

## **Instrumentación Sísmica y Monitoreo de Salud Estructural en Edificaciones Indispensables. Caso de Estudio: TORRE SIATA. Seismic Instrumentation and Structural Health Monitoring of Essential Buildings. Case of Study: SIATA Tower.**

*Oscar Miranda*<sup>(1)</sup>, *Juan Rincón*<sup>(2)</sup>, *Gustavo Posada*<sup>(3)</sup>, *Carlos Hoyos*<sup>(4)</sup>

- <sup>(1)</sup> Ingeniero Civil – Especialista en Geotecnia, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá – SIATA. Medellín, Colombia.
- <sup>(2)</sup> Estudiante Ingeniería Civil, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá - SIATA. Medellín, Colombia.
- <sup>(3)</sup> Ingeniero Geólogo, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá - SIATA. Medellín, Colombia.
- <sup>(4)</sup> PhD Earth And Atmospheric Sciences, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y Valle de Aburrá – SIATA. Medellín, Colombia.

Dirección para correspondencia: [odmirandar@unal.edu.co](mailto:odmirandar@unal.edu.co)

### **TEMA C/ Nuevas Tecnologías Aplicadas a la Ingeniería Sísmica**

#### **Resumen**

En la NSR-10 se presentan los lineamientos para la instalación de instrumentación sísmica, sin embargo, existen pocos casos documentados de edificios con instrumentación permanente de este tipo en los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Con el fin de mejorar el entendimiento de los fenómenos sísmicos y sus efectos sobre las estructuras locales, se seleccionó la Torre del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá como edificio de prueba piloto para el monitoreo de salud estructural con equipos de bajo costo que cuentan con 3 componentes de aceleración ortogonales y un geófono de componente vertical, permitiendo detectar sismos y determinar la respuesta real del edificio mediante la recolección, almacenamiento, procesamiento y análisis de datos en tiempo real. La metodología de análisis está basada en técnicas no paramétricas en el dominio del tiempo y la frecuencia, y permitirá determinar las propiedades dinámicas del edificio a través de la implementación de cinco indicadores: dos ligados a la sollicitación impuesta a la estructura (aceleración del terreno e intensidad de Arias) y tres en función del desempeño estructural (distorsiones de entrepiso, coeficiente sísmico y variación de la frecuencia fundamental).

**Palabras-clave:** Instrumentación sísmica, salud estructural, indicadores de daño

## Abstract

In the NSR-10 the guidelines for the installation of seismic instrumentation are presented, however, there are few documented cases of buildings with permanent instrumentation of this type in the municipalities of the Area Metropolitana del Valle Aburrá. In order to improve the understanding of seismic phenomena and their effects on local structures, the SIATA Tower was selected as a pilot test building for structural health monitoring using low cost equipment that has 3 orthogonal acceleration components and a vertical geophone; making it possible to detect earthquakes and determine the real response of the building through the collection, storage, processing and analysis of data in real time. The analysis methodology is based on nonparametric techniques in the domain of time and frequency, and it will allow to determine the dynamic properties of the building through the implementation of five indicators: two linked to the demand imposed on the structure (terrain's acceleration and Arias's intensity) and three depending on the structural performance (interstory drift, seismic coefficient and variation of the fundamental frequency).

**Keywords:** Seismic instrumentation, structural health, damage indicator

### 1. Introducción

Ubicado en Antioquia, Colombia, el Valle de Aburrá se sitúa sobre una región compleja en términos tectónicos producto de la convergencia de las Placas Caribe, Nazca y Suramericana. De acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), 9 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se encuentran en una zona de amenaza sísmica intermedia y 1 en alta, las cuales están asociadas a diferentes sismos fuentes de tipo superficiales y profundas (AIS, 2010; AMVA, 2006).

Conocer los períodos de vibración y determinar el nivel de daño de las edificaciones ante la ocurrencia de un sismo son algunos de los objetivos planteados en el capítulo A.11 de la NSR-10, para lo cual deben instalarse instrumentos sísmicos que cumplan los requerimientos estipulados en la misma. Actualmente en el AMVA son muy pocas las estructuras instrumentadas, no obstante, es un tema al que se le dará mayor atención debido a los cambios que traerá la nueva versión de la norma sismo resistente.

En este trabajo se pretende mostrar los primeros resultados de una prueba piloto, que consiste en la instrumentación de un edificio con sensores de bajo costo con respecto a equipos convencionales. Algoritmos de recolección, almacenamiento y procesamiento de los registros sísmicos y de vibración ambiental, así como en el análisis y la generación de reportes automáticos en tiempo real de la salud estructural del edificio se desarrollaron para tal fin. La edificación escogida es la Torre de Monitoreo del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), que se localiza en el municipio de Medellín al interior del complejo deportivo Atanasio Girardot. Mediante indicadores de daño calculados con base en 4 sismos registrados, se mostrarán los resultados arrojados por los códigos desarrollados en lenguaje Python.



## 2. Metodología

### 2.1. Equipos de Medición

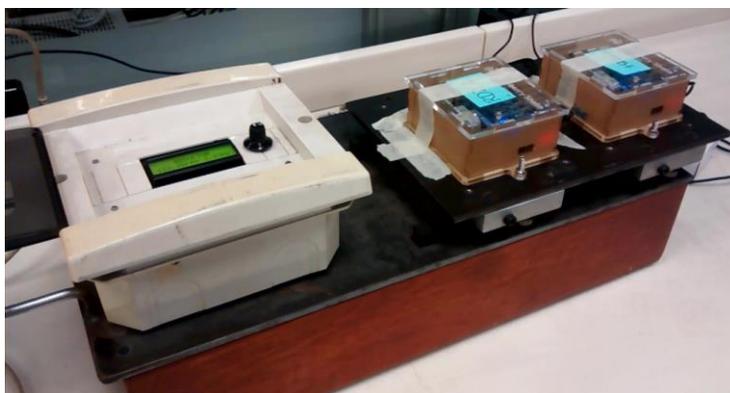
Se emplearon 7 Raspberry Shake 4D, equipos que incorpora un geófono de componente vertical y sensores de aceleración de 3 componentes ortogonales. En la Tabla 1 se observan las especificaciones más representativas, estas resultan ser apropiadas para medir eventos sísmicos tanto en campo abierto y en estructuras, dado que las amplitudes sísmicas bajo condiciones de resonancia difícilmente superan los niveles de  $\pm 2g$  y el rango de frecuencias en que oscilan los sistemas estructurales varían entre 0.1 y 30 Hz, aproximadamente. (Botero, 2011)

**Tabla 1. Especificaciones técnicas del equipo Raspberry Shake 4D**

Raspberry Shake 4D					
Tip o	Muestras por segundo	Ran go	Rango dinámico	Ancho de banda	Nivel de ruido (error)
ME	100	$\pm$	144 dB	DC to 44 Hz	0.0003 g
Ms		2g			

En el análisis de vibración ambiental los valores registrados son inferiores a  $1 \text{ cm/s}^2$  (gales), lo que equivale al 1% del valor de la gravedad. Para estas mediciones se recomienda implementar equipos que reporten en sus especificaciones, errores instrumentales inferiores a 0.05 gales (0.005% del valor de la gravedad). (Botero, 2011)

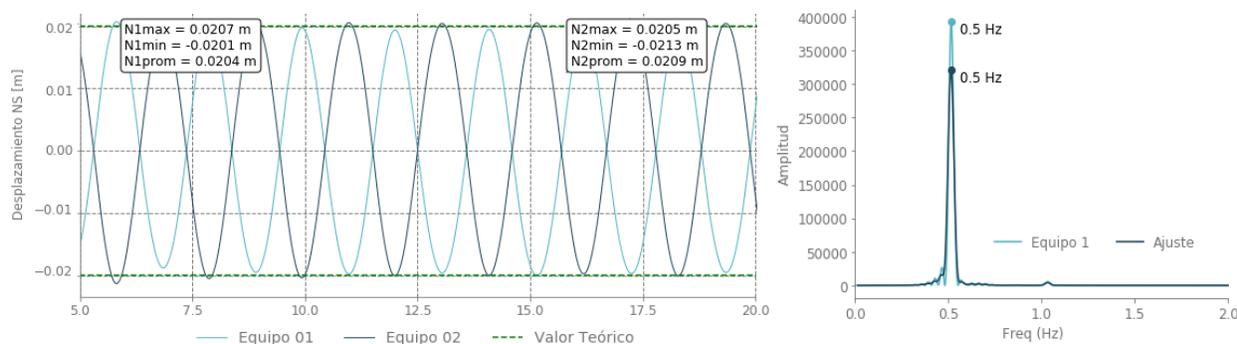
Se realizaron pruebas en dos equipos simultáneamente orientados en fase y desfase, empleando una mesa vibratoria unidireccional de amplitud fija (2.0 cm) y que permite variar la frecuencia de oscilación entre 0.15 Hz y 4.00 Hz con una desviación de  $\pm 0.02$  Hz. El ejercicio permitió validar la funcionalidad del equipo para medir las variables de la respuesta estructural y el proceso de envío, corrección, tratamiento y procesamiento de las señales registradas.



**Figura 1. Mesa Vibratoria Unidireccional de Amplitud Fija (2.0 cm)**



Varios equipos fueron probados simultáneamente en pares en la mesa vibratoria unidireccional, con variaciones de frecuencia entre 0.25 Hz y 2.00 Hz. Se comprueba una adecuada sincronización y polarización entre los registros en fase y desfase. Los resultados de la aceleración, velocidad, desplazamiento y las frecuencias calculadas se adaptan a la necesidad de monitoreo estructural con una desviación de máximo 5%. Ver Figura 2.



**Figura 2.** Desplazamiento y Frecuencia Fundamental Calculada en Mesa Vibratoria Unidireccional. Equipos 01 y 02 en desfase a 0.5 Hz.

## 2.2. Ubicación de los Sensores y Procesamiento de la Información

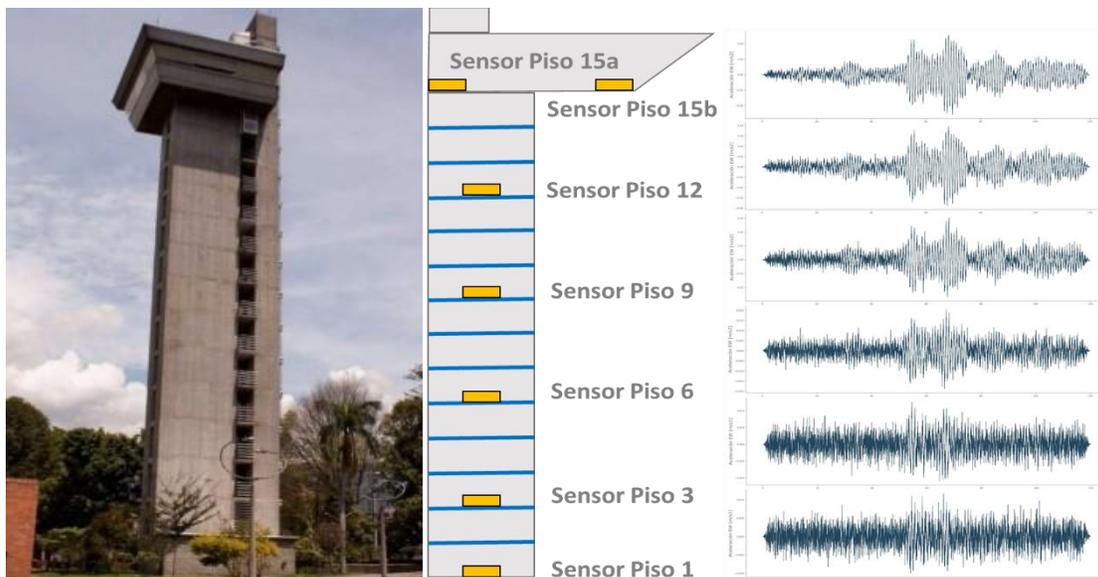
La torre del SIATA cuenta con 15 pisos rectangulares de planta regular, estos tienen un área de 20.6 m<sup>2</sup>, a excepción del último que cuenta con 69.5 m<sup>2</sup>; además de escaleras al interior de los pisos y un foso de ascensor anexo. El sistema de cubierta es una cercha tubular con teja en acero, mientras que la resistencia a cargas gravitacionales y horizontales es proporcionada por un sistema de muros de concreto en ambas direcciones. Las cargas debidas al uso corresponden a las de oficinas y almacenamiento de equipos de mantenimiento de los sensores del SIATA, dispositivos electrónicos y servidores. Los 7 sensores instalados se ubican como se muestra en la Figura 3. Los acelerómetros se orientan con el Norte en la dirección transversal y se encuentran fijados a las losas de entrepiso.

El acceso a los registros se realiza por conexión ethernet, registrando continuamente y generando un archivo con todo el registro diario, el cual se guarda automáticamente en el servidor del SIATA. La sincronización de las señales registradas funciona a través del protocolo de internet NTP (Network Timing Protocol) el cual puede mantenerse sincronizado con una diferencia de máximo de 10 milisegundos (1/100 segundos).

Los registros reciben un tratamiento en Python usando la librería Obspy para la conversión de cuentas a unidades métricas, removiendo la respuesta instrumental del equipo. Posteriormente se hace la corrección de línea base y la eliminación de la tendencia lineal, centrando el registro sobre la línea de origen para disminuir los errores en la determinación de las velocidades y desplazamientos en el proceso de integración. Por último, un filtro Butterworth pasa banda entre



0.2 Hz y 20.0 Hz para eliminar los componentes frecuenciales que no son de interés en el registro sísmico. El ruido producido por bajas frecuencias (inferiores a 0.2 Hz) afecta los procesos de integración; estos son producidos por las condiciones instrumentales de los sensores, mientras que el ruido de altas frecuencias (superiores a 20.0 Hz) afectan la amplitud de la señal (Botero, 2011).



**Figura 3. Distribución de los sensores en altura en la torre del SIATA**

Una vez procesada la señal, se hace la integración de esta para la determinación de la historia de velocidad, y aplicando luego la misma corrección y tratamiento sobre la velocidad para la obtención de la historia de desplazamiento.

Cada 5 minutos se generan reportes de desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximas calculadas en la estructura, como también las frecuencias representativas en los espectros de Fourier con el objetivo de identificar comportamientos inusuales durante los registros del día. Durante un sismo, se identifica el tramo de la señal por medio del registro de los geófonos, posteriormente se calculan 2 indicadores de intensidad y 3 indicadores de desempeño estructural como se explica en las secciones siguientes.

## **2.3. Indicadores de Intensidad y Desempeño Estructural**

### **2.3.1. Aceleración Máxima del Terreno**

A partir de los registros de aceleración absoluta del sensor ubicado en la primera planta (Al mismo nivel del terreno), se obtiene el valor máximo de la aceleración en cada una de sus componentes ortogonales.



### 2.3.2. Intensidad de Arias

Se define como la cantidad de energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad. Se hace la consideración de que el modelo estructural es un oscilador lineal simple con amortiguamiento viscoso (Aldama, 2009). Esta es calculada mediante el registro de aceleraciones de las componentes horizontales del sensor en la primera planta usando la Ecuación 1:

$$I_{HA} = \frac{\pi}{2 \cdot g} \left[ \int_0^{t_{dx}} a_{xx}^2(t) dt + \int_0^{t_{dy}} a_{yy}^2(t) dt \right] \quad (1)$$

Con la variación de la intensidad de Arias en el tiempo, es posible determinar la fase intensa del movimiento sísmico. Para este caso, esta se calculó determinando los instantes en los que se alcanza el 3% y el 97% de la intensidad de Arias.

### 2.3.3. Distorsión Media Máxima de Entrepisos

A partir de los datos históricos de desplazamientos calculados en diferentes niveles de la edificación, se puede determinar la distorsión de entrepiso en un instante determinado usando la Ecuación 2, donde  $d_j$  y  $h_j$  son el desplazamiento horizontal y altura del piso “j”, respectivamente.

$$D_{\max} = \max \left| \frac{d_{j+1}(t) - d_j(t)}{h_{j+1} - h_j} \right| \quad (2)$$

Se toma el valor máximo y este puede relacionarse indirectamente con un posible daño en la estructura. Entre mayor sea el desplazamiento relativo entre dos niveles, mayor será la probabilidad de daño entre los elementos estructurales que los unen, siendo un valor medio debido a que no se tienen instrumentados todos los niveles.

### 2.3.4. Coeficiente Sísmico

Este se define como el cociente entre la fuerza sísmica que actúa en la base de la estructura, y el peso de esta (Ver Ecuación 3). Este indicador puede ser comparado con el valor que se empleó para el diseño estructural de la edificación. Para su cálculo se requiere la masa y aceleración en cada nivel.

$$C_{S_{\max}} = \frac{1}{W_0} \cdot \max \left| \sum_{j=1}^n F_j(t) \right| \quad (3)$$

Con los registros de los pisos instrumentados se interpolaron las aceleraciones faltantes con el método de diferencias divididas o método de Newton (Aldama, 2009; Burden y Faires, 2002) y luego de calcular la fuerza en el tiempo sobre cada nivel, se obtiene la historia de cortante basal y posteriormente el coeficiente sísmico.

### 2.3.5. Variación en la Frecuencia Fundamental

Para identificar propiedades dinámicas como las frecuencias naturales, amortiguamientos y formas modales, se emplea el análisis en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier y se hace uso de un análisis espectral convencional. (Bendat, 1989)

La variación de las frecuencias fundamentales ( $V_F$ ) de los componentes transversal (T) y longitudinal (L) de un edificio ante un evento sísmico se calcula con respecto a los valores de referencia ( $V_{REF}$ ) obtenidos a partir de un sismo de pequeña intensidad o las estimadas de pruebas de vibración ambiental. Adicionalmente se requiere determinar la fase intensa de los registros, así como la fase inicial y la fase final (Usando la variación de la Intensidad de Arias en el tiempo) y en cada una identificar la frecuencia predominante ( $f_s$ ). Ver Ecuación (4).

$$V_F = \left( \frac{f_{REF} - f_s}{f_{REF}} \right) \quad (4)$$

### 3. Resultados Preliminares

En la Tabla 2 se muestran los eventos sísmicos registrados por los equipos, para los cuales se calculan los indicadores de severidad del movimiento (Ver Tabla 3) y los indicadores de desempeño estructural (Tabla 4). Los resultados obtenidos son los esperados de acuerdo a las amplitudes de las aceleraciones registrados entre el primer y último nivel de la Torre SIATA (Entre 1.0 – 5.0 cm/s<sup>2</sup>). De estos primeros resultados se obtiene la frecuencia de referencia a través del análisis espectral de vibración ambiental (Ver Figura 4 y 5), cuya variación con respecto a la frecuencia determinada en los 4 eventos sísmicos (Ver ejemplo mostrado en la Figura 6) no supera el 5%. Se demuestra que sismos de tan baja intensidad no reflejan un daño evidenciable en la estructura, y son útiles para verificar la frecuencia de referencia, de igual manera sucede con los resultados en los demás indicadores de desempeño estructural.

**Tabla 2. Resumen de Eventos Sísmicos Registrados**

Evento	Fecha	Epicentro	Mw	Profundidad (Km)	Distancia al Epicentro (Km)
<b>19 - 01</b>	2019-01-22 11:10:32	Los Santos – Santander	4,4	148,38	200.2
<b>19 - 02</b>	2019-01-24 03:04:57	Zapatoca – Santander	5,4	150,24	271.2
<b>19 - 03</b>	2019-01-26 12:32:25	Volcán Nevado del Huila	5,4	8,80	364.2
<b>19 - 04</b>	28/01/2019 21:07:08	Volcán Nevado del Huila	4,7	9,00	358.2



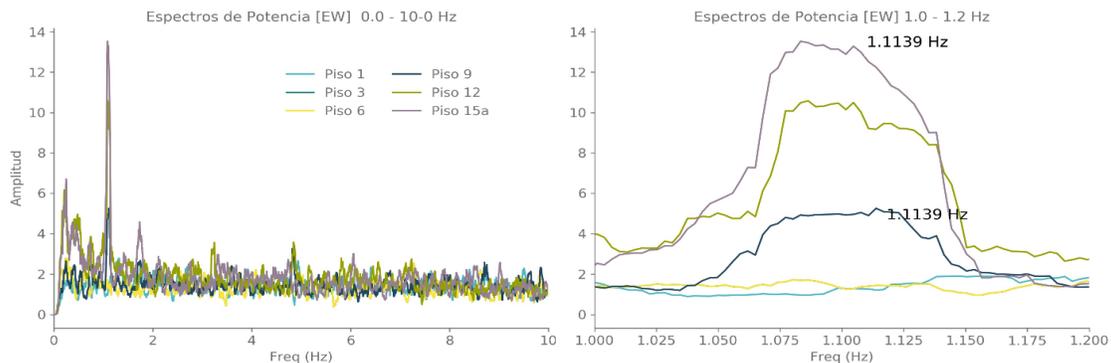
**Tabla 3. Indicadores de Severidad Calculados**

Evento	I <sub>arias</sub> - Terreno (cm/s)			A <sub>max</sub> Terreno (cm/s <sup>2</sup> )			A <sub>max</sub> Piso 15 (cm/s <sup>2</sup> )		
	T	L	Ia	T	L	Z	T	L	Z
<b>19 - 01</b>	0,010	0,010	0,020	0,98	1,13	0,63	1,10	1,22	0,94
<b>19 - 02</b>	0,017	0,018	0,035	1,45	1,74	0,85	2,11	2,78	1,95
<b>19 - 03</b>	0,015	0,015	0,030	0,99	1,04	0,62	2,99	4,17	0,91
<b>19 - 04</b>	0,011	0,013	0,024	1,09	1,17	0,71	2,70	5,14	0,92

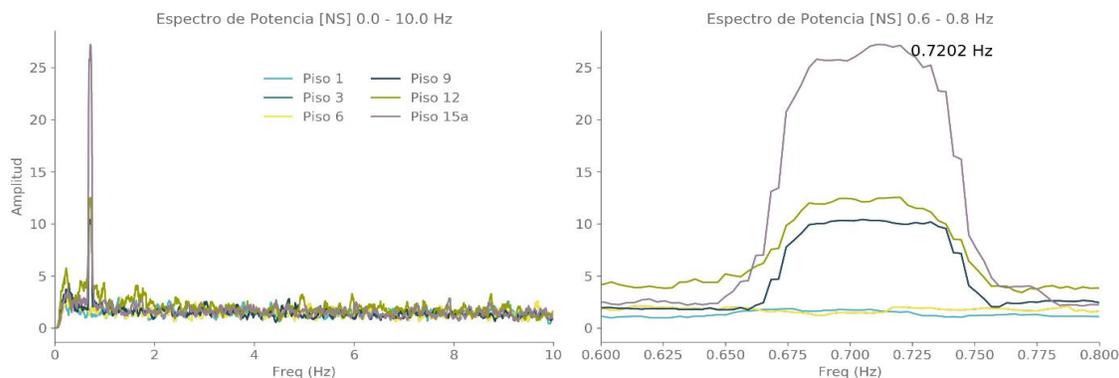
**Tabla 4. Indicadores de Desempeño Estructural Calculado**

Evento	D max %		C <sub>smax</sub>		VF	
	T	L	T	L	T	L
<b>19 - 01</b>	0,005 %	0,006 %	0,0008	0,0008	1,72%	1,08%
<b>19 - 02</b>	0,006 %	0,010 %	0,0016	0,0026	4,42%	2,37%
<b>19 - 03</b>	0,006 %	0,027 %	0,0008	0,0021	3,51%	1,96%
<b>19 - 04</b>	0,005 %	0,021 %	0,0008	0,0028	3,97%	4,58%

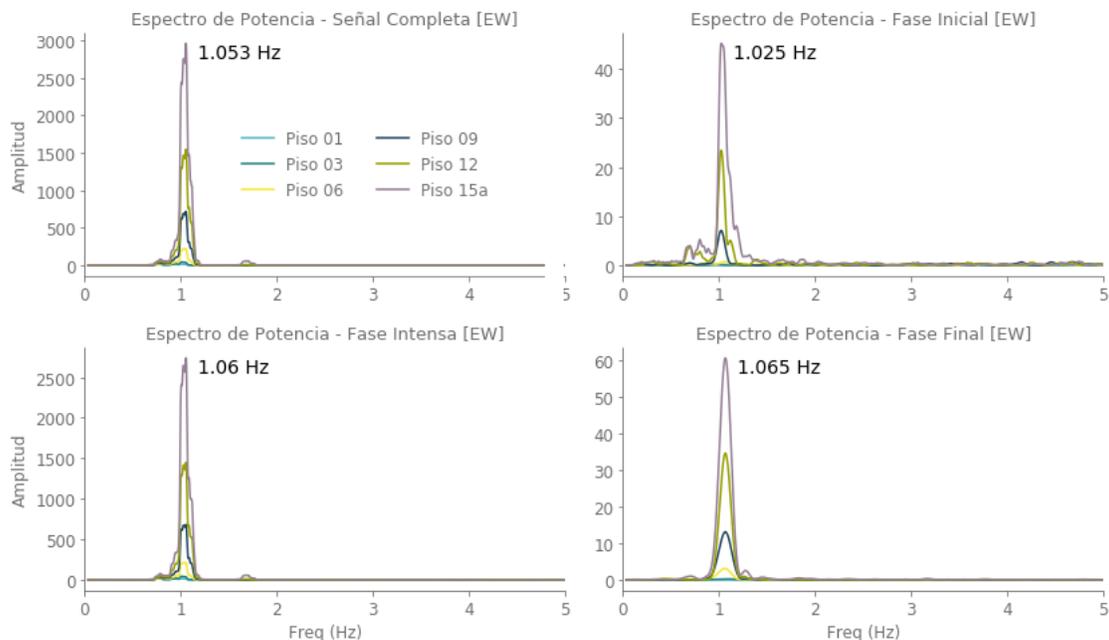
A través del análisis de vibración ambiental en ventanas de 5 minutos (30000 muestras), se determina la frecuencia de referencia en dirección longitudinal y transversal. La mejor aproximación de la frecuencia de referencia respecto a un sismo de baja intensidad se calcula en los días y horario de menor ocupación de la Torre (Domingos 6:00 pm). Ver Figuras 4 y 5.



**Figura 4.** Determinación de la Frecuencia Fundamental de Referencia en Dirección Longitudinal (EW) Usando Ventana de Vibración Ambiental (Día 13 de enero 6:00 pm).



**Figura 5.** Determinación de la Frecuencia Fundamental de Referencia en Dirección Transversal (NS) Usando Ventana de Vibración Ambiental (Día 13 de enero 6:00 pm).



**Figura 6.** Espectros de Potencia Dirección Longitudinal (EW) Evento 19-04, Volcán Nevado del Huila (2019-01-28)

#### 4. Trabajos Futuros y Conclusiones

La implementación de los cinco indicadores y su correlación con el estado de daño después de un evento sísmico es adecuada, debido a que los parámetros son de cálculo inmediato, y pueden ser aplicados con facilidad a un sistema de alerta estructural. Las alertas deben estar sustentadas sobre un procesamiento histórico de registros, modelos analíticos e inspecciones periódicas de las estructuras instrumentadas para seleccionar y ajustar los umbrales en el nivel de daño.



Las pruebas realizadas a los equipos permitieron ajustar la corrección de la respuesta instrumental, verificar procedimientos para la corrección y el tratamiento de las señales, corroborar la sincronización bajo el mismo tiempo de referencia, visualizar la orientación de las componentes ortogonales puestas en fase y desfase, validar la capacidad de los equipos para la determinación del movimiento y frecuencias medidas. Se seguirá trabajando en pruebas con los equipos bajo otras circunstancias de medición y contraste con otros sensores de mayores especificaciones.

Se selecciona el edificio del AMVA para aplicar la misma metodología, pero con una distribución diferente de los sensores con la que se generarán señales sintéticas y se determinará la respuesta del edificio en traslación, rotación y giro de la base (Camargo, 2007). Con el objetivo de investigar el comportamiento de otras tipologías estructurales (Acero) e identificar los efectos de la interacción suelo estructura, usando también metodología de análisis no paramétrico en el dominio del tiempo y la frecuencia. (Luco, 1980).

## 5. Referencias Bibliográficas

AIS. (2010), “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, DC.

Aldama, B. D. (2009), “Proceso Automatizado para Determinar el Estado Estructural en Edificios Instrumentados”, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

AMVA. (2006), “Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado”, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Medellín.

Bendat, J. S.; Piersol, A. G.; (1989); “Random data: analysis and measurements procedures”; (2ª edición); Wiley Interscience; Nueva York.

Botero, J. C. (2011), “Dinámica de Estructuras – Sistemas de un Grado de Libertad”, (Tercera Edición), Capítulo 9, Universidad EAFIT, Medellín.

Burden, R., Faires, J. D. (2002), “Análisis Numérico”, (7ª Edición), Thomson Learning, 831 p.

Camargo, J.; (2007); “Análisis de registros sísmicos en un edificio alto cercano a la estación SCT”; Tesis de Maestría; Posgrado en Ingeniería, UNAM; México.

Luco J. E. (1980), “Soil-structure interaction and identification of structural models”, Proceedings 2nd ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, Knoxville, Tennessee, septiembre 15-17, Vol. III, Geotechnical Topics, N° 10-1, pp. 10.1-10.30.