

Identificación de la respuesta sísmica en pirámides del área de Chichén Itzá para preservar el patrimonio cultural

Identification of the seismic response in pyramids of the Chichén Itzá area for the preservation of cultural heritage

Martín Cárdenas-Soto^{1,*}, Jesús Sánchez-González¹, José A. Martínez-González¹, David Escobedo-Zenil¹, Osiris Sandoval-Quintana², Armando Carrillo-Vargas², Denisse L. Argote-Espino³, Pedro A. López-García⁴, Gerardo Cifuentes-Nava²

¹ Departamento de Geofísica, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de Investigación, Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, CDMX, México.

² Servicio Magnético, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de Investigación, Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, CDMX, México.

³ Dirección de Estudios Arqueológicos, Instituto Nacional de Antropología e Historia. Lic. Verdad 3, 06000 Centro Histórico CDMX, México.

⁴ Posgrado en Arqueología, Escuela Nacional de Antropología e Historia. Periférico Sur esq. Calle Zapote, Colonia Isidro Fabela, 14030 Talpan, CDMX, México.

* Autor para correspondencia: (M. Cárdenas-Soto) martinc@unam.mx

Cómo citar este artículo:

Cárdenas-Soto, M., Sánchez-González, J., Martínez-González, J.A., Escobedo-Zenil, D., Sandoval-Quintana, O., Carrillo-Vargas, A., Argote-Espino, D.L., López-García, P.A., Cifuentes-Nava, G., 2024, Estudio de reconocimiento de la respuesta sísmica en pirámides del área de Chichén Itzá orientado a preservar el patrimonio cultural: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (2), A020324. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n2a020324>

Manuscrito recibido: 18 de octubre de 2023.

Manuscrito corregido: 4 de enero de 2024.

Manuscrito aceptado: 8 de enero de 2024.

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CCBY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

Analizamos la respuesta sísmica de tres estructuras arqueológicas de la zona Chichén Itzá a fin de proveer elementos que permitan dar seguimiento a su preservación. Realizamos medidas de ruido sísmico ambiental con sismógrafos triaxiales de banda ancha por un periodo de tres días para cuantificar las frecuencias de vibración de los edificios de Las Monjas, El Caracol, y El Castillo o Pirámide de Kukulcán mediante cocientes espectrales HVSR. Los resultados muestran que en El Caracol predomina la frecuencia del suelo en 1.3 Hz. Sin embargo, en los edificios Las Monjas y El Castillo observamos una frecuencia fundamental de vibrar de 5.1 Hz con una amplificación relativa alrededor de 6. Este resultado muestra que estas dos pirámides se comportan como una capa de suelo sobre un estrato rígido. En el caso de El Castillo, el registro de ruido en un sismógrafo en su base permite observar un efecto de interacción cinemática debido a la diferencia de rigidez entre el suelo y la estructura. No observamos algún efecto direccional en los cocientes HVSR debido a la anisotropía interna de las pirámides. La estimación de la velocidad de corte es de 255 m/s (considerando que la respuesta sísmica es de origen topográfico, es decir, debido a que la pirámide representa una irregularidad en la superficie del suelo). Esta velocidad corresponde a materiales poco compactos que descansan sobre calizas competentes con velocidad mayores a 1000 m/s, materiales que son susceptibles a sufrir cambios de esfuerzos que eventualmente puede llevar a un deterioro estructural. Los hallazgos de este estudio sugieren que es necesario un seguimiento e instrumentación continua de los niveles inferiores para evaluar la influencia de las subestructuras durante las etapas preconstructivas y determinar si existen otros efectos debido a la naturaleza kárstica del subsuelo.

Palabras clave: ruido sísmico, HVSR, interferometría sísmica, efectos de sitio topográficos, pirámide de Kukulcán

ABSTRACT

In this study, an analysis was conducted on the seismic response of three archaeological structures located in the Chichén Itzá area. The objective of this analysis was to gather relevant information that may be utilized to monitor and ensure the preservation of these monuments. Ambient seismic noise measurements were conducted over three days using broad-band seismographs. The objective was to assess the vibration frequencies of three buildings, namely Las Monjas, El Caracol and El Castillo or Kukulcán Pyramid, using HVSR method. The findings indicate that the dominant frequency of the El Caracol building is 1.3 Hz. Nevertheless, it is noteworthy that within the Las Monjas and El Castillo structures, an observable fundamental frequency of 5.1 Hz is present, accompanied by a relative amplification of around 6. The findings of this study indicate the behavior of the two pyramids can be likened to that of a soil layer overlying a stiff stratum. The noise recorded by a seismograph at the base of El Castillo enables the observation of a kinematic interaction phenomenon resulting from the disparate stiffness properties of the soil and the structure. No directional effect was observed on the HVSR ratios due to internal irregularities in the pyramids. Considering the half-width of the base of each pyramid and that the site response is of topographic origin, the calculus of shear velocity is 255 m/s. This velocity relates to non-compact materials resting on competent rocks with velocities more than 1000 m/s, materials subject to stress changes that may eventually lead to structural degradation. The findings of this study indicate the need for continuous monitoring and instrumentation of lower levels to assess the influence of substructures during preconstruction stages and determine whether there are any other effects due to the karstic nature of the subsurface.

Keywords: seismic noise, seismic interferometry, HVSR, topographic site effects, Kukulcán Pyramid.

1. Introducción

Los estudios geofísicos relacionados con el patrimonio cultural investigan las condiciones subterráneas de la zona que rodea al objetivo y en algunas ocasiones la estructura en sí. Los métodos geofísicos, como la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y el radar de penetración del terrestre (GPR), se pueden utilizar para detectar ruinas arqueológicas (o edificios históricos), caracterizar el nivel del agua subterránea e identificar vacíos potenciales y suelos fallidos (Wynn, 1986; Khavroshkin, 2020; Saleh *et al.*, 2022). Estas técnicas se han utilizado para investigar las Grandes Pirámides de Giza, Egipto, así como otras pirámides en Dakhshur, Medum y Memphis (Khavroshkin, 2020).

Los estudios sobre la respuesta sísmica de estructuras antiguas, como las pirámides, son escasos debido a que muchas de ellas se encuentran en zonas relativamente estables y de baja sismicidad, o bien, no se ha prestado la debida atención como en el caso de México donde existen centros ceremoniales expuestos a una tasa alta de sismicidad. El comportamiento de esas construcciones durante cargas sísmicas puede variar dependiendo de su diseño (aunque tienen la ventaja de ser estables debido a su forma), materiales de construcción y sobre todo de su integridad estructural. Estudios recientes en las pirámides de Egipto muestran que los factores que pueden afectar la respuesta sísmica de pirámides son la geometría y masa, la cimentación, las técnicas de construcción, el estado de preservación y conservación, y la sismicidad local (Hemeda y Sonbol, 2020). Cacciola *et al.* (2022), a fin de preservar la pirámide de Zoser en Egipto, realizaron estudios estocásticos que determinan cuál sería el pico máximo de aceleración durante sismos futuros. Sus resultados muestran que es posible diseñar fronteras de vibración como una estrategia para mitigar el efecto de los sismos.

La investigación del patrimonio cultural en México incluye estudios estructurales, geofísicos y arqueológicos (Chávez *et al.*, 2001; Galindo

Domínguez *et al.*, 2013; López-García *et al.*, 2014; Thompson *et al.*, 2009). Recientemente, mediante imágenes de ERT se ha descubierto que la pirámide de Kukulcán, en Chichén Itzá, fue construida sobre un río subterráneo o cenote, y que ésta contiene una segunda pirámide oculta dentro (Chávez *et al.*, 2018; Tejero-Andrade *et al.*, 2018). En las pirámides del Sol y la Luna en Teotihuacán, se han incorporado los métodos de ruido sísmico para estudiar la estructura interna de la pirámide del Sol (Piña-Flores *et al.*, 2021), y la estructura del subsuelo en el caso de la pirámide Luna (Argote *et al.*, 2020). Estas investigaciones demuestran el potencial de los métodos geofísicos para la caracterización de estructuras arqueológicas, tanto en extensión como en profundidad.

El presente estudio muestra los resultados de reconocimiento de la respuesta sísmica de tres estructuras arqueológicas importantes en la zona Chichén Itzá. Se trata de mediciones de vibración ambiental realizadas en los edificios prehispánicos de Las Monjas, El Caracol, y en la pirámide del Castillo o también llamada de Kukulcán. El objetivo es determinar las condiciones locales de la respuesta sísmica de esas estructuras a fin de contar con elementos base para estudios posteriores. Para realizar dicha evaluación, aplicamos el método de cocientes espectrales HVSR, utilizando ruido sísmico registrado en sismógrafos triaxiales instalados por tres días en cada una de esas edificaciones.

2. Zona de estudio y adquisición de datos

La zona arqueológica de Chichén Itzá se localiza al centro de la porción norte del estado de Yucatán, en el municipio de Tinum. Chichén Itzá es una de las zonas arqueológicas más importantes del norte del área maya, caracterizada principalmente por su arquitectura monumental con presencia de basamentos piramidales, edificios tipo palacio y *sacbé*s que comunican diversos conjuntos arquitectónicos, abarcando un área de más de

25 km². La reconstrucción histórica del sitio se ha basado principalmente en la arquitectura, en las fuentes etnohistóricas y en los tipos cerámicos estudiados por diferentes proyectos arqueológicos, lo cual ha permitido profundizar sobre la cronología y la secuencia ocupacional del sitio, el cual tuvo un periodo de actividad monumental entre los años 800 y 1100 d.C.

Chichén Itzá fue asentada sobre rocas calizas del Terciario (65 a 2.5 millones de años) y del Cuaternario, con menos de 2.5 millones de años (Rosenfeld, 2002), con suelos delgados de alrededor de 15 cm de espesor sobre los afloramientos de roca caliza. Las características geológicas de la península permiten que el agua de lluvia se infiltre al subsuelo a través de poros y grietas en la roca, formando corrientes no superficiales y acuíferos no confinados que se van conectando hasta formar sistemas hidráulicos subterráneos que se mueven hacia las costas (Chnaid Gamboa, 1999). Estos sistemas de acuíferos, en forma de ríos y cenotes, fueron trascendentales para el desarrollo de los asentamientos humanos en toda la península, constituyéndose como parte importante del culto religioso tanto de grupos prehispánicos como actuales.

El complejo de Las Monjas se encuentra en la parte sureste de la zona arqueológica. El grupo arquitectónico donde se encuentra el edificio de las Monjas es de los más antiguos del sitio, iniciando su construcción alrededor del año 800 d.C. con varias etapas constructivas. Su arquitectura presenta una superposición de varias estructuras que datan de la etapa antigua de esplendor de la ciudad. El edificio es cuadrangular con dos anexos y dos templos en su cúspide, con dimensiones de aproximadamente 50 m de largo por 23 m de ancho. Su escalinata se encuentra en el lado norte del edificio; y ésta conduce a una explanada con una altura aproximada de 10 metros.

El actual edificio del Caracol fue construido entre los años 900 y 1000 d.C. Se encuentra sobre una enorme plataforma cuadrangular de 57 por 75 m, al parecer diseñada para soportar la torre. En la parte superior se pueden observar vestigios

de un antiguo sistema de drenaje para evitar la acumulación de agua. La terraza, que conecta el observatorio con la plataforma, tiene dimensiones de 26 por 30 m. En la parte superior destaca la estructura cilíndrica que se asienta sobre una base redonda de 18 metros de diámetro.

En el caso del edificio del Castillo, se considera que la primera fase constructiva fue edificada alrededor del año 750 d.C., siendo esta cubierta por una segunda etapa constructiva cerca del año 850 d.C. y esta, a su vez, por una tercera etapa aproximadamente en el 950 d.C. El diseño de este último edificio presenta una forma geométrica piramidal y consta de nueve niveles. Cada una de sus cuatro fachadas mide aproximadamente 54 m en sus bases; cada base cuenta con una escalinata central, y en la parte superior se encuentra una plataforma rematada por un templete. Su altura alcanza los 24 m hasta la plataforma superior, más 6 m de su templete para lograr 30 m como máximo.

La adquisición de datos se realizó del 23 al 26 de mayo de 2023 en la zona arqueológica de Chichén Itzá. Instalamos 4 sismógrafos triaxiales 6TD de Guralp System en tres edificios o complejos; Las Monjas, El Caracol y El Castillo o pirámide de Kukulkán (Figura 1). En la parte alta de cada edificio se registró ruido sísmico ambiental de forma continua a una frecuencia de 100 muestras por segundo. En el Castillo, además se colocó un equipo en la base a nivel del suelo, dentro de la pirámide y al inicio de la escalinata de la primera subestructura reportada por Erosa Peniche (1939) (Figura 2). En todos los sitios, el componente NS del equipo fue orientado hacia el norte magnético. La Tabla 1 contiene la nomenclatura de los instrumentos utilizados en cada sitio, las coordenadas de éstos, y los tiempos de inicio y final de registro.

La Figura 3 muestra el componente vertical de los registros de velocidad en cada uno de los sitios. Se trata de una ventana de registro de 5.5 horas de duración, donde alrededor del segundo 109,000 se registró un telesismo cuya amplitud es casi el doble de amplitud que algunos eventos transitorios

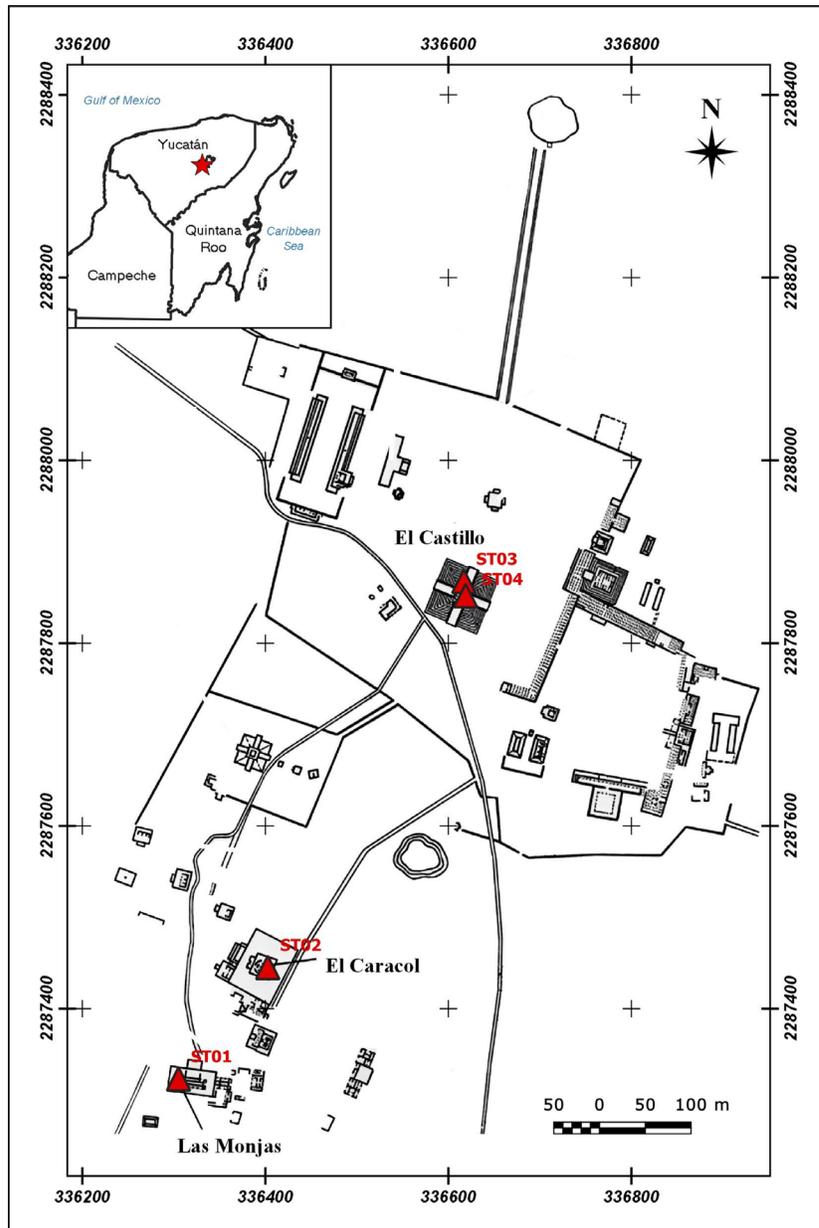


Figura 1 Localización de la zona de estudio (estrella roja) y de las estaciones de registro (triángulos rojos) en la zona arqueológica de Chichén Itzá, Yucatán (Plano modificado de Ruppert, 1952).

Tabla 1. Características de registro de las estaciones.

Equipo	Clave	Edificios	Coordenadas UTM, zona 16		Inicio registro	Fin registro
T6630	ST01	Complejo las Monjas	336321	2287345	20230523_1700	20230526_1500
T6631	ST02	El Caracol	336363	2287459	20230523_1802	20230526_1500
T6652	ST03	El Castillo (base)	336620	2287889	20230523_2100	20230526_0300
T6686	ST04	El Castillo (cúspide)	336620	2287889	20230523_2122	20230526_1800

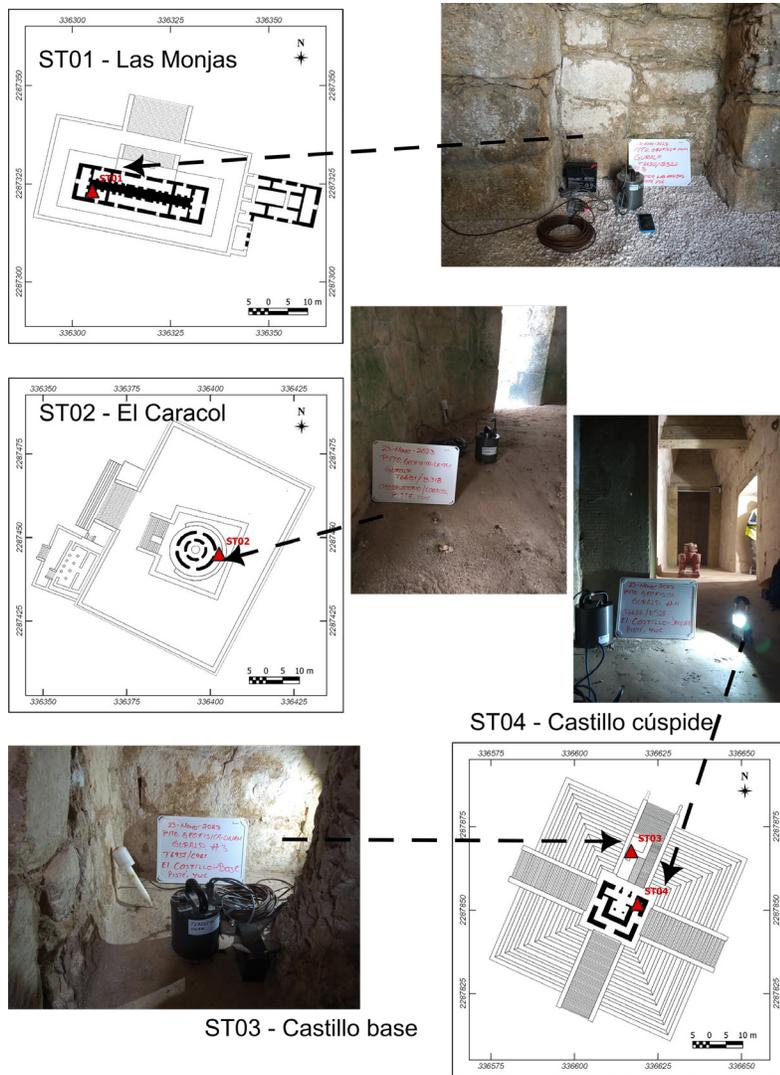


Figura 2 Vista en planta de la localización de sísmógrafos en cada una de las estructuras arqueológicas. Las Monjas (plano adecuado de INAH, 2023), El Caracol (plano adecuado de Stierling, 1981), y El Castillo (plano adecuado de Marquina, 1951). Se incluye una fotografía de cada equipo. El sísmógrafo en la base de El Castillo se instaló en el interior de éste, al pie de la escalinata de la primera subestructura (Erosa Peniche, 1939).

(provocados por la actividad antropogénica) que se observan en esa ventana de tiempo. También se observa un pulso de calibración o defecto instrumental en el registro de la estación El Caracol.

3. Metodología

Una práctica común en la evaluación de la respuesta sísmica del subsuelo es detectar la presencia de una capa de suelo blando mediante el método HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, por sus siglas en inglés) o comúnmente denominado método de Nakamura (Nakamura 1989). El método hace uso del ruido sísmico ambiental al suponer que el campo de ondas es predominantemente formado de ondas superficiales (Bard, 1998; Bonnefoy-Claudet *et al.*, 2006). Si la capa de suelo está presente, entonces el cociente espectral del promedio de los espectros de amplitud de Fourier de los componentes

horizontales, entre el espectro de amplitud del componente vertical, provee la respuesta sísmica de la capa de suelo blando. La frecuencia donde se presenta la máxima respuesta se denomina la frecuencia fundamental de vibrar de la capa de suelo (f_0). Esta cuantificación es comúnmente denominada efecto de sitio.

En el caso de una pirámide, evaluar la respuesta sísmica en la cúspide es análogo a evaluar un efecto de sitio de origen topográfico, es decir, la presencia de una irregularidad en superficie. En este caso, la respuesta sísmica provoca que los desplazamientos sísmicos alcancen su mayor amplificación en las paredes superiores debido a la focalización del campo de onda cerca de la cúspide (Di Fiore, 2010; Hussain *et al.*, 2020, Maresca *et al.*, 2022). El método de Nakamura es una aproximación aceptable para estimar la amplificación sísmica debido a la resonancia de ondas S en un medio horizontalmente estratificado (Lermo y Chávez-García, 1994). En caso de una irregularidad topográfica sobre

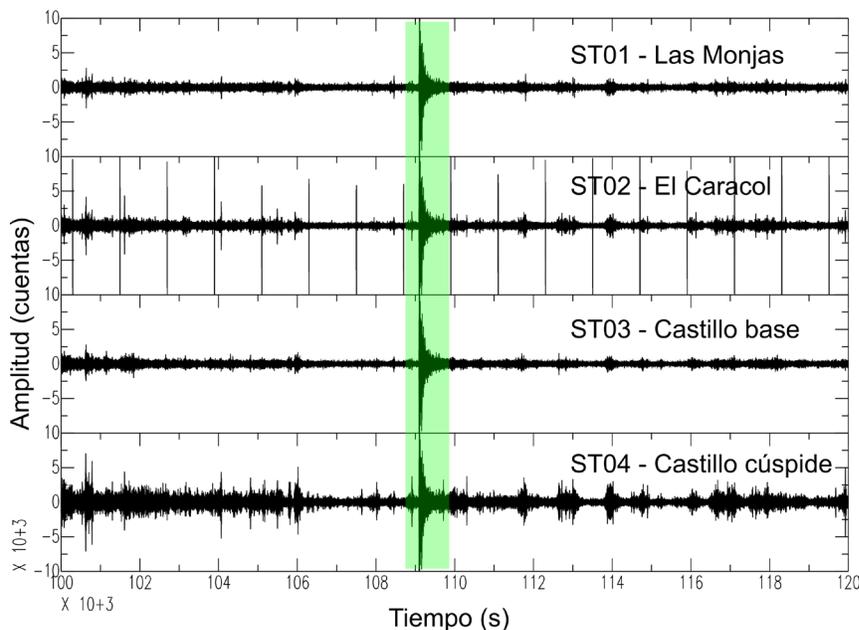


Figura 3 Componente vertical de velocidad de los registros de ruido continuo en cada uno de los sitios de estudio. Se muestra una ventana de tiempo de 5.5 horas de registro. El recuadro transparente de color verde muestra la ventana de tiempo de mayor amplitud del telesismo registrado. Las trazas han sido filtradas con un filtro pasa altas con una frecuencia de 0.4 Hz a fin de comparar la amplitud del telesismo con respecto a los eventos transitorios.

el terreno en un medio no homogéneo, es posible aproximar la frecuencia de vibrar de tal irregularidad mediante la formulación (Paolucci, 2002; Glinsky *et al.*, 2019)

$$f_0 = \frac{c\beta}{2l} \quad (1)$$

donde β es la velocidad de ondas corte, l es la mitad del ancho de la base, en este caso la pirámide, y c es un parámetro 0.7 (para ondas SH) y 1.0 (para ondas SV). Si consideramos que el ruido sísmico está conformado principalmente por ondas superficiales tipo Rayleigh (Bonney-Claudet *et al.*, 2006), entonces $c = 1.0$ debido a

que estas ondas se originan por la interacción bidimensional de un sistema de ondas P-SV (Aki y Richards, 2002). Esta consideración implica que la amplificación del movimiento del terreno puede estar polarizada hacia una dirección preferencial (La Rocca *et al.*, 2020; Matsushima *et al.*, 2014, 2017) debido a una irregularidad lateral en el subsuelo, o a la presencia de la misma pirámide (efecto 2D o 3D). En este caso, el cálculo del HVSR direccional (rotación de los componentes horizontales) es una opción para identificar si la amplificación sísmica tiene alguna contribución de alguna estructura irregular (*e.g.* Cárdenas-Soto *et al.*, 2021).

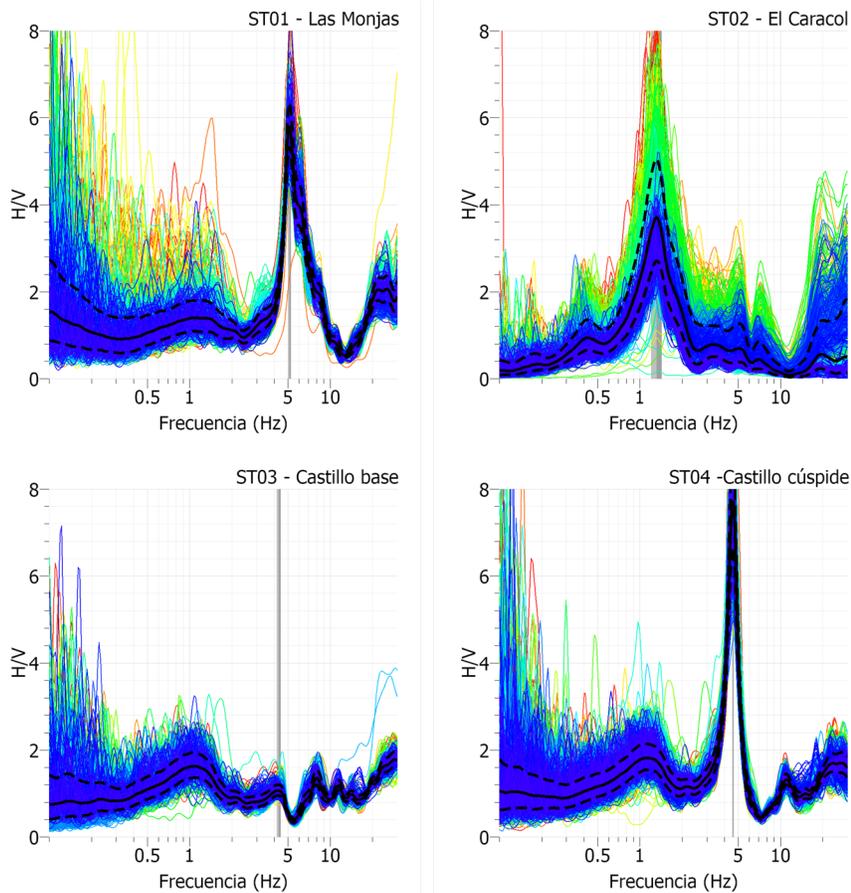


Figura 4 Resultados HVSR en cada uno de los puntos de medición que se indican en la Figura 1 y Tabla 1. La curva negra continua es la relación HVSR promedio de todas las estimaciones de 120 s de duración (curvas de colores), cuya desviación estándar es representada en línea negra discontinua.

4. Resultados

En la evaluación del cociente HVSR utilizamos tres días de registro de ruido ambiental para obtener el cociente espectral promedio (promedio de los cuadrados de los componentes horizontales entre el componente vertical), resultado de segmentos de registro de 120 s de duración sin traslape. Antes de realizar el cociente, descartamos aquellos segmentos con amplitudes energéticas de eventos transitorios mediante el algoritmo STA/LTA a fin de conservar sólo segmentos de ruido cuasi-estacionario. Los cálculos fueron realizados mediante el software Geopsy (Wathelet *et al.*, 2020). En dicha evaluación, los espectros de Fourier de los segmentos de ruido fueron suavizados mediante una ventana Konno-Ohmachi (Konno y Ohmachi, 1998) con una fracción de suavizamiento del 20%. La Figura 4 muestra los resultados obtenidos en cada uno de los sitios. Se observa que, tanto en el sitio de Las Monjas como en El Castillo Cúspide (estaciones ST01 y ST04), existe una amplitud relativa significativa, en las Monjas de 5.8 en 5.1 Hz y en el Castillo de 7.8 en 4.6 Hz. Las curvas HVSR también exhiben modos superiores de vibrar en 23 Hz para el edificio de las Monjas, y en 12 y 25 Hz para El Castillo. En general, para frecuencias mayores de 20 Hz, se observa una gran variabilidad en la amplitud de las curvas HVSR debido probablemente a ruido de carácter industrial o a la presencia de una capa delgada muy superficial.

En la estación ST03 se observa una ligera amplificación (en promedio de 1.8) a una frecuencia de 1.3 Hz, y en frecuencias mayores la respuesta sísmica es prácticamente plana. Esta característica es común de un sitio firme donde existe la ausencia de una capa de suelo blando. En la curva HVSR de la estación ST03 (Figura 4) hemos indicado con una barra de color gris la frecuencia de 4.3 Hz, posterior a esta frecuencia aparece un mínimo en 5.1 Hz. Más adelante se explica este comportamiento como un efecto de interacción suelo-estructura. La amplificación observada en los tres sitios en la frecuencia de 1.3 Hz está relacionada a un contraste de velocidad

en una interfaz profunda en el subsuelo. Este pico alcanza una amplificación casi de 4 en la estación El Caracol. Aunque a esa frecuencia la amplificación es mayor en esa estación con respecto a las otras, consideramos tomar con reserva tal valor debido a los problemas instrumentales que se muestran en la Figura 3. Dada la poca altura a la que se colocó la estación en El Caracol (5 m), podemos suponer que la respuesta en la frecuencia de 1.3 Hz es prácticamente la amplificación sísmica del área de estudio.

Una estimación preliminar de la velocidad de corte (V_s) de los materiales dentro de las pirámides puede ser obtenida mediante la fórmula 1. Para el caso del edificio de Las Monjas, considerando la mitad del lado más largo de la base, $l=25$ m, V_s sería de 255 m/s. Para el caso de El Castillo, podemos tener una mejor estimación de la frecuencia de vibrar de la estructura si utilizamos la estación en la base, ST03, y obtenemos cocientes espectrales, o funciones de transferencia, entre el movimiento horizontal registrado en la cúspide con respecto a la base. En este proceso los registros de ruidos son preprocesados de forma similar al de los cocientes HVSR. La Figura 5 muestra estas funciones en las direcciones NS y EW. Se observa que la máxima respuesta en ambas direcciones es en 5.1 Hz, frecuencia ligeramente mayor que la estimada en el HVSR de la cúspide. Si consideramos $l = 12$, la velocidad de corte en esta estructura sería $V_s = 275$ m/s.

Estos resultados muestran que ambas pirámides, Las Monjas y El Castillo, se comportan como una capa de suelo sobre un subestrato rígido, siendo el subestrato el subsuelo de material calcáreo donde están erigidas estas estructuras. En términos de una función de transferencia, la respuesta sísmica de dichas pirámides (frecuencia a la que se presenta la máxima amplitud) puede representarse como un sistema de un grado de libertad cuya frecuencia característica puede ser reproducida por un sistema masa-resorte-amortiguador. En la Figura 5, en frecuencias mayores que la frecuencia característica de 5.1 Hz, se observan modos superiores en 9, 12 y 26 Hz para la dirección

NS, y en 10 y 17 Hz para la dirección EW. La forma y no periodicidad a la que se presentan esos modos en ambas direcciones indica, en términos de la función de transferencia de una estructura, la contribución de desplazamientos menores ya sea debido a la masa total o a estructuras internas como las subestructuras de las etapas constructivas (Erosa Peniche, 1939; Tejero *et al.*, 2018).

Las velocidades V_s estimadas en las pirámides de Las Monjas y El Castillo son muy similares, resultado que indica que los materiales constructivos son de la misma naturaleza y que la amplificación relativa medida, en promedio 6 (estaciones ST01 y ST04 de la Figura 4), es resultado de un significativo contraste de impedancia entre esos materiales y un sustrato con V_s promedio de 1000 m/s del área de estudio (Campos-Enríquez *et al.*, 2004). Esa diferencia de rigidez entre la estructura de El Castillo y el subsuelo provoca un efecto de interacción cinemática suelo-estructura (Chávez-García y Cárdenas-Soto, 2002; Assimaki y Kausel, 2007; Todorovska, 2009) que se observa en el mínimo en 5.1 Hz de la función HVSR calculada en la base de El Castillo (estación ST03 de la Figura 4). Este efecto provoca que los movimientos a nivel de

cimentación se desvíen de los movimientos que se producen en campo libre, lo cual es benéfico para la estructura dado el tamaño de la cimentación o su empotramiento (Zogh *et al.* 2021). Cabe mencionar que la respuesta sísmica observada en la estación de la base de El Castillo no permite dilucidar la presencia o algún efecto provocado por el cenote reportado por Chávez *et al.* (2018).

La velocidad de corte estimada para la estructura de El Castillo se puede corroborar mediante el método de Interferometría Sísmica (Campillo y Paul, 2003; Shapiro y Campillo, 2004; Snieder y Safak, 2006), el cual hace uso de la correlación cruzada de los registros de ruido entre un par de estaciones (en este caso serían los registros en la cúspide y la base). El método extrae la llamada función de Green Empírica, o la respuesta sísmica del medio, al postular que un sensor actúa como fuente virtual y el otro como receptor, o viceversa. El tiempo de retraso del pulso de correlación es el tiempo de viaje entre el par de receptores. Para obtener dicho pulso hemos correlacionado los tres componentes del movimiento en ventanas de 8 s de duración a lo largo de un día de registro. Antes de realizar las correlaciones, los registros de ruido fueron normalizados en tiempo (decimación de 1

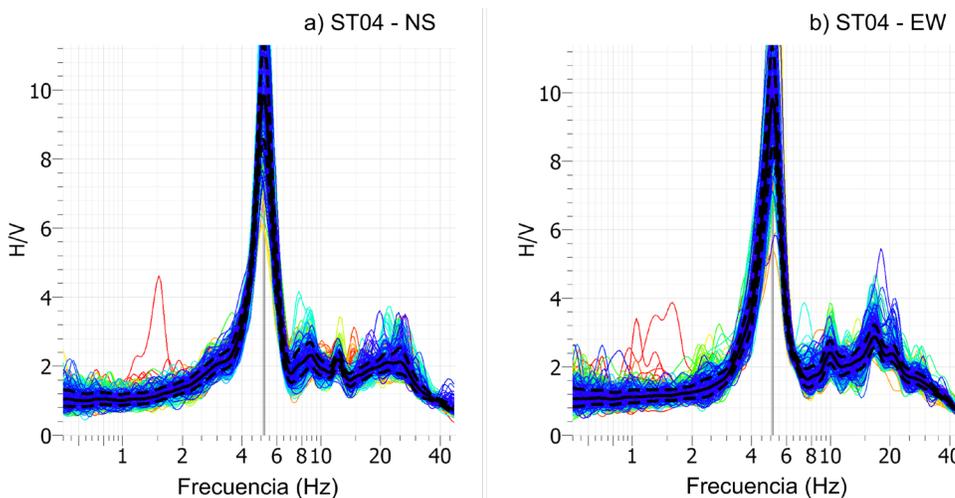


Figura 5 Funciones de transferencia entre el registro de ruido en la cúspide con respecto a la base en el Castillo. a) Dirección NS. b) Dirección EW. La curva negra continua es la función de transferencia promedio de todas las estimaciones de 120 s de duración (curvas de colores), cuya desviación estándar es representada en línea negra discontinua.

bit) para evitar el efecto de eventos transitorios, y en frecuencia (blanqueo espectral) para permitir que existan contribuciones de energía asociada a diferentes fases (Bensen *et al.*, 2007). El promedio de todas esas ventanas se muestra en la Figura 6. En el componente vertical, el pulso no está bien determinado debido a que principalmente captura la propagación asociada a la onda P. Sin embargo, la parte causal de los componentes horizontales muestra un pulso bien definido que asociamos a la propagación de corte de una onda S con una fase centrada en 0.09 s de tiempo de retraso. Si consideramos que la diferencia de alturas entre los receptores de la cúspide y la base es de 24 m, la velocidad con la que viaja una onda S entre esos receptores es de 267 m/s.

A fin de identificar alguna asimetría en la estructura interna de las pirámides o en el subsuelo, calculamos el HVSr direccional. La Figura 7 muestra los resultados en cada sitio para la rotación

de los componentes horizontales cada 10 grados. En esa figura se observa que solo en la estación ST02 existe un efecto de amplificación para ángulos mayores de 90 grados con respecto al norte; es decir, existe una irregularidad interna (ya sea en la forma o la composición) en la parte NW de la estructura, o bien en la parte SE, que produce un importante contraste de impedancia con respecto a la capa superficial. Para las pirámides de Las Monjas y El Castillo no se observa ningún efecto direccional (la amplitud asociada a la frecuencia predominante no varía con el ángulo de rotación). En especial, se esperaría que el análisis de direccionalidad en la parte alta del Castillo mostrara algún efecto debido a las subestructuras internas identificadas (Erosa Peniche, 1939; Tejero *et al.*, 2018). Sin embargo, al parecer tales subestructuras no provocan alguna anisotropía importante que modifique la respuesta sísmica observada en la frecuencia del modo fundamental.

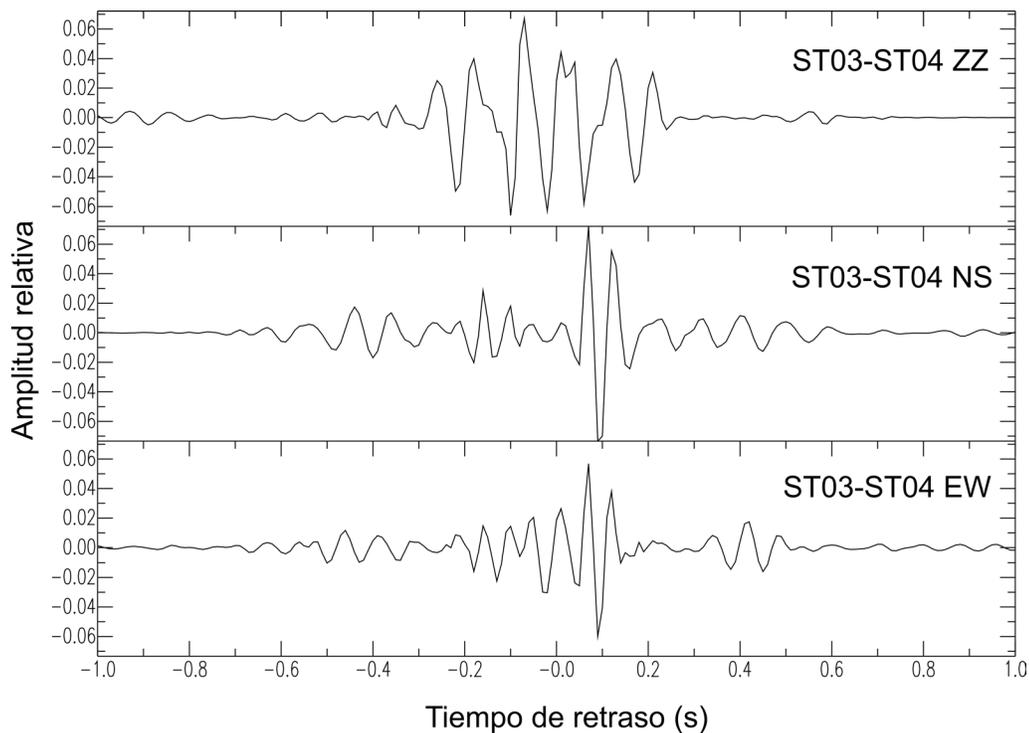


Figura 6 Correlaciones cruzadas entre los tres componentes de registro de la estación en la cúspide con respecto a la estación en la base de la pirámide El Castillo. Las trazas han sido filtradas con un filtro pasa altas con una frecuencia de corte de 12 Hz.

5. Conclusiones

En este trabajo se exponen por primera vez los resultados de vibración ambiental de tres estructuras piramidales importantes en el área arqueológica de Chichén Itzá, México: Las Monjas, El Caracol, y El Castillo o pirámide de Kukulcán. Las mediciones tuvieron un registro continuo de casi tres días en la plataforma superior de dichas estructuras, además, en El Castillo se tuvo la oportunidad de colocar un instrumento en el interior al nivel de la base. Aunque el número de mediciones es limitado

para identificar grados de libertad superiores, la evaluación de la frecuencia fundamental de vibrar de todas esas estructuras es un resultado robusto dado el tiempo de registro. La amplificación asociada a esas frecuencias muestra que las estructuras más altas, Las Monjas y El Castillo, se comportan como una capa de suelo blando sobre un estrato rígido. En esas estructuras, la respuesta sísmica tiene su máxima amplificación en la frecuencia de resonancia de 5.1 Hz. Dada la geometría piramidal de dichas estructuras, el efecto de resonancia es de origen topográfico, dando lugar a una velocidad de corte de 255 m/s.

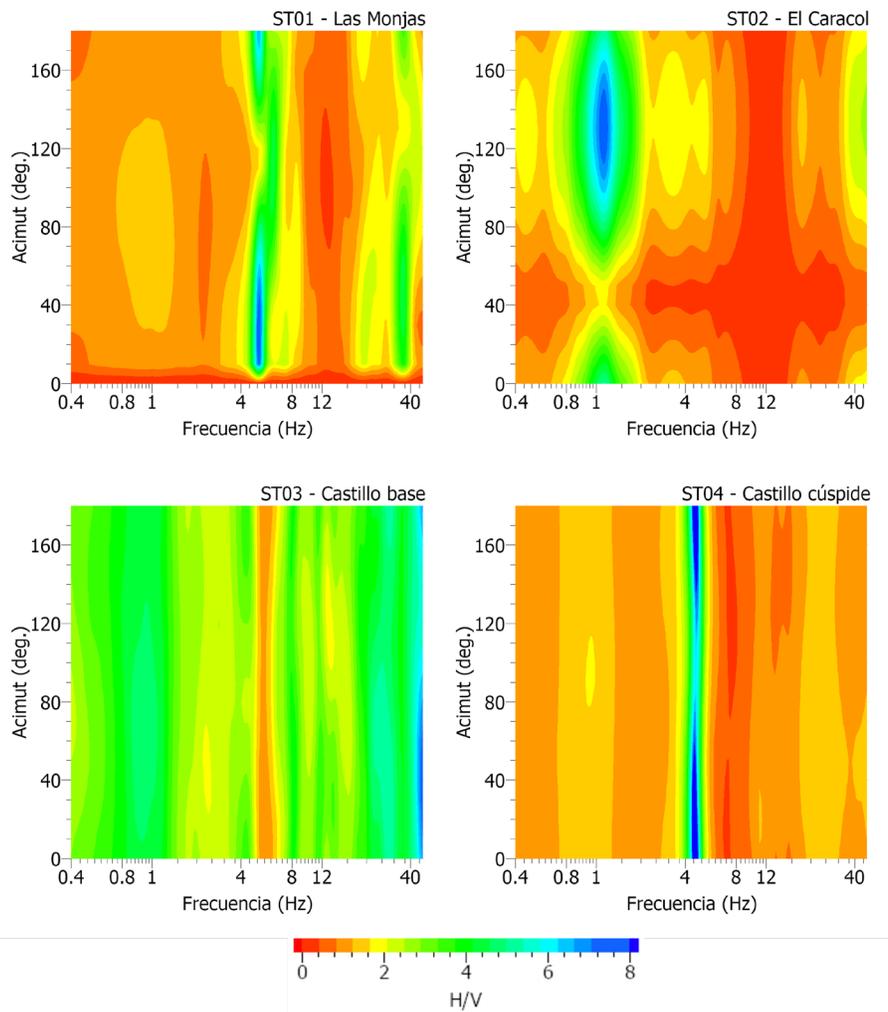


Figura 7 Diagramas HVSR direccionales en cada uno de los puntos de medición indicados en la Tabla 1. La escala de colores indica la amplitud espectral relativa. .

En El Castillo se observa un efecto de interacción cinemática suelo-estructura que eventualmente beneficia a la base de estructura ante movimientos sísmicos. Sin embargo, la calidad de los materiales dentro de la pirámide, cuantificada por una baja velocidad de corte, sugiere monitorear periódicamente cambios relativos de esfuerzos o de vibraciones inducidas, pues la posible pérdida de rigidez de los materiales (disminución de la frecuencia fundamental de vibración) sería una clara indicación de deterioro estructural. Los resultados de este estudio sugieren realizar un monitoreo continuo e instrumentar niveles inferiores para explorar el efecto de las subestructuras de etapas preconstructivas, y analizar si existe un efecto adicional debido a la estructura kárstica del subsuelo.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Cárdenas-Soto, M., Martínez-González, J.A., Sánchez-González, J., Escobedo-Zenil, D.; Análisis de datos: Cárdenas-Soto, M., Martínez-González, J.A.; Desarrollo metodológico/técnico: Cárdenas-Soto, M.; Redacción del manuscrito original: Cárdenas-Soto, M., Argote-Espino, D.L., López-García, P.A.; Redacción del manuscrito corregido y editado: Cárdenas-Soto, M., Argote-Espino, D.L., López-García, P.A.; Diseño gráfico: Cárdenas-Soto, M., Sánchez-González, J.; Adquisición de datos y trabajo de campo: Sandoval-Quintana, O., Carrillo-Vargas, A., Cifuentes-Nava, G.; Interpretación: Cárdenas-Soto, M., Martínez-González, J.A., Sánchez-González, J., Escobedo-Zenil, D.; Financiamiento: Cárdenas-Soto, M., Carrillo-Vargas, A., Cifuentes-Nava, G.

Financiamiento

Este proyecto ha sido apoyado por los proyectos UNAM-DGAPA: PAPIIT IIN106222, IN108124 y asignaciones anuales del Servicio Magnético del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los arqueólogos Octavio Juárez Rodríguez y Marco Antonio Santos Ramírez por las facilidades brindadas para llevar a cabo el estudio en la zona arqueológica de Chichén Itzá, así como al Dr. Esteban Hernández-Quintero, la Dra. Ana Caccavari-Garza y la Ing. Xóchitl Flores-Soto por su colaboración en el trabajo de campo. También se agradece al Dr. Miguel Ángel Santoyo y a un revisor anónimo los comentarios y sugerencias que mejoraron el análisis e interpretación de los resultados.

Conflictos de interés

Los autores hacen constar que no existen conflictos de interés con otros autores, instituciones u otros terceros sobre el contenido total de este artículo, no tampoco tienen intereses financieros o no financieros relevantes que revelar.

Editor a cargo

Avto Goguitchaichvili.

Referencias bibliográficas

- Aki, K., Richards, P.G., 2002, *Quantitative Seismology*: University Science Books, 700 p.
- Argote, D.L., Tejero-Andrade, A., Cárdenas-Soto, M., Cifuentes-Nava, G., Chávez, R.E., Hernández-Quintero, E., García-Serrano A., Ortega V., 2020, Designing the underworld in Teotihuacan: Cave detection beneath the moon pyramid by ERT and ANT surveys: *Journal of Archaeological Science*, 118, 105-141. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105141>
- Assimaki, D., Kausel, E., 2007, Modified topographic amplification factors for a single-faced slope due to kinematic soil-structure interaction: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(11), 1414-1431. <https://doi.org/10.1061/>

- (ASCE)1090-0241(2007)133:11(1414)
- Bard, P.Y., 1998. Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation?, en Irikura, K. (ed.), *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*: CRC Press, 3, 1251-1279.
- Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Lin, F., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., Yang, Y., 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements: *Geophysical Journal International*, 169(3), 1239-1260. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x>
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P.Y., 2006, The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review: *Earth-Science Reviews*, 79(3-4), 205–227. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004>
- Cacciola, P., Shadlou, M., Ayoub, A., Rashed, Y.F., Tombari, A., 2022, Exploring the performances of the vibrating barriers for the seismic protection of the Zoser pyramid: *Scientific Reports*, 12(1), 5542. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09444-x>
- Campillo, M., Paul, A., 2003, Long-range correlations in the diffuse seismic coda: *Science* 299(5606), 547-549. <https://doi.org/10.1126/science.1078551>
- Campos-Enríquez, J.O., Chavez-Garcia, F.J., Cruz, H., Acosta-Chang, J.G., Matsui, T., Arzate, J. A., Unsworth, M.J., Ramos-López, J., 2004, Shallow crustal structure of Chicxulub impact crater imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift: *Geophysical Journal International*, 157(2), 515-525. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02243.x>
- Cárdenas-Soto, M., Piña-Flores, J., Escobedo-Zenil, D., Vidal-García, M.C., Natarajan, T., Hussain, Y., Sánchez-Sesma, F.J., 2021, Seismic ambient noise tomography to retrieve near-surface properties in soils with significant 3D lateral heterogeneity: the case of Quinta Colorada building in Chapultepec, Mexico: *Natural Hazards*, 108(1), 129-145. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04735-4>
- Chávez, R.E., Cámara, M.E., Tejero, A., Barba, L., Manzanilla, L., 2001, Site characterization by geophysical methods in the archaeological zone of Teotihuacan, Mexico: *Journal of Archaeological Science*, 28(12), 1265–1276. <https://doi.org/10.1006/jasc.2000.0627>
- Chávez, R.E., Tejero-Andrade, A., Cifuentes, G., Argote-Espino, D.L., Hernández-Quintero, E., 2018. Karst detection beneath the pyramid of El Castillo, Chichen Itza, Mexico, by non-invasive ERT-3D methods: *Scientific Reports*, 8(1), 15391. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33888-9>
- Chávez-García, F.J., Cárdenas-Soto, M., 2002, The contribution of the built environment to the ‘free-field’ ground motion in Mexico City: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12), 773-780. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00098-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00098-2)
- Chnaid Gamboa, D., 1999, *Cavernas y cenotes de la reserva ecológica Cuxtal. México: Ayuntamiento de Mérida, Dirección de Desarrollo Urbano*, 71 p.
- Di Fiore, V., 2010, Seismic site amplification induced by topographic irregularity: Results of a numerical analysis on 2D synthetic models: *Engineering Geology*, 114(3-4), 109-115. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.006>
- Erosa-Peniche, J.A. (1939). Descubrimiento y Exploración Arqueológica de la Subestructura del Castillo en Chichén Itzá, en *Actas del XXVII Congreso Internacional de Americanistas*, vol. 2, 229-248.
- Galindo-Domínguez, R.E., Bandy, W.L., Mortera-Gutiérrez, C.A., Ortega-Ramírez, J., 2013, Geophysical-archaeological survey in lake Tequesquitengo, Morelos, Mexico: *Geofísica Internacional*, 52(3), 261–275. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71476-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71476-4)
- Glinsky, N., Bertrand, E., Régnier, J., 2019, Numerical simulation of topographical

- and geological site effects. Applications to canonical topographies and Rognes hill, South East France: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 620-636. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.020>
- Hemeda, S., Sonbol, A., 2020, Sustainability problems of the Giza pyramids: *Heritage Science*, 8(1), 1-28. <https://doi.org/10.1186/s40494-020-0356-9>
- Hussain, Y., Cardenas-Soto, M., Moreira, C., Rodriguez-Rebolledo, J., Hamza, O., Prado, R., Martinez-Carvajal, H., Dou, J., 2020, Variation in Rayleigh wave ellipticity as a possible indicator of earthflow mobility: a case study of Sobradinho landslide compared with pile load testing: *Earth Sciences Research Journal*, 24(2), 141-151. <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n2.81974>
- INAH, 2023, Edificio de las Monjas, plano, escala: Sistema Nacional de Fototecas (en línea), disponible en <https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/fotografia%3A316483>, consultado 23 de agosto de 2023.
- Khavroshkin, O., Pavlov, D.G., Tsyplakov, V.V., 2020, Geophysical Fields and Signals of Some Pyramids: *Journal of Anthropological and Archaeological Sciences*, 2(1), 161-165. <https://doi.org/10.32474/JAAS.2020.02.000128>
- Konno, K., Ohmachi T., 1998, Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241. <https://doi.org/10.1785/BSSA0880010228>
- La Rocca, M., Chiappetta, G.D., Gervasi, A., Festa, R.L., 2020, Non-stability of the noise HVSR at sites near or on topographic heights: *Geophysical Journal International*, 222(3), 2162-2171. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa297>
- Lermo, J., Chávez-García, F.J., 1994, Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13(6), 413-423. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(94\)90012-4](https://doi.org/10.1016/0267-7261(94)90012-4)
- López-García, P., Argote-Espino, D.L., Tejero-Andrade, A., Chavez-Segura, R., 2014, Integral geophysical study to characterize archaeological structures in los Teteles de Ocotitla, Mexico (conferencia), en Tykot, R.H. (ed.), *Proceedings of the 38th International Symposium on Archaeometry: Tampa, Florida: Open Journal of Archaeometry*, 2:5305, 77-80. <https://doi.org/10.4081/arc.2014.5305>
- Maresca, R., Guerriero, L., Ruzza, G., Mascellaro, N., Guadagno, F.M., Revellino, P., 2022, Monitoring ambient vibrations in an active landslide: Insights into seasonal material consolidation and resonance directivity: *Journal of Applied Geophysics*, 203, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104705>
- Marquina, I., 1951, ST-02 Arquitectura Prehispánica (volumen I): Instituto Nacional de Antropología e Historia – Secretaría de Educación Pública, 970 p.
- Matsushima, S., Hirokawa, T., De Martin, F., Kawase, H., Sánchez-Sesma, F.J., 2014, The effect of lateral heterogeneity on horizontal-to-vertical spectral ratio of microtremors inferred from observation and synthetics: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(1), 381-393. <https://doi.org/10.1785/0120120321>
- Matsushima, S., Kosaka, H., Kawase, H., 2017, Directionally dependent horizontal-to-vertical spectral ratios of microtremors at Onahama, Fukushima, Japan: *Earth Planets Space* 69, 96. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0680-9>
- Nakamura, Y., 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface: *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1), 25-33.
- Paolucci, R., 2002, Amplification of earthquake ground motion by steep topographic

- irregularities: Earthquake engineering & structural dynamics, 31(10), 1831-1853. <https://doi.org/10.1002/eqe.192>
- Piña-Flores, J., Cárdenas-Soto, M., Sarabia-González, A., García-Jerez, A., Sierra-Álvarez, C.A., Saénz-Castillo, M.A., Luzón, F., Sánchez-Sesma, F.J., 2021, Imaging the structure of the Sun Pyramid (Teotihuacán, Mexico) from passive seismic methods: Engineering Geology, 281, 105969. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105969>
- Rosenfeld, J.H., 2002, El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Belice: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LV(1), 30-37. <https://doi.org/10.18268/BSGM2002v55n1a3>
- Ruppert, K., 1952, Chichen Itza: Architectural Notes and Plans: Carnegie Institution of Washington, 169 p.
- Saleh, S., Saleh, A., El Emam, A.E., Radwan, A.M., Lethy, A., Khalil, H.A., El-Qady, G., 2022, Detection of Archaeological Ruins Using Integrated Geophysical Surveys at the Pyramid of Senusret II, Lahun, Fayoum, Egypt: Pure and Applied Geophysics, 179(5), 1981-1993. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03010-2>
- Shapiro, N.M., Campillo, M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise: Geophysical Research Letters, 31(7), L07614. <https://doi.org/10.1029/2004GL019491>
- Snieder, R., Safak, E., 2006, Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California: Bulletin of the Seismological Society of America, 96(2), 586-598. <https://doi.org/10.1785/0120050109>
- Stierlin, H., 1981, L'art maya: des Olmèques aux Mayas-Toltèques, 212 p.
- Tejero-Andrade, A., Argote-Espino, D.L., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., Chávez, R.E., García-Serrano, A., 2018, 'Illuminating' the interior of Kukulcan's Pyramid, Chichén Itzá, Mexico, by means of a non-conventional ERT geophysical survey: Journal of Archaeological Science, 90, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.12.006>
- Thompson, V.D., Arnold, P.J., and VanDerwarker, A.M., 2009, Geophysical Investigations at Teotepac, Mexico (1000 B.C.–A.D. 1000): Journal of field archaeology, 34(4), 439–455. <https://doi.org/10.1179/009346909791070808>
- Todorovska, M.I., 2009, Seismic interferometry of a soil-structure interaction model with coupled horizontal and rocking response: Bulletin of the Seismological Society of America, 99 (2A), 611-625. <https://doi.org/10.1785/0120080191>
- Wathelet, M., Chatelain, J.L., Cornou, C., Di Giulio, G., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., 2020, Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing: Seismological Research Letters, 91(3), 1878-1889. <https://doi.org/10.1785/0220190360>
- Wynn, J.C., 1986, A review of geophysical methods used in archaeology: Geoarchaeology, 1, 245-257. <https://doi.org/10.1002/gea.3340010302>
- Zogh, P., Motamed, R., Ryan, K., 2021, Empirical evaluation of kinematic soil-structure interaction effects in structures with large footprints and embedment depths: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 149, 106893. <https://doi.org/10.1016/j.soldyn.2021.106893>