

## Caracterización del comportamiento dinámico de la tribuna occidental del estadio Pascual Guerrero durante un concierto musical

Albert R. Ortiz\*<sup>§</sup>, Johannio Marulanda\*, Peter Thomson\*

\* *Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia*  
§ *e-mail: alrortiz@univalle.edu.co*

(Recibido: Abril 30 de 2007 - Aceptado: Octubre 4 de 2007)

### Resumen

Durante el concierto musical llevado a cabo el 27 de diciembre de 2006 en el estadio olímpico Pascual Guerrero de Cali, se monitoreó la respuesta dinámica de la tribuna occidental debido a la excitación del público. Seis acelerómetros fueron localizados en diferentes puntos sobre un pórtico de concreto reforzado realizando una adquisición continua de datos. Este artículo presenta las frecuencias observadas en la respuesta de la estructura debidas a la interacción público-estructura durante el evento musical en el estadio. El resultado significativo de la investigación es la clasificación de la respuesta dinámica de la estructura para los géneros musicales que no han sido considerados en similares investigaciones: salsa, merengue, vallenato y reguetón.

**Palabras clave:** Interacción público-estructura, Comportamiento dinámico, Distribución tiempo frecuencia, Cargas dinámicas, Excitación del público.

## Characterization of the dynamic behavior of the western grandstand of the Pascual Guerrero stadium during a musical concert

### Abstract

During the concert held at Cali's Pascual Guerrero olympic stadium on December 27, 2006, the dynamic response of the west grandstand due to crowd excitation was monitored. Six accelerometers were located at different points on the reinforced concrete frame and a continuous data acquisition was carried out. This paper presents the frequencies observed in the response of the structure due to the interaction crowd-structure during the musical event in the stadium. A significant result of this work is the classification of the dynamic response of the structure for music genres that have not been considered in similar investigations: salsa, merengue, vallenato and reguetón.

**Keywords:** Crowd-structure interaction, Dynamic behavior, Time-frequency distribution, Dynamic loads, Crowd excitation.

## 1. Introducción

Las vibraciones debidas a las cargas producidas por personas en movimiento se han convertido en un problema de interés para la ingeniería estructural en los últimos años. Las vibraciones se pueden abordar a través de la interacción dinámica gente-estructura (Ji, 2003) que ocurre cuando las estructuras son excitadas por personas en movimiento (saltando, bailando o corriendo). Este efecto ha aumentado en los últimos años debido a la construcción de estructuras muy flexibles con frecuencias naturales de vibración bajas, estando en algunos casos, dentro de los rangos de las frecuencias de excitación producidas por personas en movimiento. Las estructuras comúnmente diseñadas con estas características son los estadios, coliseos y auditorios, que además se han convertido en escenarios propicios para la concentración multitudinaria de personas para eventos de diferente índole, lo que hace necesario un estudio de la interacción público-estructura con el fin de evitar un colapso o falla de la estructura. (Yao et al., 2004; Yao et al., 2006).

Los estudios acerca de la interacción publico-estructura han permitido abordar la influencia del movimiento del público en las propiedades dinámicas de la estructura (masa, rigidez y amortiguamiento), la respuesta de la estructura ante este movimiento, y la influencia de la estructura en las cargas producidas por el público (Sachse et al., 2003). Diversos autores (Barrios et al., 1997) han establecido generalizaciones sobre el tipo de cargas dinámicas con el fin de caracterizar los movimientos producidos por las personas, especificando varios parámetros como rangos de frecuencias ocasionadas por el público, coeficientes de Fourier para la representación mediante series, variaciones en el amortiguamiento, etc. Aunque no están bien definidas, las variaciones de las cargas producidas por la actividad humana se pueden representar a través de pulsaciones periódicas con una frecuencia rítmica  $f$  igual al ritmo de la música u otro mecanismo para marcar el ritmo (Gómez, 2001). La función de carga  $P(t)$  debida al peso de las personas puede representarse como la suma de una componente estática  $W_p$  y una componente dinámica  $F(t)$ , así:

$$P(t) = W_p + F(t) \quad (1)$$

$$P(t) = W_p \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \text{sen}(n \omega t + \phi_n) \right] \quad (2)$$

donde  $\alpha_n$  es la componente dinámica para el peso de las personas, referido como el factor de carga dinámico correspondiente al armónico  $n$  de la actividad,  $\omega$  es la frecuencia de movimiento,  $t$  es el tiempo y  $\phi_n$  es el ángulo de fase. La respuesta del sistema ante esta función de carga está en función de la frecuencia de la carga. Suponiendo un sistema de un grado de libertad, y para el primer armónico ( $n = 1$ ), la respuesta es:

$$u(t) = u_o \text{sen}(\omega t - \phi) = \alpha W_p R_d \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (3)$$

donde  $u(t)$  es la deformación de estado uniforme del sistema,  $u_o$  es la deflexión dinámica máxima y  $R_d$  es el factor de respuesta al desplazamiento (Chopra, 1995).

Debido a que este tipo de estudios generalmente se han realizado en países de Europa (VERS, 2007), en Estados Unidos, Argentina y Brasil (cuyos resultados se presentan generalmente analizando el comportamiento de las estructuras sometidas a cargas en partidos de fútbol, conciertos musicales de rock y pop, y géneros autóctonos de cada país), su alcance corresponde a eventos con comportamientos culturales distintos a los encontrados en Colombia y gran parte de Suramérica (en donde los ritmos más comunes son salsa, merengue y reguetón, entre otros), y por ello, se hace necesaria la caracterización del comportamiento dinámico de las estructuras ante diferentes tipos de excitación acordes con nuestra cultura.

En el concierto realizado el 27 de diciembre de 2006 en el estadio olímpico Pascual Guerrero con motivo de la XLIX Feria de Cali, se presentaron artistas representativos de los géneros musicales salsa, merengue, reguetón, vallenato y música popular colombiana. El objetivo de la caracterización de los diferentes géneros musicales consiste en establecer los rangos de frecuencias producidas por el público bajo estos

géneros musicales locales, para que sean tenidos en cuenta en países en donde principalmente y además del fútbol, los escenarios son usados para este tipo de eventos musicales.

En el año 2005, el estadio olímpico Pascual Guerrero fue sometido a un estudio de vibraciones e identificación del comportamiento dinámico (EICG, 2005), en el cual se identificaron modos de vibración de la estructura. En la tribuna occidental los resultados obtenidos mostraron que las graderías (zonas en contacto con el público) presentan modos verticales superiores a 6.0 Hz, modos transversales de 1.2 Hz y 2.1 Hz, y la cubierta un modo vertical de 1.9 Hz. Esta última zona, aunque no está en contacto con el público, presenta un comportamiento dentro del rango de las frecuencias producidas por las personas al estar en movimiento (1.5 a 3.3 Hz) (Sim, 2006).

## 2. Metodología

### 2.1 Mediciones dinámicas

Las medidas se realizaron en la tribuna occidental del estadio olímpico Pascual Guerrero de Cali, construido en el año 1936 (Figura 1). Las zonas de ubicación para el equipo de adquisición fueron seleccionadas de acuerdo con resultados de estudios anteriores que muestran zonas de bajas frecuencias que podrían ser excitadas por el público (cubierta), y voladizos del segundo y tercer piso que presentan altos grados de vibración por su configuración estructural (véase Figura 2) (EICG, 2005). Se realizaron registros verticales y horizontales por cada zona de estudio.



Figura 1. Tribuna occidental del estadio olímpico Pascual Guerrero.

El concierto tuvo una duración de aproximadamente 12 h y se realizaron 30 registros de aproximadamente 10 min cada uno a una frecuencia de adquisición de 256 Hz, obteniendo más de 4 millones de datos.

### 2.2 Equipo de adquisición

Se utilizó el equipo portátil del Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural (LINSE) de la Universidad del Valle, que consta de 8 acelerómetros sísmicos de baja frecuencia (*Wilcoxon Research Model 731A*) cada uno con acondicionador de señal WR Modelo P31.

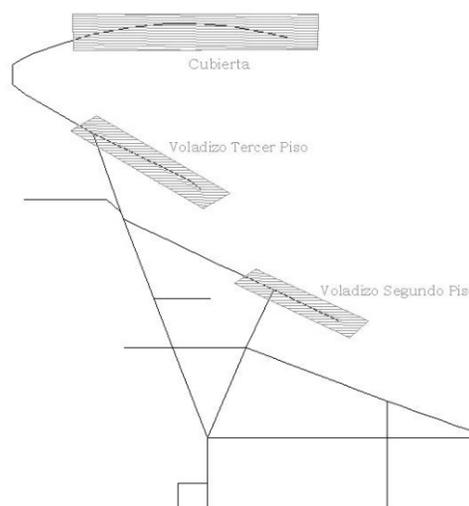


Figura 2. Zonas en donde se ubicó el equipo de adquisición sobre un pórtico de la tribuna occidental del estadio olímpico Pascual Guerrero.

Los acelerómetros tienen un ancho de banda de 0.05 a 450 Hz y, junto con los acondicionadores, permiten una sensibilidad variable entre 10 V/g, 100 V/g y 1000 V/g. Los acondicionadores de señal amplifican las señales análogas y proveen un filtro pasa-bajo con frecuencias de corte en 100 o 450 Hz. Después de pasar a través de los acondicionadores, las señales son transmitidas por cables coaxiales a una caja de conexiones *National Instruments BNC-2110* que se conecta a un computador portátil, donde las señales son digitalizadas a 12 bits con una tarjeta NI DAQCard-6024E y *LabVIEW*®.

### 2.3 Procesamiento de las señales

Los datos se procesaron en el paquete matemático *MATLAB* (The MathWorks, Inc., 2003) utilizando la caja de herramientas para procesamiento digital de señales, algoritmos de distribución tiempo-frecuencia que emplean la transformada en tiempo corto de Fourier (espectrograma) y la caja de herramientas de análisis en tiempo-frecuencia que emplea la transformada de Choi-Williams (Auger et al., 1996).

El procedimiento para el procesamiento de los datos consistió en varias etapas: primero se acondicionó la señal captada para lograr identificar cada uno de los registros con el tipo de música y canción en el instante; después se volvió a muestrear a una frecuencia de 20 o 40 Hz debido a que el rango de interés de la señal está por debajo de la frecuencia de muestreo, y luego se calculó la densidad espectral de potencia para observar el contenido frecuencial de la señal, deducida a partir de la potencia media de la señal discreta periódica en el tiempo, de acuerdo con Proakis y Manolakis (1998):

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} |c_k|^2 \quad (4)$$

donde  $N$  es el periodo de la señal y  $x(n)$  es la señal periódica discreta en el tiempo, representada a través de series de Fourier como:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} c_k e^{j2\pi kn/N} \quad (5)$$

donde los  $c_k$  son los coeficientes de la representación en serie y  $|c_k|^2$  representa la distribución de la potencia en función de la frecuencia (densidad espectral de potencia).

Sin embargo, como el uso de estas distribuciones de potencia sólo está en función de la frecuencia, no se puede evidenciar la variación del contenido de frecuencias en el tiempo. Por esta razón, y debido a que el comportamiento del público no es constante (varía en el tiempo), se utilizaron las distribuciones tiempo-frecuencia (DTF), que son funciones tridimensionales que indican el contenido de energía de una señal en tiempo y frecuencia de manera simultánea.

Con el fin de obtener la respuesta de la estructura al comportamiento del público en el dominio de frecuencias y a lo largo de la duración del registro, las DTF se definieron a través de la ecuación:

$$c(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint A(\theta, \tau) \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau \omega} d\theta d\tau \quad (6)$$

donde  $A(\theta, \tau)$  es la función de ambigüedad simétrica de la señal, definida por:

$$A(\theta, \tau) = \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{j\theta t} dt \quad (7)$$

y  $\phi(\theta, \tau)$  es una función arbitraria denominada *kernel* (núcleo) que determina las propiedades de la DTF (resolución y términos cruzados). La distribución de Choi-Williams (CW) usa una función gaussiana como *kernel*:

$$\phi(\theta, \tau) = \exp\left(-\frac{\theta^2 \tau^2}{\sigma}\right) \quad (8)$$

de modo que la función de DTF de CW se expresa como:

$$CWD(t, f) = \int e^{-j2\pi f\tau} \int \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau^2/\sigma}} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) \exp\left[-\frac{(u-t)^2}{4\tau^2/\sigma}\right] du d\tau \quad (9)$$

Clásicamente, se define al espectrograma como una DTF que corresponde al cuadrado de la magnitud de la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT). Sin embargo, el espectrograma también se puede representar a través de la distribución de Cohen utilizando como *kernel* la función de ambigüedad de la ventana de análisis, así:

$$X(t, \omega; h) = \left| \int x(\tau) h(t - \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \right|^2 \quad (10)$$

### 3. Resultados y discusión

El análisis de los registros consistió en diferenciar la respuesta de la estructura en los diferentes géneros musicales. Se dividieron los registros para agruparlos según el género musical, encontrando cuatro géneros musicales con tres o más registros (dos o menos no se consideraron en el análisis): salsa, merengue, vallenato y reguetón.

Las frecuencias se identificaron de tres maneras diferentes: la primera, haciendo una identificación inicial para buscar similitudes entre los registros de un mismo género en donde se utilizaron gráficas tridimensionales de los espectros de potencia (Figura 3); la segunda, de manera general (Figura 4), utilizando espectrogramas para identificar las frecuencias en cada uno de los 30 registros (aproximadamente 3 canciones por registro); y la tercera, de una manera más específica, utilizando la transformada de Choi-Williams, dividiendo la señal para analizar alrededor de 1 min, es decir, un fragmento de una canción (Figura 5).

El uso de dos transformadas tiempo-frecuencia en el análisis de los datos brinda varias ventajas: el uso de espectrogramas permite analizar completamente cada uno de los registros con el fin de observar el comportamiento del público durante las canciones captadas en él, a una resolución aceptable y con bajo requerimiento computacional.

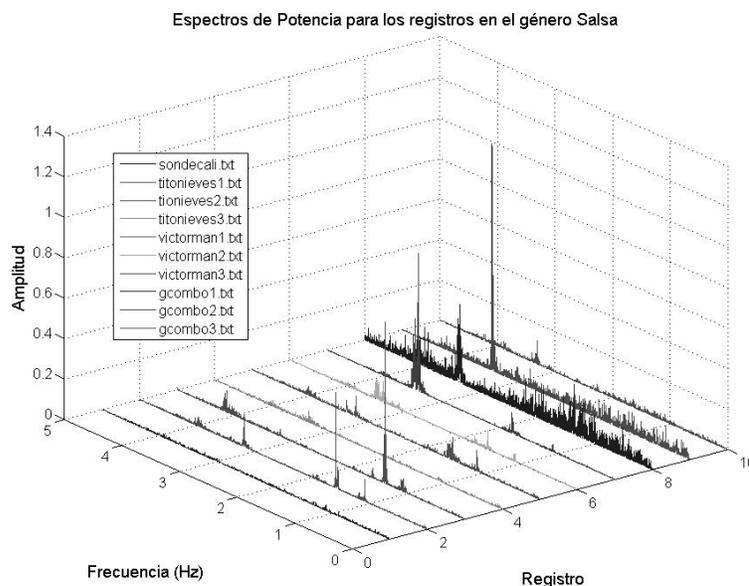


Figura 3. Espectro de potencia de cada uno de los registros del género salsa en el voladizo vertical del tercer piso.

Por otro lado, la distribución de Choi-Williams permite obtener una mejor resolución pero es computacionalmente más exigente, por lo que limita el número de datos procesados, de tal manera que, en el presente análisis, esa distribución se usó para verificar algunas zonas que no se observan bien en los espectrogramas, además de contrastar los datos obtenidos para buscar un mayor nivel de confianza, debido a que las señales captadas presentan un nivel considerable de ruido (Tischer, 2007).

Los resultados se agruparon de acuerdo con los géneros musicales y los canales en histogramas con el fin de establecer la periodicidad de las frecuencias encontradas.

Para el género salsa se analizaron 10 registros, siendo el género musical con mayor número de registros (100 min y 1 500 000 datos), seguido de merengue y vallenato con 4 registros cada uno (50 min y 750 000 datos) y, por último, reguetón con 3 registros (30 min y 460 000 datos aproximadamente).

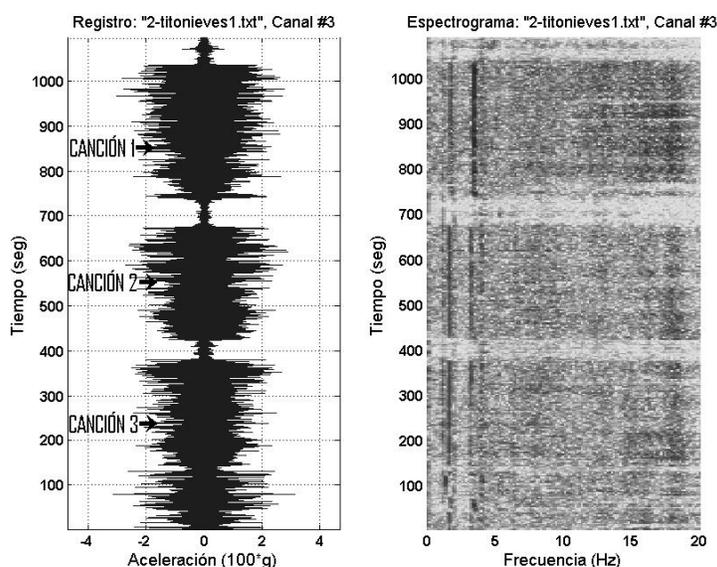


Figura 4. Esquema para la identificación de las frecuencias de los registros en el tiempo (izquierda), usando espectrogramas: transformada de Fourier en tiempo corto (derecha).

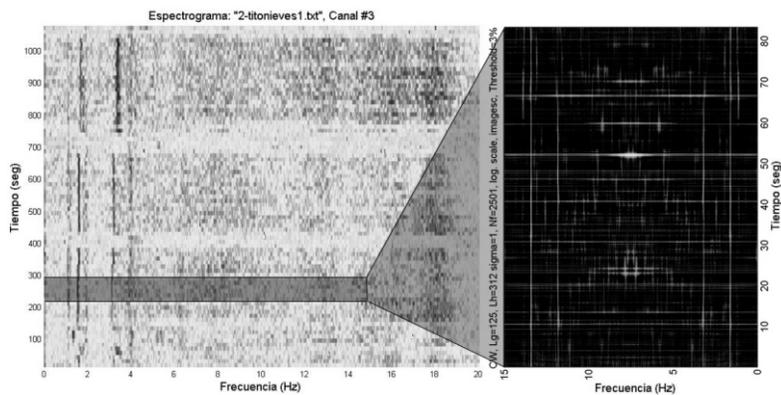


Figura 5. Esquema para la identificación de las frecuencias de los registros usando espectrogramas: transformada de Fourier en tiempo corto (izquierda), transformada de Choi-William (derecha).

En el género salsa las frecuencias identificadas se agruparon alrededor de 1.2 Hz, 1.6 Hz y 3.3 Hz (Figura 6), siendo la frecuencia de 1.2 Hz la correspondiente al modo de vibración transversal de toda la tribuna, identificada en todos los géneros musicales (EICG, 2005).

Los resultados en el género merengue, aunque fueron más aleatorios que en el género salsa, presentaron concentraciones notables alrededor de 2.0 Hz, 2.5 Hz y sus respectivos armónicos en 4 Hz y 4.5 Hz (Figura 7).

En el género vallenato los resultados se concentraron alrededor de 1.5 Hz, 1.8 Hz y 3.6 Hz (Figura 8).

En el género reguetón se presentaron resultados muy dispersos dentro del rango de las frecuencias excitadas por el público. Es decir, para identificar una tendencia, sería necesario analizar una mayor cantidad de registros para este género musical (Figura 9). En los histogramas se aprecian frecuencias mayores a 5 Hz; sin embargo, están relacionadas con el público en terceros armónicos y con el comportamiento natural de la estructura.

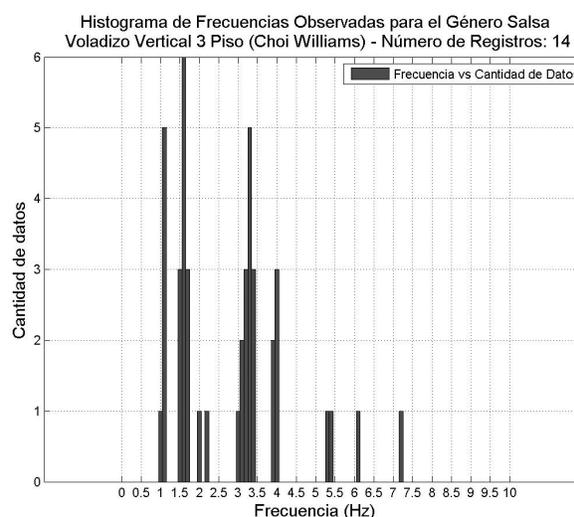
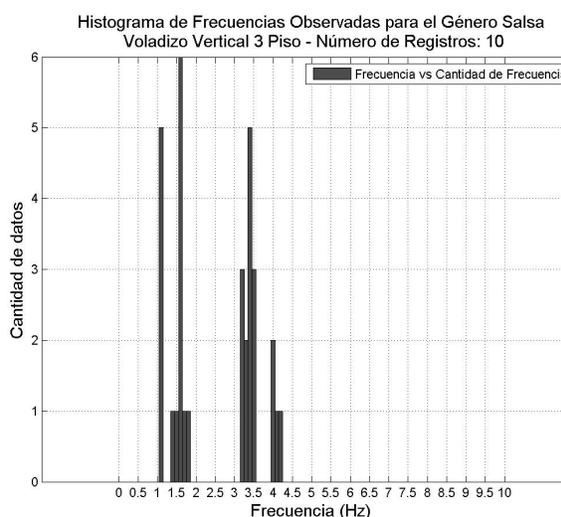


Figura 6. Histograma de frecuencias identificadas en los voladizos verticales del tercer piso para el análisis del género salsa a través de la transformadas de Fourier (izquierda) y de Choi-Williams (derecha).

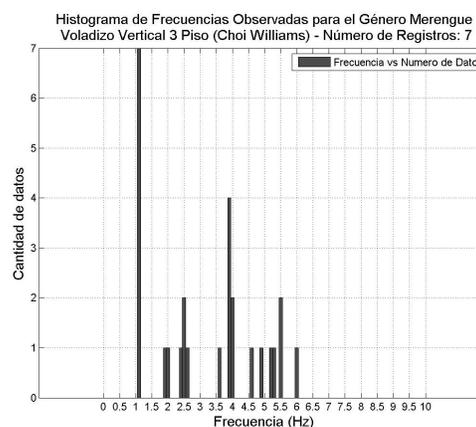
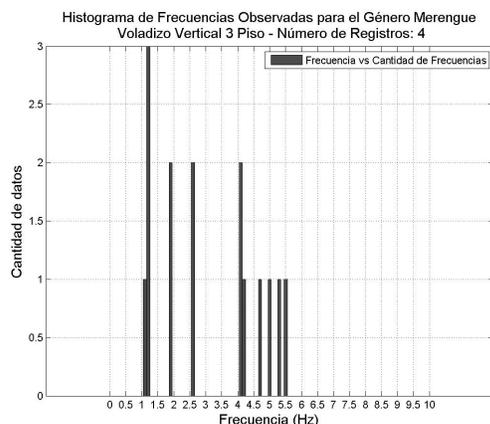


Figura 7. Histograma de frecuencias identificadas en los voladizos verticales del tercer piso para el análisis del género merengue a través de la transformadas de Fourier (izquierda) y de Choi-Williams (derecha).

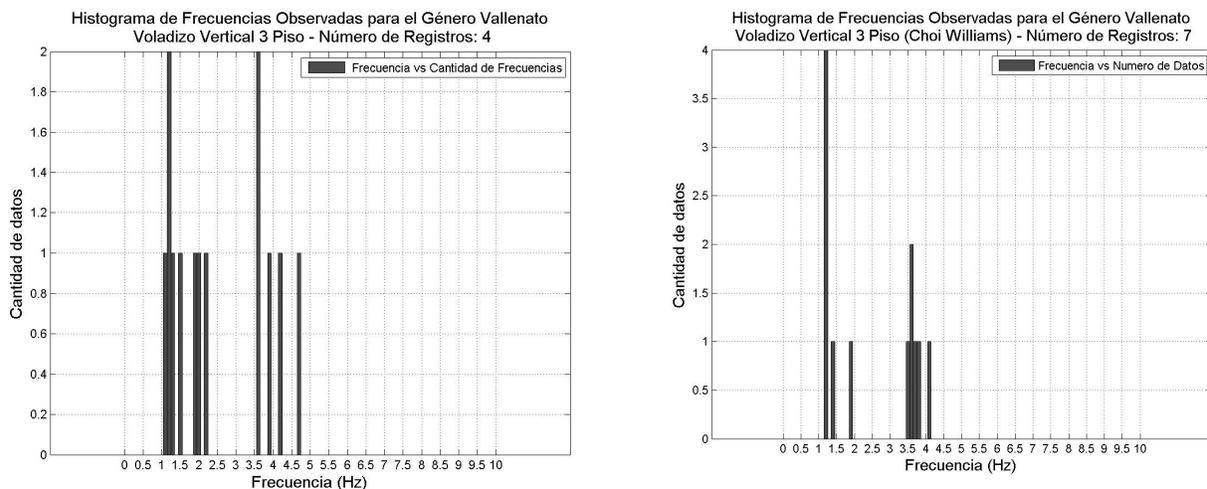


Figura 8. Histograma de frecuencias identificadas en los voladizos verticales del tercer piso para el análisis del género vallenato a través de la transformadas de Fourier (izquierda) y de Choi-Williams (derecha).

Nótese que se pueden identificar los segundos armónicos de las frecuencias características identificadas que se presentan aproximadamente hasta los 5Hz (Moncayo et al., 2006) en cada uno de los géneros musicales excepto en reguetón.

Tanto en la distribución de potencia como en el análisis a través de las distribuciones tiempo-frecuencia se encontraron algunas frecuencias que no corresponden a los resultados esperados, sino a la respuesta de la estructura a algún tipo de excitación del público que no corresponde al comportamiento característico en el género musical. Sin embargo, este tipo de comportamiento, debido a un aplauso, un saludo de entrada o de despedida, o incluso una frase de motivación característica de estos eventos es de igual importancia.

#### 4. Conclusiones

Las mediciones realizadas en el desarrollo del concierto permitieron establecer las frecuencias típicas de los géneros musicales salsa, merengue, vallenato y reguetón, y demostrar que la respuesta de la estructura es diferente en cada uno de estos ritmos, es decir, que cada género musical tiene una influencia diferente en el comportamiento dinámico de la estructura.

Las normas colombianas de diseño y construcción sismo-resistente NSR-98 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2003), especifican en el numeral B.4.7 que las estructuras sometidas a la acción del público, como estadios, deben estar diseñadas de tal manera que tengan frecuencias naturales verticales por encima de 5 Hz.

En este estudio se demostró que la respuesta en frecuencia de la estructura, ocasionada por los ritmos estudiados, están por debajo de este límite. Sin embargo, al tener en cuenta los segundos armónicos de las frecuencias identificadas (Yao et al., 2002) en cada género musical, se pueden presentar cercanas a este límite, tal como se encontró en el género merengue donde se identificó el segundo armónico en 4.5 Hz.

El reguetón es un género musical nuevo en comparación con los otros géneros musicales analizados. Como se aprecia en los histogramas, este género musical presenta los resultados más dispersos, por lo que sería errado obtener sólo aquellos rangos en los que coincidió la frecuencia con ambos tipos de análisis.

La posible explicación a este fenómeno se debe a que el reguetón es un género musical que no maneja una frecuencia en especial y que el

movimiento del público se realiza de variadas formas. Por este motivo, al establecer un rango de las frecuencias excitadas por el público el intervalo sería mucho más grande.

La identificación de las frecuencias de respuesta de la estructura a la excitación del público corresponde al primer paso para caracterizar los movimientos producidos por las personas en escenarios públicos, como saltos en partidos de fútbol, movimientos sincronizados en eventos religiosos y musicales, etc. Es necesario seguir registrando y analizando el movimiento de la estructura del estadio y de otros escenarios públicos, ya que al tener mayor cantidad de muestras se puede obtener cada vez mayor confiabilidad.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación de la Universidad del Valle y COLCIENCIAS (Contrato No. RC-329-2005) para el proyecto titulado *Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de la interacción dinámica humano/estructura para escenarios públicos* cuyos resultados se presentan en este artículo. Igualmente, se agradece al Grupo de Investigación en Control Industrial (GICI), por su colaboración en el desarrollo del proyecto y al equipo de trabajo del Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad del Valle.

## 6. Referencias bibliográficas

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2003). *Normas colombianas de diseño y construcción sísmo-resistente NSR-98*. Bogotá: 3R Editores Ltda.  
<http://desastres.unanleon.edu.ni/pdf/2003/febrero/envio2/pdf/spa/doc13281.htm>

Auger, F., Flandrin, P., Gonçalvès, P., & Lemoine, O. (1996). *Time-frequency toolbox for use with MatLab*. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).  
<http://tftb.nongnu.org/>

Barrios D'Ambra, R., Iturrioz, I., & Doz, G. N. (1997). *Estudio de las características dinámicas de estadios de fútbol*. XXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, San Carlos - SP, Brasil.

Chopra, A. K. (1995). *Dynamic of structures: theory and applications to earthquake engineering*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.

EICG (Escuela de Ingeniería Civil y Geomática) (2005). *Estudio de vibraciones e identificación del comportamiento dinámico del Estadio Pascual Guerrero*, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Gómez, D. (2001). *Vibraciones de piso inducidas por actividades humanas: comportamiento y modelación*. Documento del curso Dinámica Estructural, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ji, T. (2003). Understanding the interaction between people and structures. *The Structural Engineer* 81 (14), 12-13.

Moncayo, H., Marulanda, J., & Thomson, P. (2006). *Modal identification and monitoring of human-induced vibration of Cali's olympic stadium*. In Proceedings of the 23rd Southeastern Conference on Theoretical and Applied Mechanics (SECTAM XXIII), Mayagüez, Puerto Rico.

Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (1998). *Tratamiento digital de señales*. Madrid: Prentice Hall Ltda.

Sachse, R., Pavic, A., & Reynolds, P. (2003). Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: a literature review. *The Shock and Vibration Digest* 35 (1), 3-18.

Sim, J. H. H. (2006). *Human-structure interaction in cantilever grandstands*. Doctoral Dissertation, Oxford University, Oxford, England.  
<http://www-civil.eng.ox.ac.uk/publications/theses/sim-part1.pdf>

The MathWorks, Inc. (2003). *MATLAB Digital Signal Processing Toolbox*.

Tischer, H. (2007). *Efectos del reforzamiento sismo resistente sobre el comportamiento dinámico de edificaciones*. Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

VERS (Vibration Engineering Research Section). (2007). Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield, United Kingdom.

<http://vibration.shef.ac.uk>

Yao, S., Wright, J. R., Pavic, A., & Reynolds, P. (2002). *Forces generated when bouncing or jumping on a flexible structure*. In Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration (ISMA2002), Leuven, Belgium, Vol. 2, p. 563-572.

[http://vibration.shef.ac.uk/pdfs/ISMA\\_2002\\_1.pdf](http://vibration.shef.ac.uk/pdfs/ISMA_2002_1.pdf)

Yao, S., Wright, J. R., Pavic, A., & Reynolds, P. (2004). Experimental study of human-induced dynamic forces due to bouncing on a perceptibly moving structure. *Canadian Journal of Civil Engineering* 31 (6) 1109-1118.

Yao, S., Wright, J. R., Pavic, A., & Reynolds, P. (2006). Experimental study of human-induced dynamic forces due to bouncing on a perceptibly moving structure. *Journal of Sound and Vibration* 296(1/2), 150-165.