



Universidad Mayor de San Andrés  
Facultad de Ingeniería  
Carrera de Ingeniería Industrial



**REVISTA INDUSTRIAL 4.0**  
Edición Digital Nro. 4  
Mayo 2022

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

<b>M.Sc. Oscar Arnaldo Heredia Vargas</b>	<b>Rector</b>
<b>Phd. Maria García Moreno</b>	<b>Vicerectora</b>
<b>Ing. José Alberto Vásquez</b>	<b>Decano a.i. Facultad de Ingeniería</b>
<b>Ing. Teodoro Busch Dekovice</b>	<b>ViceDecano a.i. Facultad de Ingeniería</b>
<b>Ing. Franz José Zenteno Benitez</b>	<b>Director de Carrera Ingeniería Industrial</b>

**Revista Industrial 4.0  
Edición Impresa N° 4 Mayo 2022**

**Comite Editor:**

**Ing. Fernando Sanabria Camacho  
Ing. Grover Sanchez Eid  
Ing. Mario Zenteno Benitez  
Ing. Oswaldo Terán Modragón  
Ing. Mónica Lino Humerez**

**Diseño Versión Impresa & Web:  
Ing. Enrique Orosco Crespo**

**Imprenta:  
Walking Graf**

**Deposito Legal:  
4-3-68-20**

**Web:  
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>  
Email:  
[revistaindustrial4.0@umsa.bo](mailto:revistaindustrial4.0@umsa.bo)**

**Dirección:  
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.  
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.  
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402**

## PRESENTACIÓN

Con mucho orgullo presento el cuarto número de la revista Industrial 4.0, que responde al trabajo desarrollado por el Comité Editor y la contribución permanente de Investigadores docentes y universitarios que desarrollan sus actividades en diferentes áreas del conocimiento de la ingeniería. La regularidad de la publicación permite cumplir con los objetivos que tiene una carrera universitaria integrada: fomentar la investigación en todos los niveles de formación y difundir el trabajo multidisciplinario que llevan adelante.

Es importante que una investigación deba presentar alternativas de soluciones a problemas identificados, las que deben integrar los conocimientos tecnológicos especializados de los ingenieros en las diferentes áreas y no descuidar la opinión de la población la que es al final su beneficiaria.

Fomentar la investigación en la comunidad universitaria es un objetivo que tiene la carrera de Ingeniería Industrial conjuntamente con sus tres institutos de investigación y la unidad de posgrado; todos los graduados desarrollan actividades no curriculares de investigación como requisito previo la titulación, participan en forma activa en los diferentes proyectos que llevan adelante los investigadores, y como resultado varios trabajos son publicados por este medio.

En el presente número se toca temas relacionados con la construcción, industria de alimentos, seguridad industrial y salud ocupacional, ingeniería de mantenimiento y ecología; temas muy diversos pero que hacen a las diferentes áreas de formación de un ingeniero. Agradecer a los todos los que postularon y presentaron sus artículos para la divulgación.

Reiterar los agradecimientos a los miembros del Comité Editor, que de manera desinteresada dan su tiempo para revisar y aprobar los documentos que atienden la convocatoria que se realiza oportunamente.



**Ing. MBA. Franz José Zenteno Benítez**  
**DIRECTOR**  
**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

*Ing. MBA. Franz José Zenteno Benítez*  
**DIRECTOR**  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

# EVALUACIÓN DE VIBRACIONES DE CUERPO ENTERO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO BOLIVIANA

Ing. Miguel Iván Colque Huen, ORCID 0000-0002-0967-8657  
[icolque77@gmail.com](mailto:icolque77@gmail.com)

Ing. Anaceli Espada Silva ORCID 0000-0001-5836-7348  
[esatespada@umsa.bo](mailto:esatespada@umsa.bo)

Ingeniería Industrial, Universidad Mayor de San Andrés

Recibido: 14 de marzo; aprobado: 6 de mayo

## Resumen

Las operaciones de extracción de minerales a cielo abierto son un trabajo diario e intenso que se realiza con maquinaria pesada definidos en esta actividad como equipos mineros los cuales producen *vibraciones mecánicas* en tareas de carga y transporte de mineral y/o material estéril, así como para excavación, nivelación de caminos y movimiento de tierra estéril. Esta labor determina la necesidad de realizar monitoreos de agentes de riesgo ocupacional físicos siguiendo la metodología indicada en la norma NB/ISO 2631-1: 2009 “Vibración y Choque Mecánico - Evaluación de la Exposición Humana a Vibración de Cuerpo Entero. Parte 1: Requisitos Generales” que permitan obtener valores de *vibraciones de cuerpo entero* (WBV) y compararlos con los establecidos por normas de aplicación internacional en el ámbito de la higiene industrial. Si estos valores exceden lo establecido en la norma adoptada entonces se definen los controles para preservar la salud de los operadores de equipos mineros, analizando los factores que influyen en la exposición al riesgo cuantificado, con una estrategia de control y una reevaluación periódica de las vibraciones en los equipos mineros que requieran una intervención para que no superen los límites permisibles establecidos en este estudio garantizando el bienestar del trabajador. Se midió la *aceleración cuadrática media ponderada en frecuencia* ( $A_{R.M.S.}$ ) de 67 equipos mineros (perforadoras de taladro, palas cargadoras, cargadores frontales, camiones mineros, motoniveladoras, excavadoras, tractores a cadenas, tractores a ruedas, compactadoras y cisternas mineras) que requieren una cantidad de 207 operadores quienes trabajan en cuatro guardias, en jornadas de 12 horas (donde se tienen efectivamente 10 horas de exposición) durante siete días de trabajo por siete días de descanso en turnos diurnos y nocturnos en una empresa minera boliviana

modelo. En general los resultados de las mediciones de WBV indican que el 65% de los equipos monitoreados no presentan un riesgo para la salud de sus operadores, mientras el 35% tiene un riesgo potencial para afectar la salud de los mismos; las conclusiones del estudio de acuerdo a los valores de la aceleración de raíz cuadrada media ( $A_{R.M.S.}$ ) calculados para diez horas de operación  $A_{(10)}$  obtenidos en el monitoreo de WBV en los cuatro GES de operadores de equipos mineros (operador de perforación, operador de carguío, operador de acarreo y operador de equipos auxiliares) confirman que ninguna mediana sobrepasa el AL ni el TLV por lo tanto no existe un probable riesgo para la salud de los operadores y es muy improbable que ocurra una lesión por vibración de cuerpo entero.

### Palabras Clave

**Vibración mecánica:** todo movimiento oscilatorio de un cuerpo que ocurre cuando hay un movimiento o velocidad alternos en direcciones opuestas respecto a su posición de referencia.

**Vibración de cuerpo entero (WBV- Whole Body Vibration):** vibración transmitida a todo el cuerpo cuando gran parte del peso corporal descansa sobre una superficie que vibra.

**Aceleración cuadrática media ponderada en frecuencia ( $A_{R.M.S.}$ ):** valor total del nivel de aceleración promedio durante el período de medición; es la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los valores ( $m/s^2$ ).

### Abstract

Opencast mineral extraction operations are a daily and intense work with heavy machinery defined in the activity as mining equipment, which produces *mechanical vibrations* in loading and transporting mineral and / or sterile material, as well as, for excavation, road leveling and waste earth movement. This work determines the need to monitor physical occupational risk agents following the methodology indicated in standard NB/ISO 2631-1: 2009 "Vibration and Mechanical Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration. Part 1: General Requirements" to obtain *whole body vibration (WBV)* values and compare them with those established by internationally applicable standards in the field of industrial hygiene. If these values exceed the adopted standard, then the controls be defined to preserve the health of the mining equipment operators, analyzing the factors that influence exposure to quantified risk, with a control strategy and periodic reassessment of vibrations in mining equipment that requires an intervention so that they do not exceed the permissible limits established in this study, guaranteeing the well-being of the

worker. The *frequency weighted root mean square acceleration* ( $A_{R.M.S.}$ ) of 67 mining equipment (drill rigs, wheel loaders, front loaders, mining trucks, motor graders, excavators, crawler tractors, wheel tractors, compactors and mining tanks) was measured. They require a number of 207 operators who work in four guards, in 12-hour shifts (where there are effectively around 10 hours of exposure) for seven days of work for seven days of rest in day and night shifts within a model Bolivian mining company. In general, the results of the WBV measurements indicate that 65% of the monitored equipment does not present a risk to the health of its operators, while 35% has a potential risk to affect their health; the conclusions of the study according to the root mean square acceleration values ( $A_{R.M.S.}$ ) calculated for ten hours of operation  $A_{(10)}$  obtained in the WBV monitoring in the four GES of mining equipment operators (drilling operator, loading operator, hauling operator and auxiliary equipment operator) confirm that median no exceeds the AL or the TLV, therefore there is no probable risk to the health of the operators and it is very unlikely that an injury due to body vibration will occur whole.

## Keywords

**Mechanical vibration:** any oscillatory movement of a body that occurs when there is an alternating movement or speed in opposite directions with respect to its reference position.

**Whole Body Vibration (WBV):** vibration transmitted to the whole body when much of the body weight rests on a vibrating surface.

**Frequency weighted root mean square acceleration ( $A_{R.M.S.}$ ):** total value of the average acceleration level during the measurement period; is the square root of the sum of squares of the values ( $m/s^2$ ).

## Introducción

La exposición laboral a WBV en este estudio se asocia al riesgo de adquirir problemas de salud por la vibración transmitida al cuerpo a través del asiento del equipo minero y es más significativo cuando las magnitudes de vibración son altas y los tiempos de exposición son largos. Es así que los efectos adversos para la salud de los operadores de equipos mineros sí están identificados pero no se dispone de datos objetivos y cuantificables a partir de los cuales se pueda estimar el alcance de los niveles de vibración dañinos en la minería a cielo abierto boliviana y el problema surge en ¿cómo saber si los niveles de vibraciones de cuerpo entero están dentro de los límites permisibles? *“para relacionar este tipo de vibración con*

*el operador antes de la aparición de sus síntomas y distinguirla de otras enfermedades comunes como mareos, dolores de espalda y otros” (ACGIH, 2019).*

El D.L.16998 Ley General de Higiene y Seguridad Ocupacional y Bienestar, establece: *“Eliminar, aislar o reducir los ruidos y/o vibraciones perjudiciales para la salud de los trabajadores y la población circundante”.*

También en referencia a los riesgos físicos indica: *“En todos los lugares de trabajo donde los trabajadores estén expuestos a ruidos y vibraciones excesivos como consecuencia del proceso, se debe disminuir la intensidad de éstos a niveles aceptables, por medios adecuados de ingeniería o en su defecto dotar al personal expuesto de elementos de protección contra ruidos y vibraciones, estipulados por la autoridad competente”.*

Sin embargo no se indican límites de vibración específicos y tampoco la legislación boliviana desarrolla una estrategia definida para la evaluación y el control de las vibraciones ocupacionales.

Actualmente la Norma Técnica de Seguridad NTS – 009/18 dentro del contenido de su Programa de Seguridad y Salud en el Trabajo, determina la obligación de realizar monitoreos a los agentes de riesgo ocupacional mediante estudios específicos: Vibración y evaluar los resultados adoptando una norma de referencia específica en ausencia de una norma en la legislación vigente.

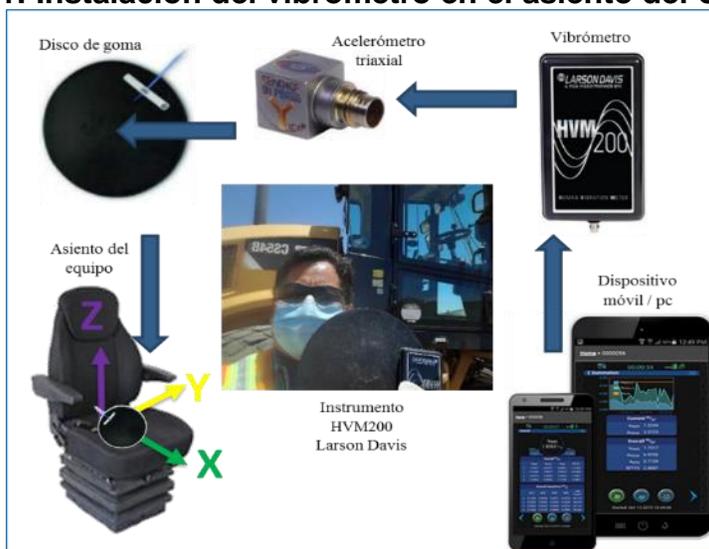
El objetivo de este estudio fue cuantificar los niveles de exposición diaria a vibraciones de cuerpo entero (WBV) experimentado por los operadores de equipos mineros según NB/ISO 2631-1: 2009, para la prevención de enfermedades ocupacionales en la minería boliviana a cielo abierto.

## **Desarrollo**

La metodología para la medición de la WBV se realizó siguiendo los lineamientos indicados en la norma NB/ISO 2631-1: 2009 “Vibración y Choque Mecánico - Evaluación de la Exposición Humana a Vibración de Cuerpo Entero. Parte 1: Requisitos Generales”. Esta norma *“no contiene límites de exposición a la vibración, pero sí define métodos de evaluación, de modo que se puedan usar como base para los límites que pueden obtenerse por separado”.* (IBNORCA, 2009)

- Define la dirección y ubicación de la medición (punto 5.2 y 5.3 de NB/ISO 2631-1).

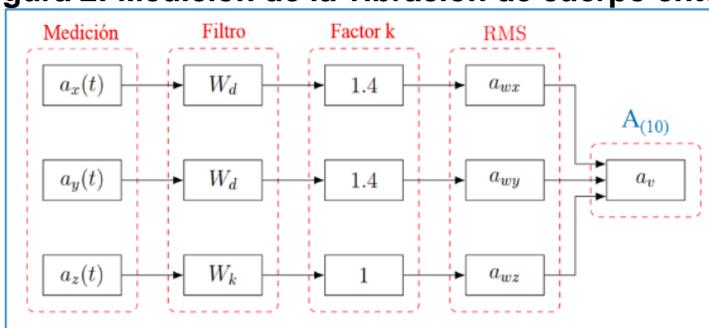
**Figura 1: Instalación del vibrómetro en el asiento del operador**



**Fuente:** Evaluación de la exposición a WBV en operadores mineros, UMSA 2021

- Indica el método de medición básico (punto 6.1 de NB/ISO 2631-1).

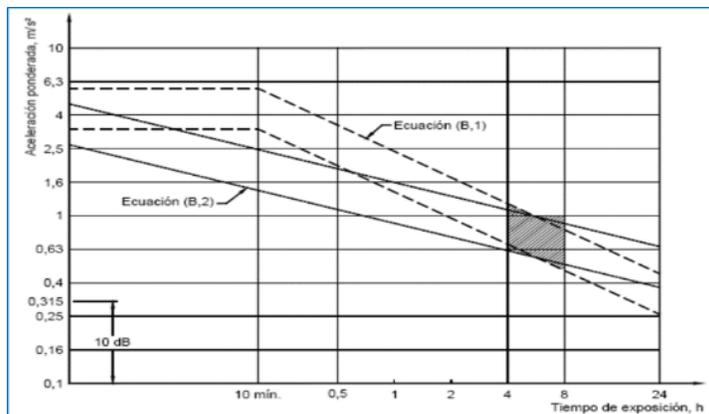
**Figura 2: Medición de la vibración de cuerpo entero**



**Fuente:** Evaluación de la exposición a WBV en operadores mineros, UMSA 2021

- Brinda la guía para la evaluación de la WBV (Anexo B de NB/ISO 2631-1).

**Figura 3: Zonas de precaución y orientación para la salud**



**Fuente:** NB/ISO 2631-1 Vibración y choque mecánico, IBNORCA 2009  
 Se aplica adicionalmente la estrategia para la evaluación de la exposición ocupacional propuesta por AIHA (Asociación de Higienistas Industriales de Norteamérica) para consolidar una línea base respecto a la evaluación de la WBV que experimentan los operadores de equipos mineros.

- Se “caracterizó la exposición ocupacional según el lugar de trabajo, la maquinaria pesada, el proceso operativo” (AIHA, 2010) y los datos sobre emisiones de WBV que tiene cada tipo de equipo minero de acuerdo a las estimaciones de vibración que cada fabricante indica en sus *Manuales de Operación y Mantenimiento – MOM*.

**Tabla 1: Emisiones de WBV según el MOM del fabricante del equipo minero**

EQUIPO	IMAGEN	MARCA	MODELO	WBV (fabricante)
Camión minero		Caterpillar	789 C 793 D	0.87 [m/s <sup>2</sup> ]
Camión cisterna		Caterpillar	785 C	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]
Cargador frontal		Caterpillar	994 D 992 G	0.60 [m/s <sup>2</sup> ]
Compactadora		Caterpillar	CS 563 D	0.53 [m/s <sup>2</sup> ]
Tractor a cadenas		Caterpillar	D10 R D10 T2	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]
Excavadora		Caterpillar	336 D 349 D	0.65 [m/s <sup>2</sup> ]

Motoniveladora		Caterpillar	16 H 16 M	0.78 [m/s <sup>2</sup> ]
Pala cargadora		Komatsu	PC-4000 PC-8000	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]
Perforadora		Atlas Copco	PV-271 PV-351	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]
Tractor a ruedas		Caterpillar	834 H	1.27 [m/s <sup>2</sup> ]

**Fuente:** Manuales de Operación y Mantenimiento de equipos mineros, MOM 2019

- Se determinaron GES (grupos de exposición similar) con los operadores de equipos mineros según su cargo, proceso (minado, apoyo), trabajo (perforación, carguío, acarreo) y tarea (perforar, cargar, acarrear, nivelar, excavar, compactar, regar).

**Tabla 2: Grupos de exposición similar**

GES	CODIGO	NÚMERO DE OPERADORES
Operador de perforación	M(1a)	20
Operador de carguío	M(1b)	39
Operador de acarreo	M(1c)	83
Operador de equipos auxiliares	M(1d)	65

**Fuente:** Evaluación de la exposición a WBV en operadores mineros, UMSA 2021

- Se calculó la cantidad de muestras para ejecutar el monitoreo de la WBV tomando el número total de los operadores dentro de cada GES siguiendo las recomendaciones de NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Norteamérica) “para un nivel de confianza del 90% del tamaño de la muestra a monitorear” (NIOSH, 1977).

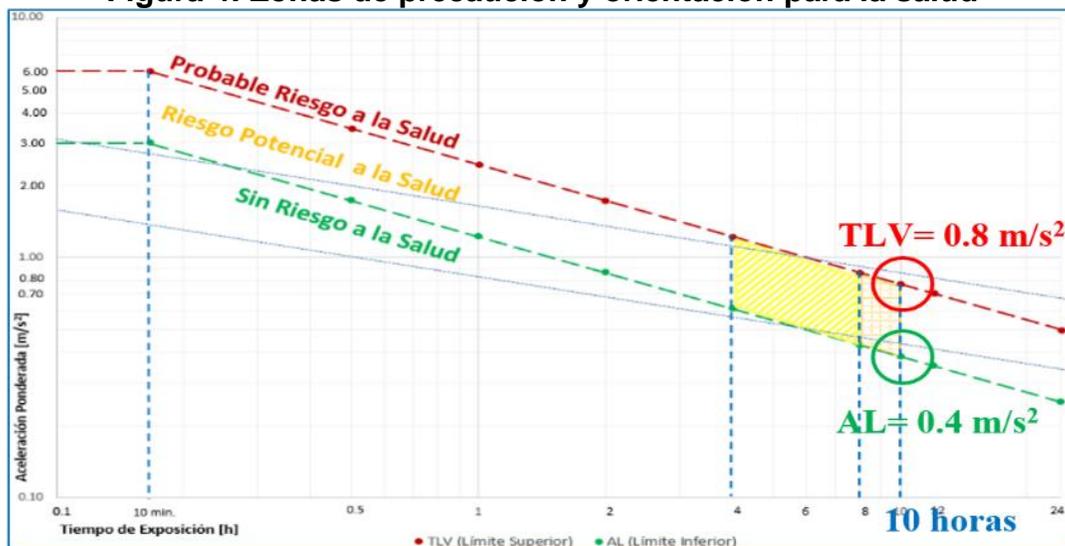
**Tabla 3: Grupos de exposición similar**

Tamaño del grupo de empleados											(N)								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11-12	13-14	15-17	18-20	21-24	25-29	30-37	38-49	50	50+
Número mínimo de empleados medidos											(n)								
1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	22

**Fuente:** Occupational Exposure Sampling Strategy, NIOSH 1977

- Se definió los límites de exposición para WBV utilizando las recomendaciones de la ACGIH (Conferencia Gubernamental Norteamericana de Higienistas Industriales) de acuerdo al *límite de acción* (AL) y el *límite de exposición* (TLV).

**Figura 4: Zonas de precaución y orientación para la salud**



**Fuente:** Cálculo con base en Threshold Limit Values (TLV) and Action Levels (AL), ACGIH 2019

- El instrumento de medición de WBV utilizado fue un vibrómetro modelo HVM200, fabricado por LARSON DAVIS de procedencia norteamericana, que se conecta al acelerómetro triaxial contenido dentro de un disco flexible de goma para medir la vibración en los tres ejes traslacionales (longitudinal = eje x; lateral = eje y; vertical = eje z). Los resultados que registra el vibrómetro HVM200 los entrega en términos de aceleración cuadrática media ponderada en frecuencia  $A_{R.M.S.}$  expresados en unidades del sistema internacional ( $m/s^2$ ).
- Los períodos de medición variaron entre 60 y 300 minutos en los equipos mineros durante el curso normal de operación sin causar ninguna interferencia al trabajo cotidiano de los operadores mineros.

### **Análisis y Evaluación de Resultados**

La primera aproximación para la verificación del cumplimiento de los niveles de WBV fue obtener los valores *promedio* mediante la medición en los equipos mineros

sin considerar a los operadores donde estos promedios por tipo de maquinaria pesada fueron comparados con el valor indicado por cada fabricante en su Manual de Operación y Mantenimiento de donde es posible conocer el nivel de vibración que generan los equipos mineros y su estado actual.

**Tabla 4: Comparación entre WBV<sub>medido</sub> versus WBV<sub>fabricante</sub>**

EQUIPO	MARCA	WBV (fabricante)	WBV (promedio)	ESTADO	EJE (dominante)
Camión minero	Caterpillar	0.87 [m/s <sup>2</sup> ]	0.35 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	X
Camión cisterna	Caterpillar	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]	0.41 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Z
Cargador frontal	Caterpillar	0.60 [m/s <sup>2</sup> ]	0.55 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Z
Compactadora	Caterpillar	0.53 [m/s <sup>2</sup> ]	0.25 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Z
Tractor a cadenas	Caterpillar	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]	0.35 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Y
Excavadora	Caterpillar	0.65 [m/s <sup>2</sup> ]	0.19 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	X
Motoniveladora	Caterpillar	0.78 [m/s <sup>2</sup> ]	0.43 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Y
Pala cargadora	Komatsu	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]	0.32 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	X
Perforadora	Atlas Copco	0.50 [m/s <sup>2</sup> ]	0.15 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Z
Tractor a ruedas	Caterpillar	1.27 [m/s <sup>2</sup> ]	0.34 [m/s <sup>2</sup> ]	En control	Y

**Fuente:** MOM y Registros del vibrómetro HVM200

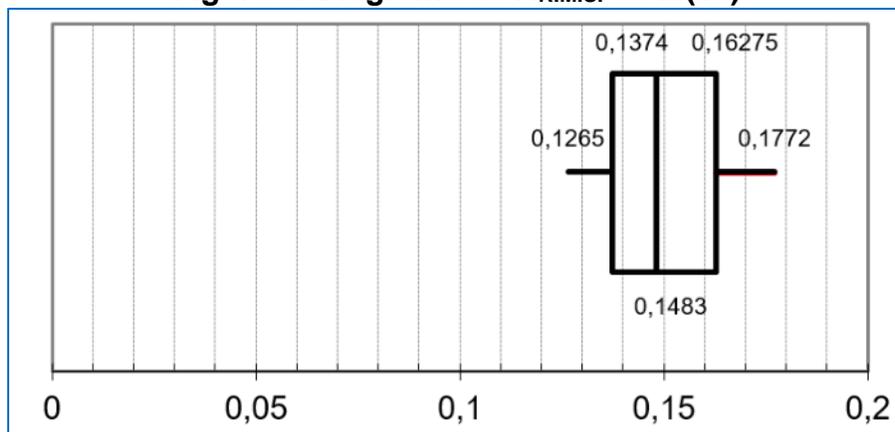
- De la comparación de los niveles alcanzados por WBV se conoce que los 10 tipos de equipos mineros se encuentran en control dentro de los parámetros estimados del fabricante. Mientras que por modelo de equipos el cargador frontal y el tractor a cadenas requieren que se amplíe su evaluación y se definan controles para su operación segura porque sus promedios medidos

resultaron muy próximos al valor estimado del fabricante, en esta evaluación no se consideran los límites de exposición ocupacional puesto que éstos solamente aplican a las personas y no así a maquinaria.

Para evaluar los niveles de WBV experimentados por los operadores se comparó los valores monitoreados con los límites de exposición ocupacional propuestos en este estudio. Se realizó un análisis por grupos de exposición similar (GES) a través de la utilización estadística de la *mediana* y la presentación de sus resultados en diagramas de “cajas y bigotes” (muestra a simple vista la mediana en su interior y los resultados máximos, mínimos) como una técnica de evaluación seguida en el campo de la higiene industrial que es una representación mucho más real del nivel de la WBV al cual están expuestos los operadores de equipos mineros.

- **M(1a) Operador de perforación:** se tomó 3 muestras en el GES donde la operación cuenta con controles bien definidos con poco desplazamiento del equipo minero (Atlas Copco). Con una mediana de **0.15 m/s<sup>2</sup>**, que resulta muy inferior al límite de acción (AL) y mucho menor al límite de exposición (TLV).

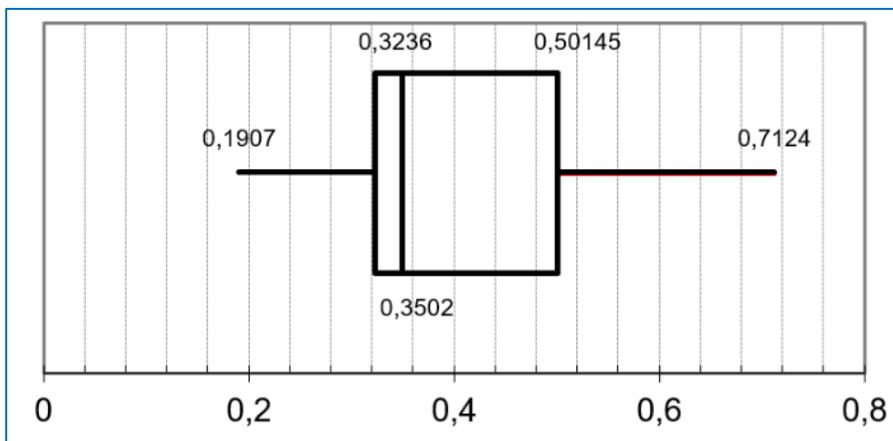
**Figura 5: Diagrama de A<sub>R.M.S.</sub> de M(1a)**



**Fuente:** Cálculo con base en resultados de HVM200

- **M(1b) Operador de carguío:** Se tomaron 6 muestras porque este GES se compone de dos tipos de equipos mineros: cargadores frontales (Caterpillar) y palas cargadoras (Komatsu). Con una mediana de **0.35 m/s<sup>2</sup>**, que resulta inferior al límite de acción (AL) y menor al límite de exposición (TLV). En el análisis se tienen muestras por encima del AL y una muestra con un valor máximo que se acerca hacia el TLV.

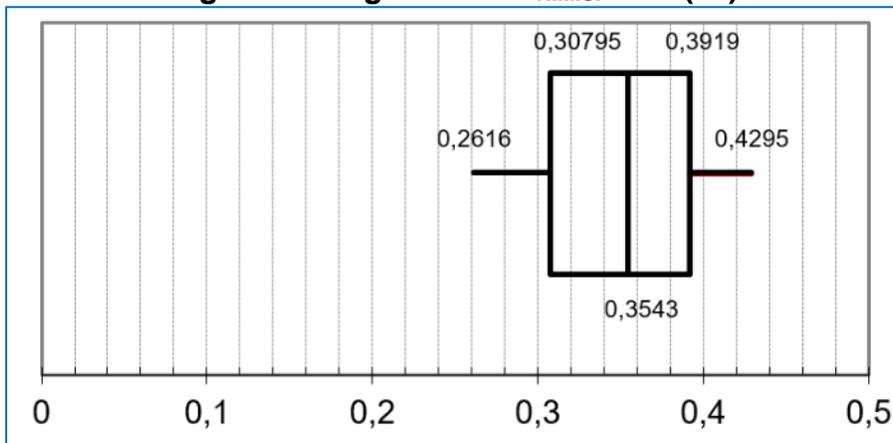
**Figura 6: Diagrama de A<sub>R.M.S.</sub> de M(1b)**



Fuente: Cálculo con base en resultados de HVM200

- **M(1c) Operador de acarreo:** Se tomó 3 muestras en el GES porque se trata de una operación bajo control en el continuo e intenso desplazamiento de los camiones mineros (Caterpillar). Con una mediana de **0.35 m/s<sup>2</sup>**, que resulta inferior al límite de acción (AL) y mucho menor al límite de exposición (TLV). En este GES existe una muestra que sobrepasa el AL como valor máximo de exposición a WBV.

Figura 7: Diagrama de A<sub>R.M.S.</sub> de M(1c)

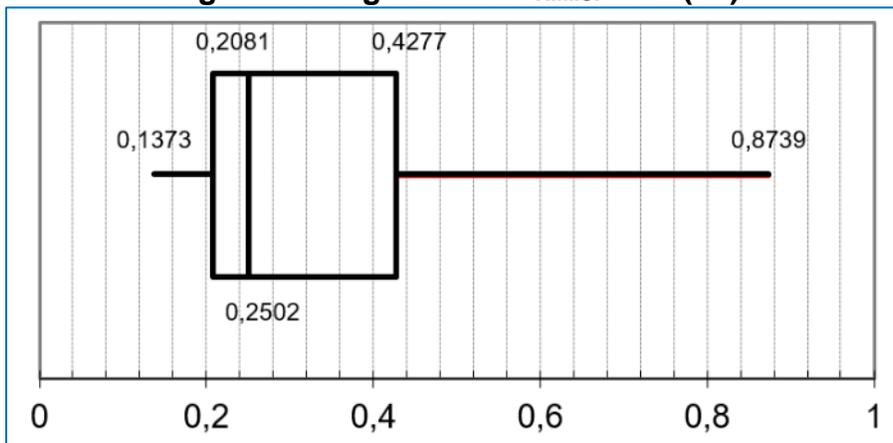


Fuente: Cálculo con base en resultados de HVM200

- **M(1d) Operador de equipos auxiliares:** Se tomaron 15 muestras en este GES porque se compone de seis tipos de equipos mineros todos del mismo fabricante Caterpillar los cuales son: tractor a cadenas, camión cisterna, motoniveladora, compactadora, tractor a ruedas y excavadora. Con una mediana de **0.25 m/s<sup>2</sup>**, que resulta inferior al límite de acción (AL) y mucho menor al límite de exposición (TLV). En este GES se tienen muestras por encima del AL una muestra con un valor máximo que sobrepasa el TLV. Los operadores en este GES son entrenados para operar cualquiera de los seis

tipos de equipos auxiliares que se tiene en la operación minera a cielo abierto.

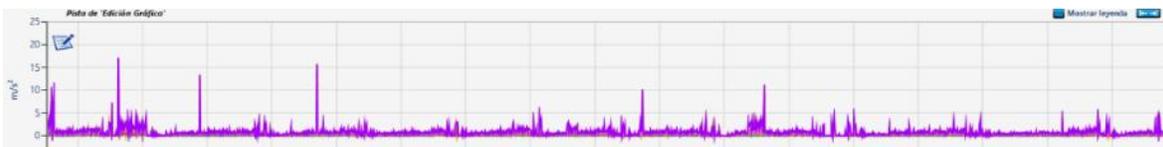
**Figura 8: Diagrama de A<sub>R.M.S.</sub> de M(1d)**



**Fuente:** Cálculo con base en resultados de HVM200

Las gráficas de la WBV obtenidas por el software del vibrómetro HVM200 hicieron posible interpretar en la operación de los equipos mineros el porcentaje en tiempo de trabajo en su tarea específica y el porcentaje en tiempo de trabajo complementario (desplazamiento de material, posicionamiento, conducción en retorno a su área de trabajo y otros) al cual se expone el operador durante su jornada de trabajo:

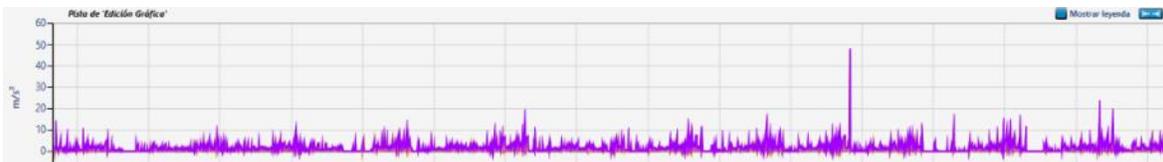
- **M(1a) Operador de perforación:** 85,8% en perforación, 14,2% en posicionamiento.



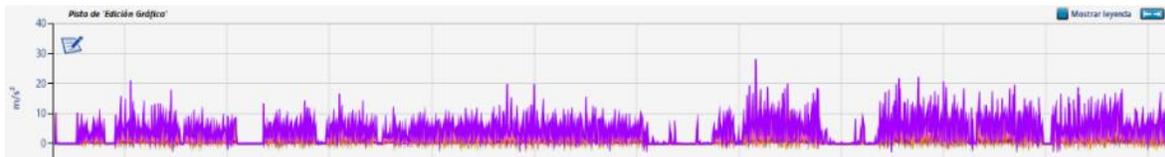
- **M(1b) Operador de carguío:** 76,2% en carguío, 23,8% en desplazamiento.



- **M(1c) Operador de acarreo:** 61,8% en acarreo, 38,2% en retorno al punto de carga.

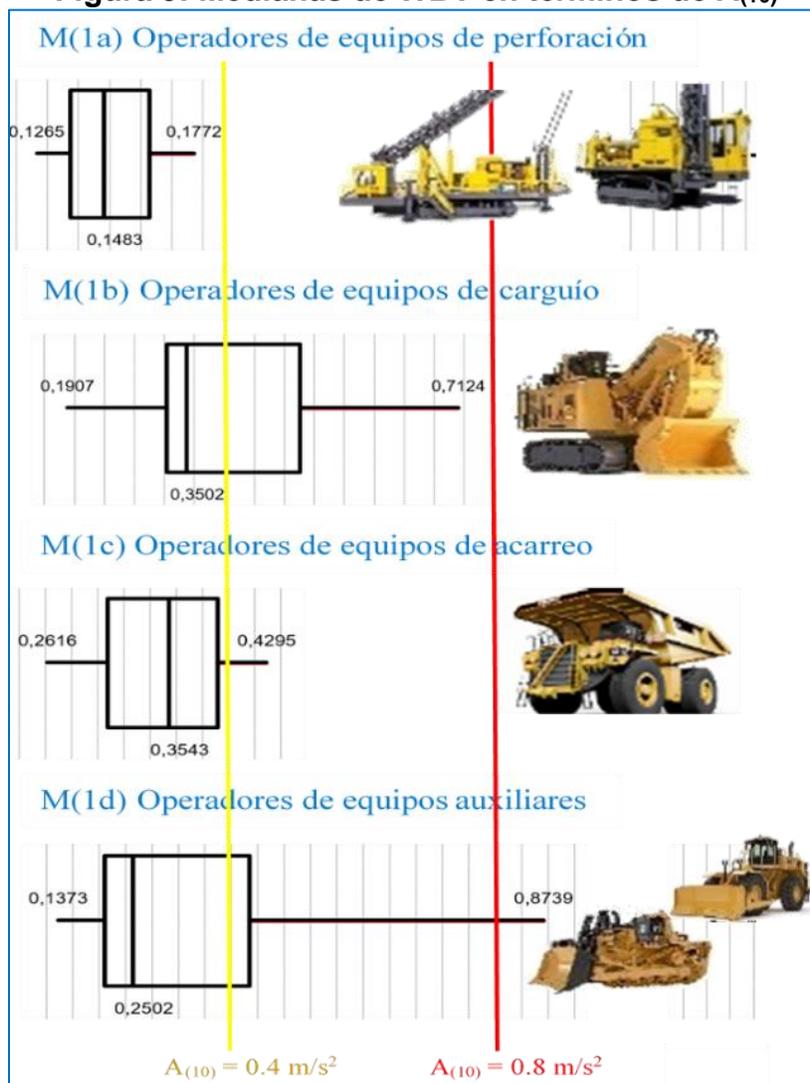


- **M(1d) Operador de equipos auxiliares:** 78,2% en operación, 21,8% en conducción.



La aceleración ponderada en tiempo para diez horas se la representa como una mediana  $A_{(10)}$  para cada GES la cual es comparada con el límite de acción (AL) [ $A_{(10)} = 0.4 \text{ m/s}^2$ ] y el límite de exposición (TLV) [ $A_{(10)} = 0.8 \text{ m/s}^2$ ]. En la figura 9 se muestra un resumen de la evaluación de los resultados obtenidos durante el monitoreo de la exposición a WBV para los operadores de equipos mineros por GES en el cual se observó que ninguna *mediana* sobrepasó el AL ni el TLV lo cual indica que su exposición está en control.

**Figura 9: Medianas de WBV en términos de  $A_{(10)}$**



**Fuente:** Cálculo con base en resultados de HVM200

Se identificó que los operadores de tractores a cadena y cargadores frontales por el tipo de trabajo que ejecutan y al tener valores de WBV entre AL y TLV tiene un riesgo potencial de afectar su salud, por lo tanto para entender de mejor manera cómo les afecta la vibración debe aplicarse el método de medición adicional propuesto por la NB/ISO 2631-1 (punto 6.3) aplicando el criterio del *factor de cresta* (CF) y usando el *valor de dosis de vibración* (VDV) para formular los controles y las recomendaciones adicionales a este estudio.

Una vez identificados los equipos mineros que generan niveles considerables de WBV y evaluados los GES de operadores de equipos mineros se deben usar los controles existentes y mejorar su aplicación de acuerdo a la jerarquía de control aplicable: controles de ingeniería, controles administrativos y controles de equipo de protección personal. En general el 65% de los equipos monitoreados no presentan un riesgo para la salud de sus operadores, mientras el 35% tiene un riesgo potencial para afectar la salud de los mismos.

- **Controles de ingeniería:** son generales con el fin de gestionar la WBV
  - **Diseño de vías de circulación y zonas de trabajo** - se mejoran las condiciones de vías y zonas operativas garantizando superficies regulares y controlando las variaciones del tipo de terreno que causan vibración en los equipos:
    - Pendientes longitudinales y transversales
    - Sistemas de drenaje a lo largo de las vías
    - Bermas de seguridad para las vías
  - **Sistemas de control de velocidad y Alerta** - se define la velocidad máxima de circulación para los camiones de acarreo a 40 Km/h. Sin embargo, se debe conducir de acuerdo a las condiciones operacionales y ambientales del terreno:
    - Sistema de control de DESPACHO
    - Sistema de gestión de FATIGA
    - Radios de comunicación para ALERTAS
  - **Mantenimiento Preventivo Programado** - se cumple con el mantenimiento periódico programado en los equipos mineros identificando y registrando fallas en las inspecciones diarias por problemas relacionados con:
    - Sistema de suspensión (asientos)

- Sistema de suspensión (equipo)
  - Sistema de dirección
  - Sistemas de rodado (llantas)
  - Sistema de transmisión
  - Sistema de frenos
- **Controles administrativos:** cumplimiento de los estándares operación en mina
    - **Entrenamiento e identificación de inadecuada operación de equipos** - se capacita periódicamente a los operadores sobre estándares de trabajo para reducir el impacto la productividad por lesiones personales y daños materiales:
      - La buena postura del operador y el uso del cinturón de seguridad
      - Las condiciones operativas del equipo (inspección previa)
      - Las condiciones del área donde se efectúa el trabajo
      - Las condiciones del terreno por donde se transita
      - Las Condiciones Climáticas
    - **Vigilancia de la Salud** - se reporta al médico ocupacional todos GES que hayan excedido el “límite de acción” para su evaluación individual durante el control anual de salud y cualquier enfermedad pre existente
      - Programa anual de control de salud
      - Exámenes específicos por puesto de trabajo
      - Programa de ergonomía del trabajo
      - Atención de sala de fisioterapia permanente
  - **Controles de equipo de protección personal:** El epp específico para WBV está limitado a la comodidad no así a mejorar la salud de los operadores. No se ha demostrado alguna relación causal directa entre la operación de un equipo minero y la aparición de dolor de espalda, sin embargo, se recomienda el uso de un apoyo lumbar en los asientos de los equipos para corregir la postura de los operadores así como ajustar el cinturón de seguridad correctamente. Este estudio no considera que la vibración transmitida por el volante o los mandos hacia las manos del operador sea de alguna forma crítica para el operador por lo cual se indica:
    - Usar un respaldo lumbar (Recomendado)

- Usar cinturón de seguridad (Obligatorio)
- Uso de guantes anti vibración (Opcional)

## Conclusiones

La minería a cielo abierto es un proceso dinámico y en constante cambio, por tanto es importante realizar un monitoreo periódico del nivel de vibración de cuerpo entero a los operadores de equipos mineros los cuales están expuestos diariamente a este agente físico mediante la metodología convenida por la norma NB/ISO 2631-1 y los límites permisibles recomendados por ACGIH. De acuerdo a los valores de la aceleración de raíz cuadrada media ( $A_{R.M.S.}$ ) calculados para diez horas de operación  $A_{(10)}$  obtenidos en el monitoreo de WBV en los cuatro GES de operadores de equipos mineros se encontró que ninguna *mediana* sobrepasa el AL ni el TLV por lo tanto no existe un probable riesgo para la salud de los operadores y es muy improbable que ocurra una lesión por vibración de cuerpo entero.

Este estudio ha permitido verificar dos GES: M(1b) - operadores de equipos de carguío y M(1d) - operadores de equipos auxiliares, los cuales tienen valores individuales de WBV por encima del límite de acción (AL) en cuya operación deben aplicarse estrictamente los controles propuestos; así mismo se ha identificado un equipo minero (tractor a cadenas) que durante su operación supera el TLV el cual debe ser monitoreado nuevamente ampliando su evaluación en otro estudio más específico.

En resumen se cumple con el objetivo dentro de este estudio indicando que los resultados cuantificados muestran que los niveles de exposición a WBV experimentados por los operadores de equipos mineros están en control durante sus actividades rutinarias de operación:

- 1) *M(1a) - operadores de equipos de perforación:* la operación de todas las perforadoras (Atlas Copco) es segura respecto a la exposición a WBV en las condiciones de trabajo actuales.
- 2) *M(1b) - operadores de equipos de carguío:* la operación de todas las palas cargadoras (Komatsu) son seguras con relación a la exposición a WBV en las condiciones de trabajo actuales. La operación de los cargadores frontales (Caterpillar) debe cumplir estrictamente los controles citados en este documento para ser segura ante la exposición a WBV.

- 3) *M(1c) - operadores de equipos de acarreo*: la operación de todos los camiones de acarreo (Caterpillar) es segura en relación a la exposición a WBV en las condiciones de trabajo actuales.
- 4) *M(1d) - operadores de equipos auxiliares*: la operación de excavadoras, tractores a ruedas y compactadoras (Caterpillar) son seguras con respecto a la exposición a WBV en las condiciones de trabajo actuales. La operación de las motoniveladoras, cisternas y tractores a cadenas (Caterpillar) debe cumplir estrictamente los controles citados en este documento para ser segura ante la exposición a WBV. En el caso de la operación del tractor a cadenas adicionalmente se deben disponer pausas programadas y cambiar a los operadores a otro equipo distinto cada media jornada para mantener en control su exposición a WBV.

Por lo tanto, se concluye que no se esperan exposiciones preocupantes a vibraciones de cuerpo entero en los operadores de equipos mineros en la operación minera a cielo abierto boliviana evaluada en el presente estudio.

## Referencias

- 📖 NB/ISO 2631-1 (2009), Vibración y choque mecánico – Evaluación de la exposición humana a vibración de cuerpo entero – Parte 1: Requisitos Generales, 1ra. Ed. Bolivia. Instituto Boliviano de Normalización y Calidad.
- 📖 AIHA (2010), La Estrategia para la Evaluación de la Exposición Ocupacional, 1ra.Ed. U.S.A. American Industrial Hygiene Association.
- 📖 NIOSH (1977), Occupational Exposure Sampling Strategy Manual, 1st Ed. U.S. Department of Health Education and Welfare.
- 📖 ACGIH (2019), Threshold Limit Value for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Indices, Ed. U.S. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA  
Ministerio de Educación  
Mamerto Gómez Franco  
Yoshiyama Kanaoka  
Yuriela Kanaoka

00056

MINISTERIO DE  
**educación**  
ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MERCOSUR **cnacu**

LA COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN  
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

*En sujeción y al amparo de la Ley N° 870 de la Educación "Avelino Siñani - Elizardo Pérez,"  
del 20 de diciembre de 2010*

**CERTIFICA**

Que la Carrera de:  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
de la  
**UNIVERSIDAD MAYOR DE  
SAN ANDRÉS**

*con sede académica en la ciudad de ... S.N.D.R., ha cumplido  
los criterios establecidos para la*

**ACREDITACIÓN**

*al Sistema ARCU - SUR, del MERCOSUR EDUCATIVO*

*Este reconocimiento de la Calidad Académica tiene alcance Regional en el MERCOSUR,  
con validez de un período de seis (6) años.*

*La Paz, septiembre de 2019*

Msc. Edmundo Cordero Rodríguez  
Presidente de la Comisión Nacional de  
Acreditación de Carreras Universitarias de Bolivia

Msc. Juan Carlos Rodríguez, Apolo  
Vicepresidente de la Comisión Nacional de  
Acreditación de Carreras Universitarias de Bolivia



Todos los Derechos Reservados, 2022  
La Paz - Bolivia



Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175  
Plaza del Obelisco  
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería  
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402  
Web: [industrial.umsa.bo](http://industrial.umsa.bo)  
Email: [ingeindustrial@umsa.bo](mailto:ingeindustrial@umsa.bo)  
[ingeindustrialumsa@gmail.com](mailto:ingeindustrialumsa@gmail.com)