0994	0.0812	0.0994	g
Peak Displacement	0.0159	0.0113	0.0248	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.3	3.9	

Peak Vector Sum 4.86 mm/s at 3.749 sec



Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



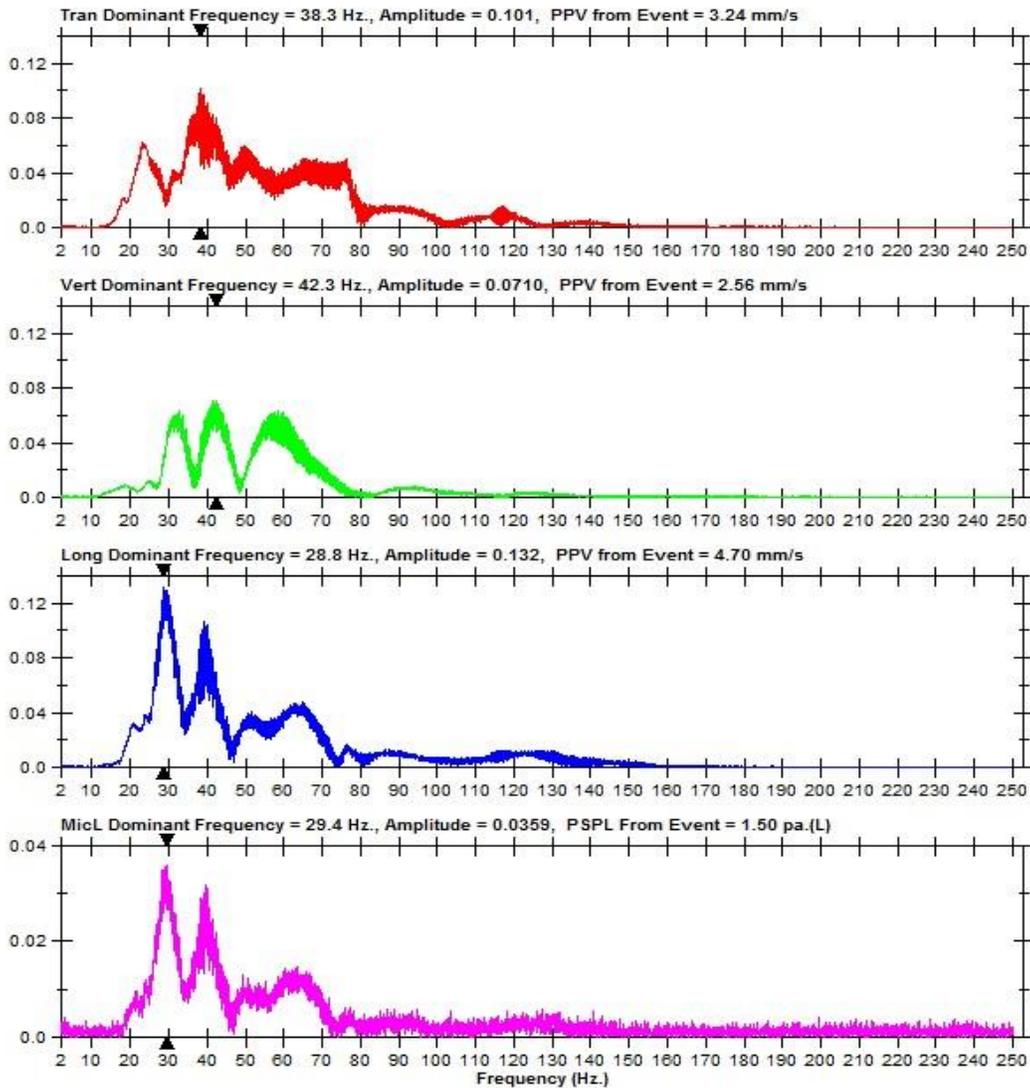
# FFT Report

Date/Time Long at 14:36:12 December 16, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration August 31, 2017 by Instantel  
File Name P894H7DB.TC0  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SIMICA\_VIBROCAMION  
General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls





Event Report

Date/Time Vert at 14:39:22 December 16, 2017  
 Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
 Range Geo : 31.7 mm/s  
 Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
 Battery Level 6.1 Volts  
 Unit Calibration August 31, 2017 by InstanTEL  
 File Name P894H7DB.6H0  
 Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

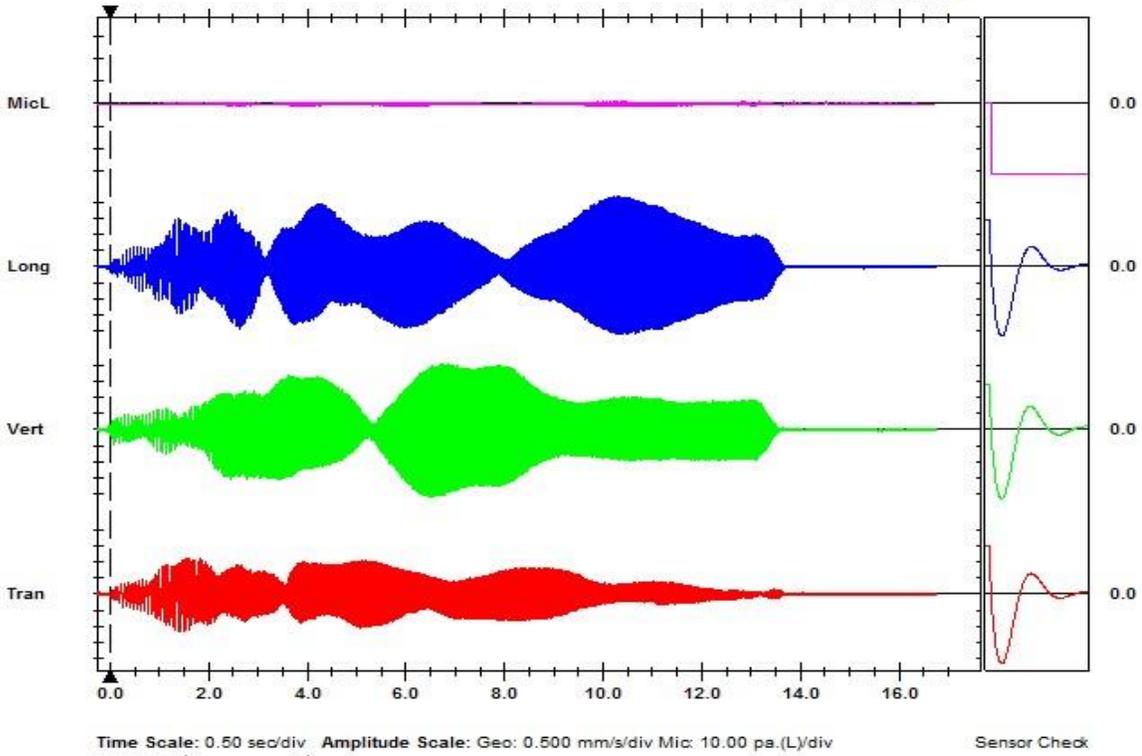
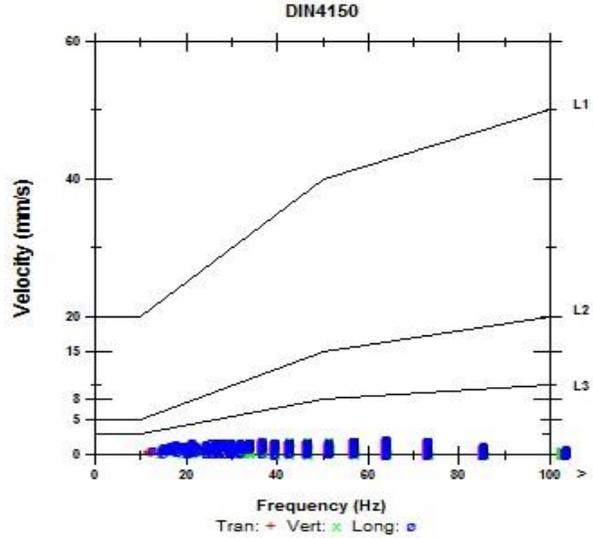
Notes  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMION  
 General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
 PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 1.00 pa.(L) at 13.026 sec  
 ZC Freq 47 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.19	2.13	2.21	mm/s
ZC Freq	19	47	64	Hz
Time (Rel. to Trig)	1.383	6.490	10.233	sec
Peak Acceleration	0.0381	0.0729	0.0928	g
Peak Displacement	0.00895	0.00848	0.0126	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.3	3.9	

Peak Vector Sum 2.58 mm/s at 6.526 sec





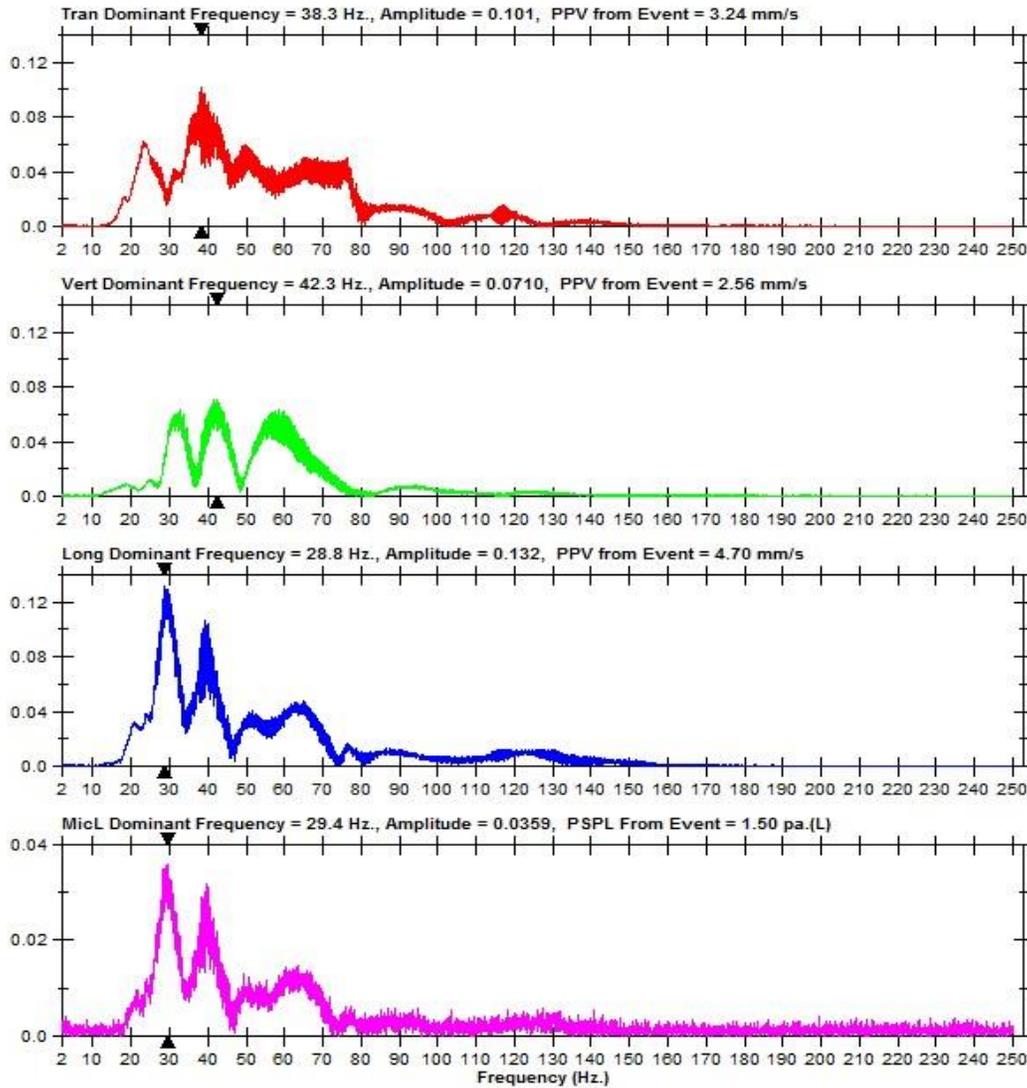
# FFT Report

Date/Time Long at 14:36:12 December 16, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration August 31, 2017 by InstanTEL  
File Name P894H7DB.TC0  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMION  
General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls





Event Report

Date/Time Long at 14:42:10 December 16, 2017  
 Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
 Range Geo: 31.7 mm/s  
 Record Time 14.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
 Battery Level 6.1 Volts  
 Unit Calibration August 31, 2017 by InstanTEL  
 File Name P894H7DB.E40  
 Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

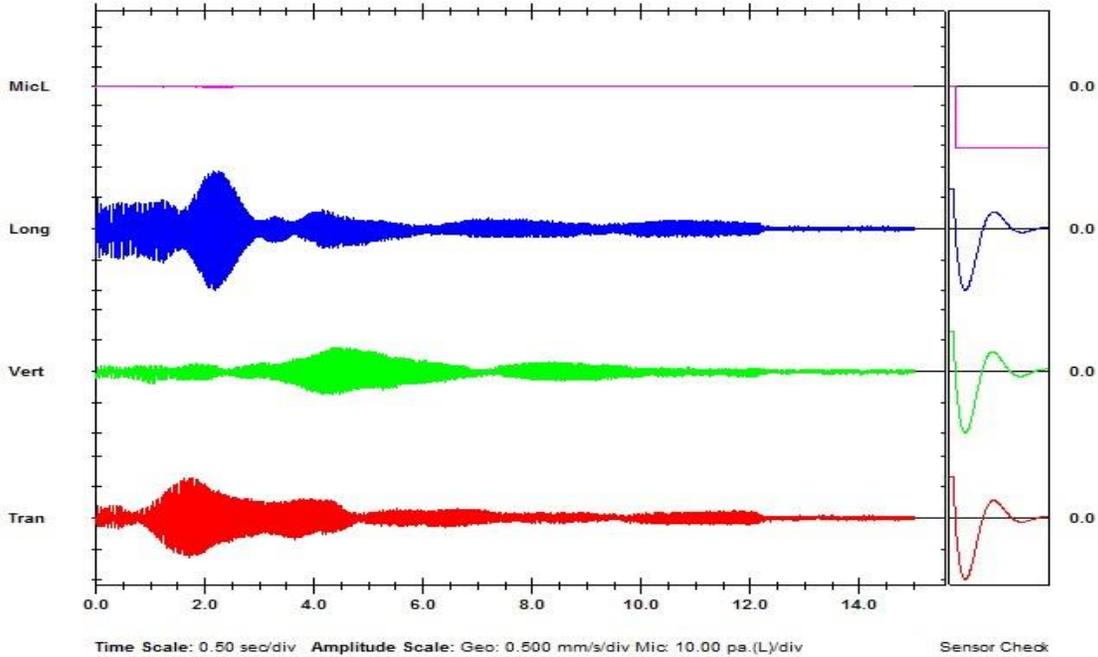
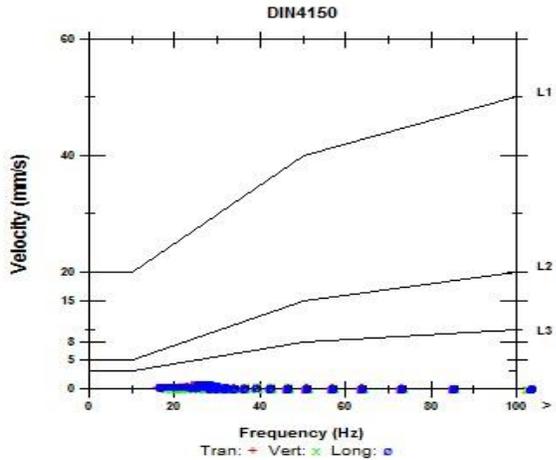
Notes  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMION  
 General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
 PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 0.500 pa.(L) at 0.002 sec  
 ZC Freq >100 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.635	0.381	0.984	mm/s
ZC Freq	24	39	27	Hz
Time (Rel. to Trig)	1.625	4.355	2.182	sec
Peak Acceleration	0.0149	0.0133	0.0182	g
Peak Displacement	0.00398	0.00156	0.00547	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.7	3.3	3.9	

Peak Vector Sum 0.991 mm/s at 2.182 sec



Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



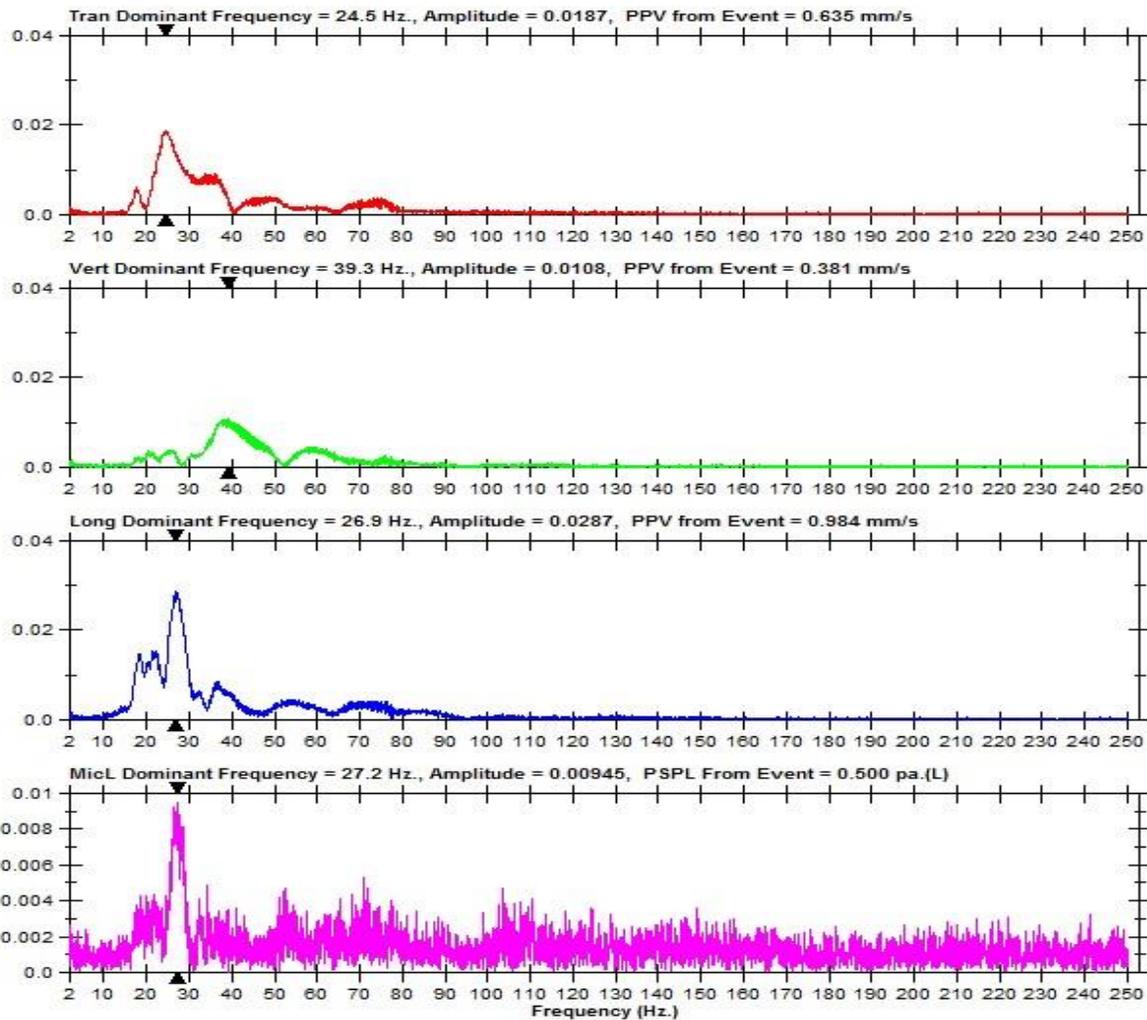
## FFT Report

Date/Time Long at 14:42:10 December 16, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 14.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration August 31, 2017 by Instantel  
File Name P894H7DB.E40  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMION  
General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls



# ANEXO 4. REGISTRO DE VELOCIDAD DE PARTÍCULA SOBRE ESTRUCTURAS SENCIBLES A VIBRACIONES - IGLESIA

10 M



## Event Report

**Date/Time** Tran at 10:48:11 December 17, 2017  
**Trigger Source** Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
**Range** Geo : 31.7 mm/s  
**Record Time** 14.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
**Job Number:** 1

**Notes**  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
 User Name: EXPLORACION SIMICA\_VIBROCAMION  
 General: PETROBLAST SAS

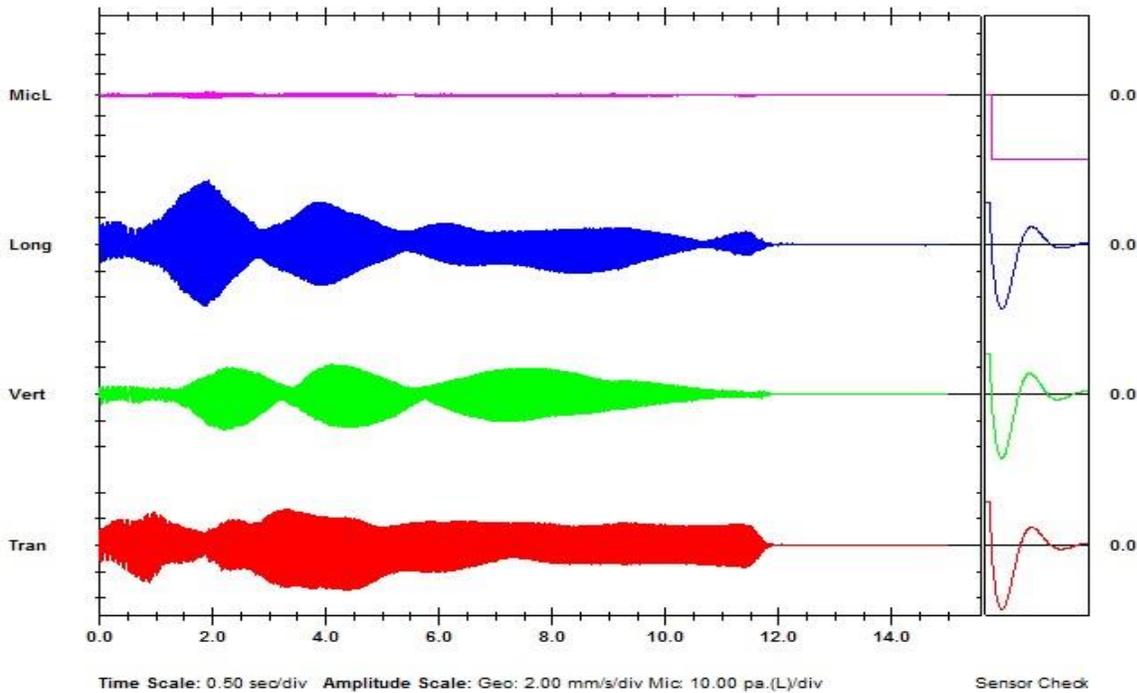
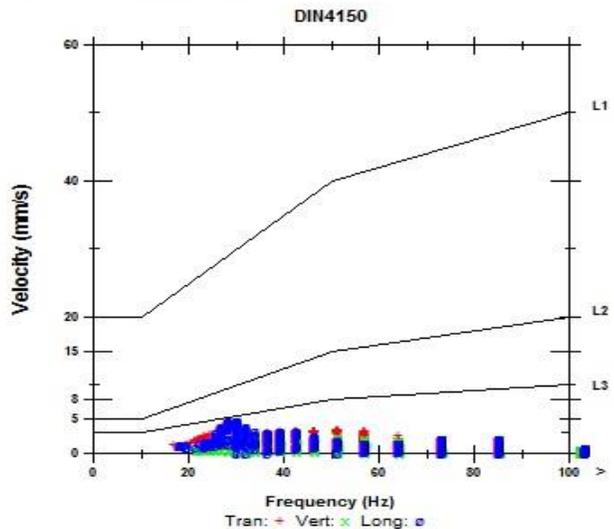
**Extended Notes**  
 PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls

**Microphone** Linear Weighting  
**PSPL** 1.50 pa.(L) at 1.847 sec  
**ZC Freq** 30 Hz  
**Channel Test** Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	3.43	2.70	4.87	mm/s
ZC Freq	51	37	30	Hz
Time (Rel. to Trig)	4.419	2.183	1.932	sec
Peak Acceleration	0.104	0.0829	0.106	g
Peak Displacement	0.0157	0.0117	0.0253	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.3	7.6	7.2	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.3	3.9	

Peak Vector Sum 5.08 mm/s at 1.932 sec

**Serial Number** BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
**Battery Level** 6.1 Volts  
**Unit Calibration** August 31, 2017 by Istantel  
**File Name** P894H7DB.U20  
**Scaled Distance** 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)



Fuente (PetroBlast SAS, 2017)



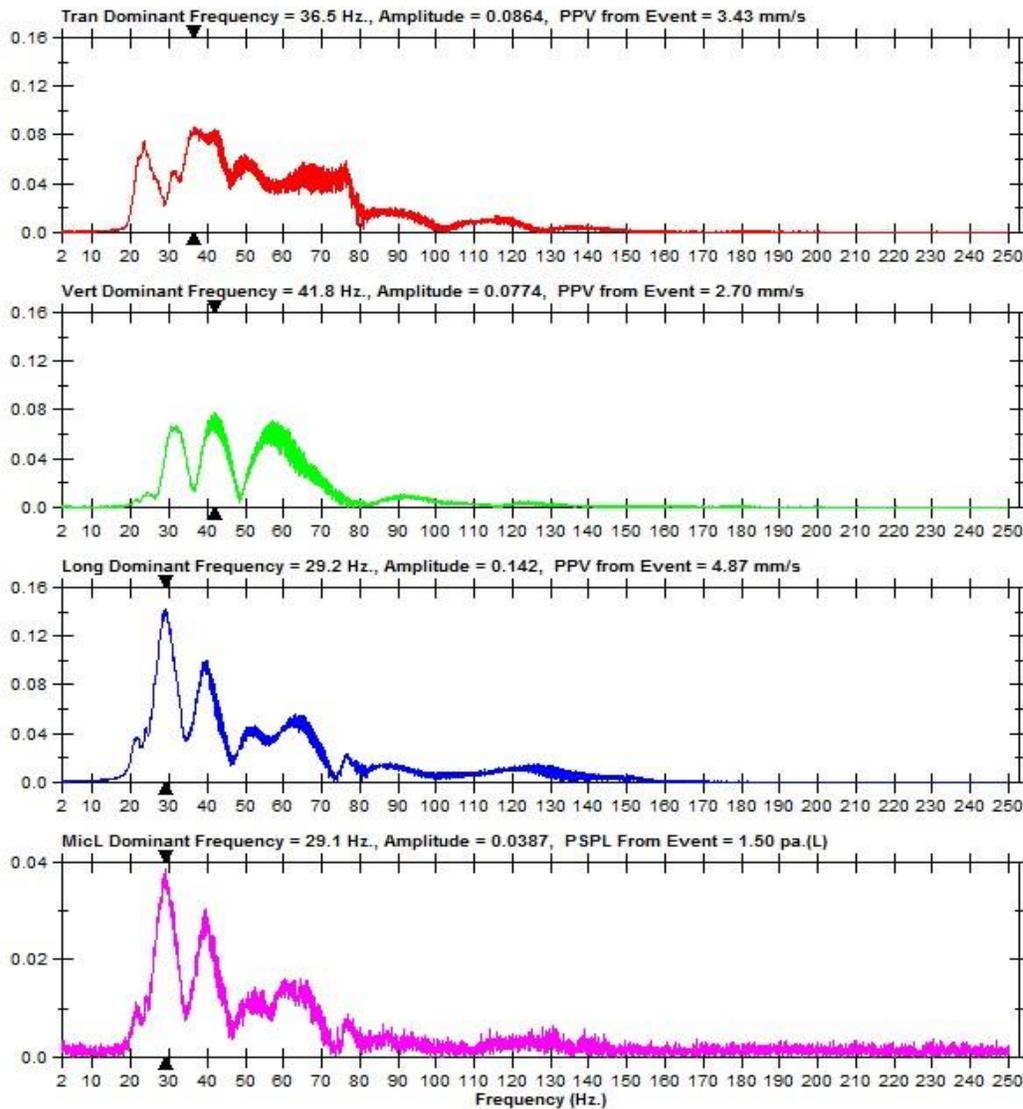
# FFT Report

Date/Time Tran at 10:48:11 December 17, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s, Mic: 2.00 pa.(L)  
Range Geo : 31.7 mm/s  
Record Time 14.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BA19726 V 10.72-8.17 BlastMate III  
Battery Level 6.1 Volts  
Unit Calibration August 31, 2017 by Instantel  
File Name P894H7DB.U20  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHYSICAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_VIBROCAMIION  
General: PETROBLAST SAS

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Vibrations Controls





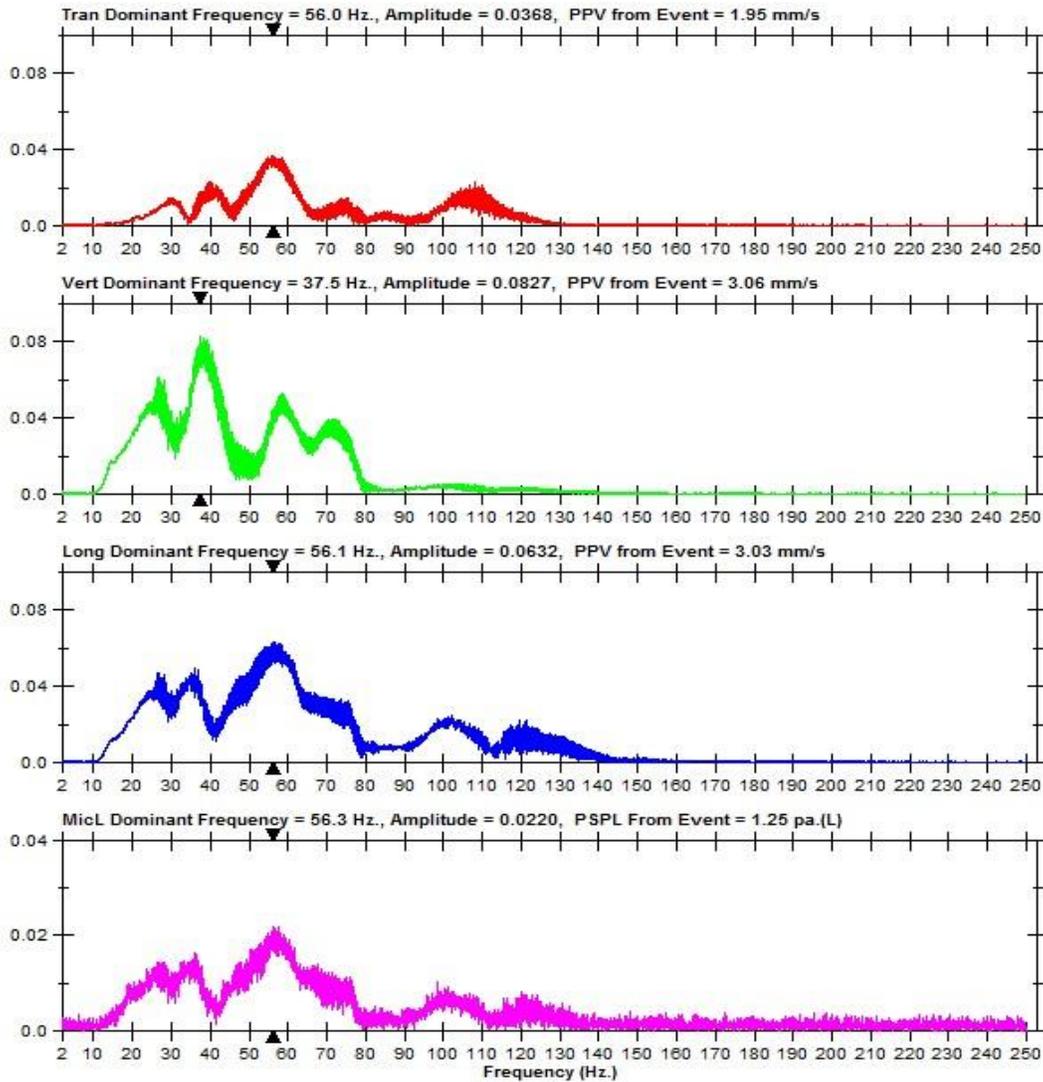
# FFT Report

Date/Time Vert at 10:48:22 December 17, 2017  
Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
Range Geo: 31.7 mm/s  
Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
Battery Level 6.2 Volts  
Unit Calibration July 24, 2017 by InstanTEL  
File Name K732H7DH.XK0  
Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
Client: VECTOR GEOPHISYCAL  
User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
PetroBlast S.A.S.\_Blast Vibrations Controls





Event Report

Date/Time Vert at 10:48:22 December 17, 2017  
 Trigger Source Geo: 0.130 mm/s  
 Range Geo: 31.7 mm/s  
 Record Time 16.75 sec (Auto=3Sec) at 1024 sps  
 Job Number: 1

Serial Number BE9732 V 10.72-8.17 MiniMate Plus  
 Battery Level 6.2 Volts  
 Unit Calibration July 24, 2017 by Instantel  
 File Name K732H7DH.XK0  
 Scaled Distance 0.3 (0.1 m, 0.1 kg)

Notes  
 Location: DPTO TOLIMA\_ANH\_V\_VSM  
 Client: VECTOR GEOPHISYCAL  
 User Name: EXPLORACION SISMICA\_MINIVIBROS  
 General: PETROBLAST S.A.S. ATILA

Extended Notes  
 PetroBlast S.A.S.\_Blast Vibrations Controls

Microphone Linear Weighting  
 PSPL 1.25 pa.(L) at 8.129 sec  
 ZC Freq 85 Hz  
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.95	3.08	3.03	mm/s
ZC Freq	73	39	73	Hz
Time (Rel. to Trig)	8.553	5.116	8.395	sec
Peak Acceleration	0.0895	0.0812	0.123	g
Peak Displacement	0.00420	0.0122	0.00941	mm
Sensor Check	Passed	Passed	Passed	
Frequency	7.4	7.6	7.3	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.5	3.8	

Peak Vector Sum 3.31 mm/s at 9.692 sec

