

<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria>
www.ucr.ac.cr / ISSN 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2018 - VOLUMEN 28 (2)



Correlación entre la forma de la razón espectral H/V con la estratigrafía del subsuelo en 10 sitios de estudio

Correlation between H/V Spectral Ratio Shape and Subsoil Stratigraphy in 10 Selected Sites

Juan Carlos Fonseca Hidalgo
CODOCSA, Construcción e Infraestructura, Costa Rica
juanc_f92@hotmail.com

Víctor Schmidt Díaz
Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, Costa Rica
victor.schmidt@ucr.ac.cr

Recibido: 11 de diciembre 2017

Aceptado: 21 de marzo 2018

Resumen

Es posible que al aplicar la técnica de la razón espectral para vibraciones ambientales no se logren identificar picos bien definidos que se asocien a contrastes significativos entre el suelo y el basamento. Sin embargo, la forma de este gráfico puede aportar otra información valiosa sobre distintas características del perfil de suelo, como inclinación del basamento, inversión de velocidades de onda cortante entre estratos sucesivos de suelo, homogeneidad de los materiales, etc. Esta investigación pretende correlacionar las formas de los gráficos de las razones espectrales con información geofísica disponible en 10 sitios debidamente caracterizados, tomando en cuenta conclusiones a las que han llegado otros autores. Para lograrlo, se tomaron registros de vibraciones ambientales por medio de un sismógrafo triaxial colocado en cada sitio, y se calculó la razón del promedio de los espectros horizontales entre el vertical. Posteriormente, se correlacionó la forma de este gráfico con la estratigrafía reportada según estudios geotécnicos y se lograron identificar cuatro formas del gráfico: pico definido, pico ancho, doble pico y plano.

Palabras clave:

Razón espectral H/V, suelos, basamento, amplificación, ondas superficiales

Abstract

Once the horizontal to vertical technique is applied to ambient vibrations, it is possible that peaks are not well identified. These peaks are usually associated to significant contrasts between soil and bedrock, and this condition may not be presented in all sites. However, the shape of graphics could give additional valuable information about specific characteristics of the soil profile, such as: slope of the bedrock, inversion of shear velocities between successive soil layers,



homogeneity of materials, etc. This research intends to correlate the shape of the H/V graphics with the available geophysical information for 10 previously characterized sites. Similar studies proposed by other authors are considered. Ambient vibrations were registered using a triaxial seismograph. The ratio of the averaged horizontal to vertical spectra were obtained. These plots were related to the site stratigraphy and four cases were well identified: pointed peak, wide peak, double peak and flat graph.

Keywords:

H/V spectral ratio, soil, bedrock, amplification, surface waves

1. INTRODUCCIÓN

La técnica de la razón espectral H/V es utilizada por investigadores en el área de la geofísica y la ingeniería sísmica para determinar el periodo fundamental de los suelos (Nakamura, 1989). Este es un indicador de los efectos locales de los suelos al ser sometidos a acciones sísmicas. El espectro es considerado una función de transferencia aproximada del medio y su principal ventaja es que se incurre en menores costos que otros métodos de investigación geotécnica como, por ejemplo, las perforaciones. A partir del análisis de las razones espectrales H/V es posible obtener alguna información general de los estratos subyacentes, como la presencia de contrastes fuertes de impedancia en el suelo (Bard, 2004).

A pesar de que la técnica de la razón espectral H/V ha sido ampliamente utilizada por investigadores alrededor del mundo, esta generalmente se aplica en sitios donde la estratigrafía no ha sido caracterizada. Por esta razón aún no se cuenta con una correlación directa entre la forma de la razón H/V y las condiciones geotécnicas en Costa Rica. Algunos autores como Leyton et al. (2013) han establecido relaciones para tipos de geología superficial; sin embargo, aún no se cuenta con una base de datos completa que ayude a los investigadores geotécnicos en la interpretación de curvas H/V. En este trabajo se pretende aplicar la prueba H/V en sitios con características particulares de geología en los cuales se cuenta con una descripción detallada de los estratos, con el fin de encontrar correlaciones entre la estratigrafía superficial y la forma de la razón espectral.

El principal aporte de esta investigación radica en la posibilidad de hacer interpretaciones geológicas a partir de los resultados de la técnica de la razón espectral H/V, si se logra establecer una correlación entre la forma del gráfico con las características y propiedades de los depósitos de suelo. Como el uso de la técnica es bastante amplio y cada vez más común, esto resultaría una herramienta de interpretación geotécnica rápida, sencilla y de bajo costo. Entonces, se busca que una vez obtenida la razón H/V en cada sitio, aún sin datos geotécnicos existentes, se pueda tener una idea aproximada de la estratigrafía en profundidad, en casos como contraste significativo entre estratos, material homogéneo, inclinación del basamento, entre otros.

2. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

2.1 Función de transferencia de un perfil de suelo

Según Kramer (1996), de manera general, una función de transferencia permite expresar un parámetro de respuesta dinámica como aceleración, desplazamiento o velocidad, a partir de un parámetro de entrada. Para su aplicación en el análisis de respuesta dinámica de perfiles de suelo, un registro conocido de desplazamiento del basamento o afloramiento (entrada) se representa como una serie de Fourier, usualmente utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT). Luego, cada término en la serie de Fourier del desplazamiento de entrada se multiplica por la función de transferencia para producir

la serie de Fourier correspondiente al desplazamiento de la superficie del suelo (salida), que puede ser expresada en el dominio del tiempo utilizando la transformada de Fourier inversa (FFT-1). Por lo tanto, la función de transferencia (figura 1) determina la forma en que cada frecuencia en el desplazamiento de la roca es amplificada o desamplificada por el depósito de suelo.

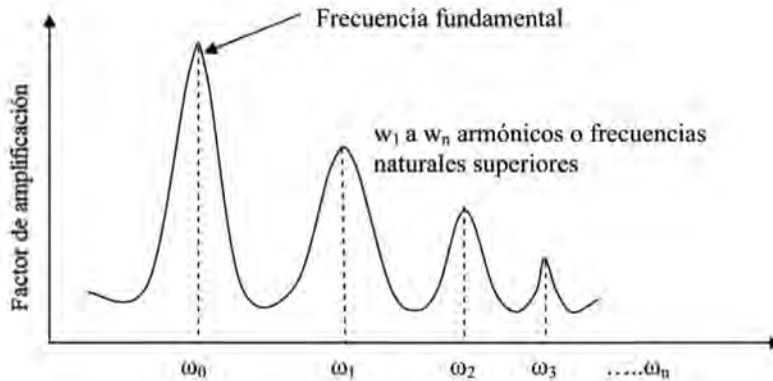


Figura 1. Representación esquemática de la función de transferencia para un suelo de varias ca Fuente: Schmidt, 2010.

2.2 Técnica de la razón espectral H/V

El método empírico propuesto por Nakamura (1989) se denomina actualmente como razón espectral H/V y consiste en tomar el espectro de Fourier de la componente horizontal de un registro y dividirlo por su espectro de Fourier vertical. Al contarse con dos componentes horizontales de movimiento, H suele ser calculado como el promedio de los espectros en el plano horizontal. A esta técnica también se le llama HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) o QTS (Quasi-Transfer Spectra). Permite la obtención del periodo o su inverso, la frecuencia fundamental de un depósito de suelo. Su fundamento teórico parte de que en el basamento el movimiento horizontal y el vertical son similares en magnitud y forma de onda. Conforme estas vibraciones atraviesan el perfil de suelo hacia la superficie, las componentes horizontales son amplificadas por reflexiones múltiples mientras que la componente vertical mantiene su amplitud original.

A pesar de que no se ha llegado a un acuerdo acerca de la validez del sustento teórico del método, los resultados obtenidos a lo largo de los años han demostrado que la técnica funciona de manera experimental. Originalmente, el autor propuso que la técnica era apropiada para determinar el periodo fundamental y su amplificación respectiva. Sin embargo, Lachet & Bard (1994) demostraron que, al ser muy sensible al módulo de Poisson del depósito sedimentario, la amplitud del pico no es representativa de la amplificación.

En esta investigación, el movimiento considerado será el debido a vibraciones ambientales, cuyo origen puede ser antrópico o natural (Bard et al., 2004). Estos autores

suponen que las excitaciones naturales (de origen oceánico y a condiciones atmosféricas) tienen frecuencias en el rango 0,1 Hz a 1 Hz y que el movimiento provocado por actividad humana (con origen en el tráfico vehicular y en la industria) abarca frecuencias altas mayores a la unidad, de 1 a 10 Hz.

En el procesamiento de la prueba H/V siempre se debe verificar tanto la confiabilidad de la curva H/V como la claridad de los picos detectados. En esta investigación se siguieron los criterios propuestos por Bard et al. (2004).

2.3 Equipo y software utilizado

Para las mediciones de vibraciones ambientales, se utilizó un sensor triaxial marca Lennartz modelo LE-3D/20s (sismógrafo) y los datos fueron registrados en un digitalizador de seis canales marca Reftek, modelo SMA.

El software GEOPSY utilizado es de uso libre (www.geopsy.org). Se utilizó la versión 2.9.1. Con él se estimaron las razones espectrales H/V para ventanas de tiempo de 25 segundos. La salida se calculó para un rango de frecuencias entre 0,5 y 25 Hz.

2.4 Elección de sitios de estudio

Primero se realizó una revisión de Vargas et al. (2009) y Vargas (2010) con el fin de seleccionar los 10 sitios que se analizaron y que reúnen las características necesarias para el desarrollo del proyecto. Estos se indican en la tabla 1.

Con estos 10 lugares se abarcaron todos los tipos de sitios de cimentación, de acuerdo a la clasificación del Código Sísmico de Costa Rica (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2010). Fueron clasificados a partir de la velocidad de onda cortante promedio de los 30m superficiales, calculada de acuerdo con la ecuación (1).

$$V_{s(30)} = \frac{30}{\sum(\frac{H_i}{V_{si}})} \quad (1)$$

Donde:

H_i : espesor de cada estrato de suelo “i”, en metros.

V_{si} : velocidad de onda cortante del estrato “i”, en m/s.

$V_{s(30)}$: promedio de velocidades de onda cortante correspondiente a los primeros 30 metros medidos desde la superficie, en m/s.

Tabla 1. Sitios geográficos seleccionados

Sitio	Lugar	$V_{s_{30}}$ (m/s)	Tipo
1	Cerro Chiqueros, Quebrada de Ganado	830	S1
2	Santa Teresita, Zarcero	280	S3
3	Museo Arte Costarricense, San José	502	S2
4	Bulevar, Jacó	246	S3
5	Naciente, San ta Ana	473	S2
6	Alajuela Centro, Alajuela	325	S3
7	Ayala, Cartago	154	S4
8	Barreal, Heredia	434	S2
9	Río Purires, Margen derecha	169	S4
10	Río Purires, Margen izquierda	60	S4

La figura 2a muestra el perfil de suelos del sitio Cerro Chiqueros, Quebrada de Ganado, Puntarenas según Vargas (2010), donde se identifica un cambio entre roca meteorizada y roca más homogénea a los 14 m de profundidad desde la superficie. Sin embargo, entre 0 y 14 m los valores de V_s son bastante variables. En la figura 2b se presenta la razón espectral H/V, donde se observa la definición clara de un pico ancho en 4,25 Hz y otros de menor amplitud en frecuencias bajas.

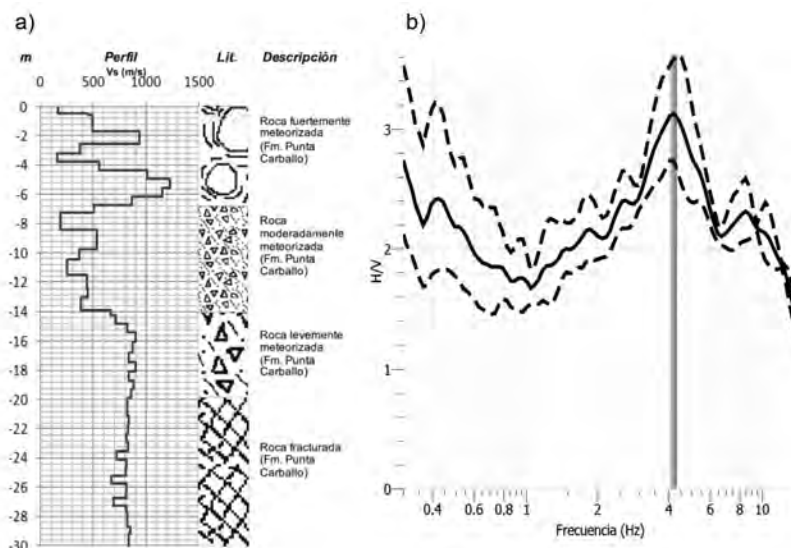


Figura 2. Cerro Chiqueros: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

La figura 3a muestra el perfil de suelos del sitio Santa Teresita, Zarcero, Alajuela según Vargas (2010), donde se observa un contraste claramente definido entre suelo y Toba a los 2,4 m y pocos cambios en Vs a partir de esa profundidad. La figura 3b corresponde a la razón espectral H/V, donde se identifica claramente un doble pico en una frecuencia cercana a 1 Hz y otros de menor amplitud.

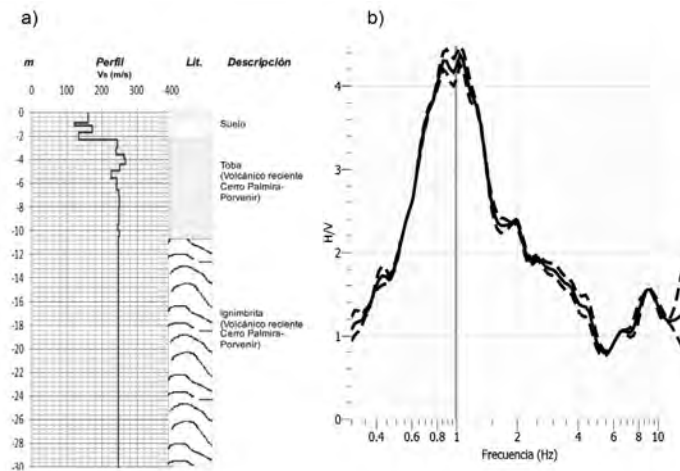


Figura 3. Santa Teresita: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

La figura 4a muestra el perfil de suelos del sitio Museo de Arte Costarricense, San José según Vargas (2010), donde se evidencian contrastes (variaciones grandes en Vs) a 6 m de profundidad entre suelo y lahares. En la figura 4b se observa la razón espectral H/V, donde se evidencia un único pico claramente definido en 2 Hz. Podría existir un contraste más profundo de los 30 m que justifique esta frecuencia tan bien definida.

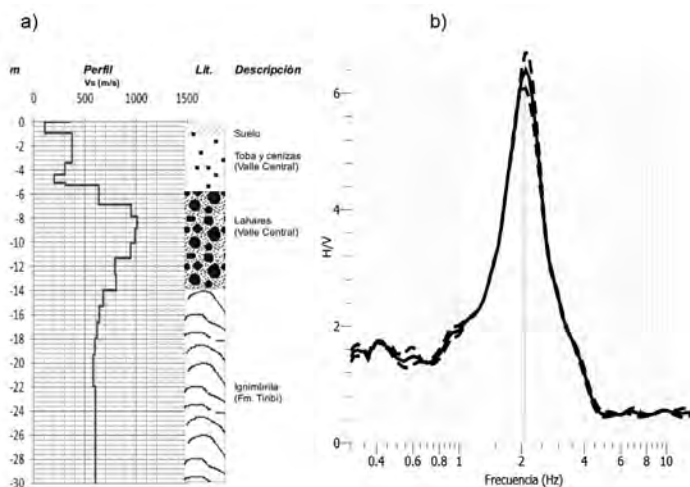


Figura 4. Museo de Arte Costarricense: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

El perfil de onda cortante correspondiente al sitio Jacó se muestra en la figura 5a, según Vargas (2010). Se observan capas de arena con diferentes densidades intercaladas por una capa de limo arcilloso. Hay un contraste entre suelo y arena a los 2 m de profundidad; luego aparecen otros materiales con Vs aproximadas constantes. La figura 5b corresponde a la razón espectral H/V, donde se observa un único pico en una frecuencia correspondiente a 1,75 Hz.

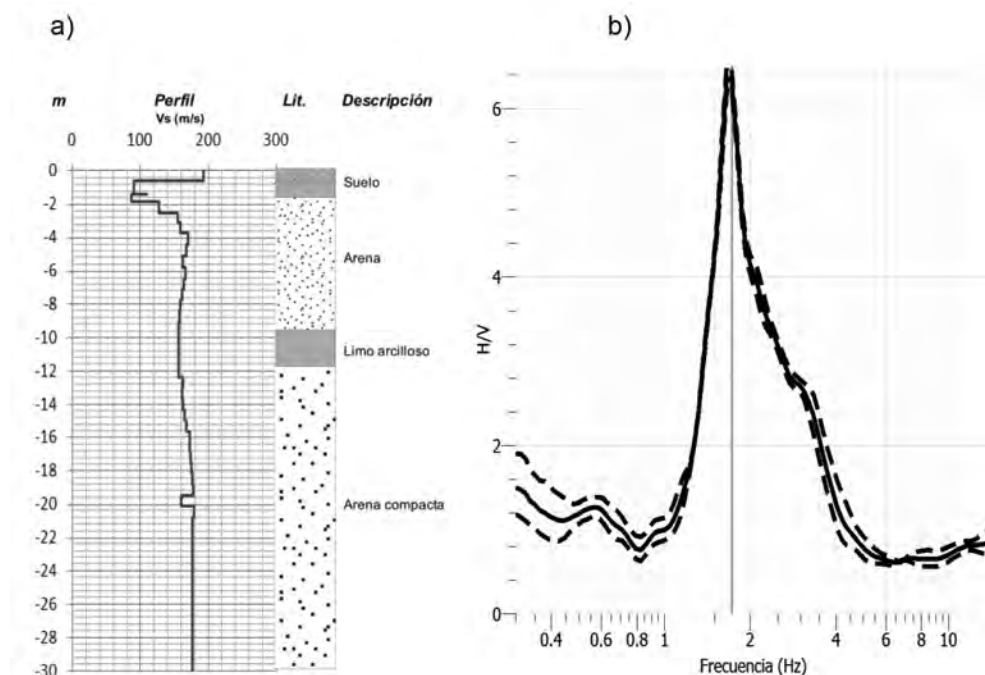


Figura 5. Bulevar, Jacó: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

La figura 6a muestra el perfil de suelos del sitio de Naciente, Santa Ana, San José según Vargas (2010), donde aparecen variaciones en la Vs respecto a la profundidad. A los 4 m de profundidad, se observa una inversión de velocidades entre el conglomerado meteorizado y la lutita alterada. El cambio de velocidades principal se identifica a los 11 m, entre la arenisca media y el conglomerado sano. La figura 6b presenta la razón espectral H/V, donde se observan varios picos y uno predominante en 3,10 Hz. Esta es una forma de H/V más irregular que las mostradas en los sitios anteriores.

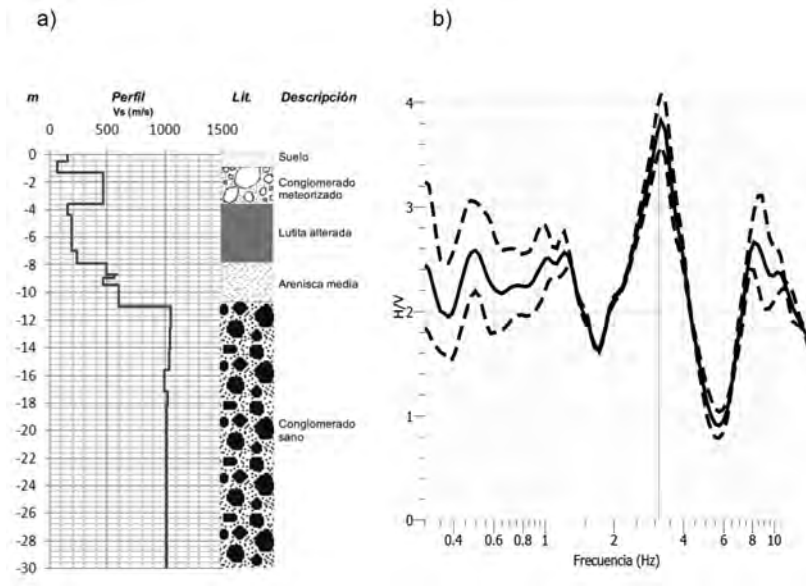


Figura 6. Naciente, Santa Ana: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

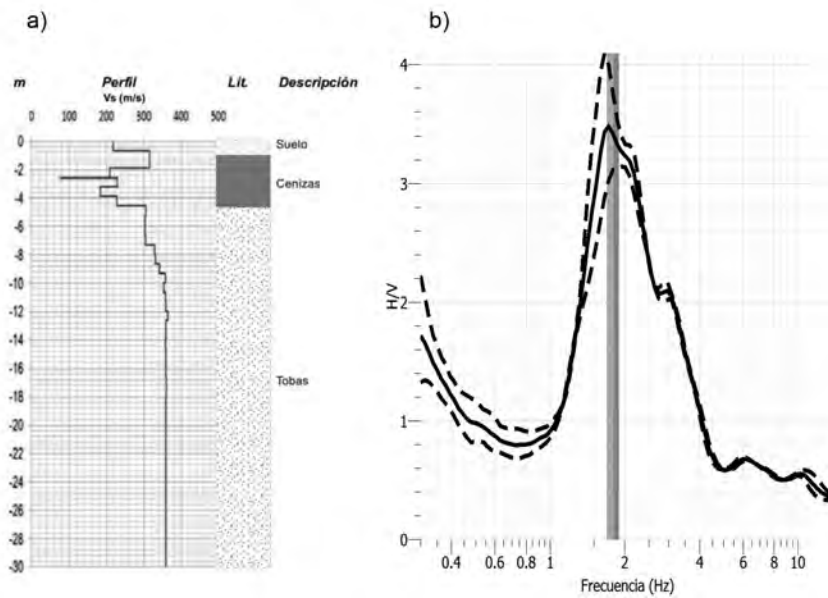


Figura 7. Alajuela Centro: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

La figura 7a muestra el perfil de suelos del sitio de Alajuela Centro según Vargas (2010), donde el cambio principal de Vs se a los 4,5 m, entre cenizas y Tobas. La capa de suelo existente tiene muy poco espesor. La figura 7b presenta la razón espectral H/V, donde se observa un único pico claramente definido en 1,75 Hz.

La figura 8a muestra el perfil de suelos del sitio Ayala, Cartago según Vargas (2010), con una gran variación de V_s dentro del perfil e inversión de velocidades (paso de una velocidad mayor a una menor a mayor profundidad), así como muchos cambios de material y la presencia de uno muy blando (arcillas) a los 23 metros. La figura 8b contiene la razón espectral H/V, donde se observa una forma muy irregular del gráfico y ningún pico que claramente sobresalga de los demás.

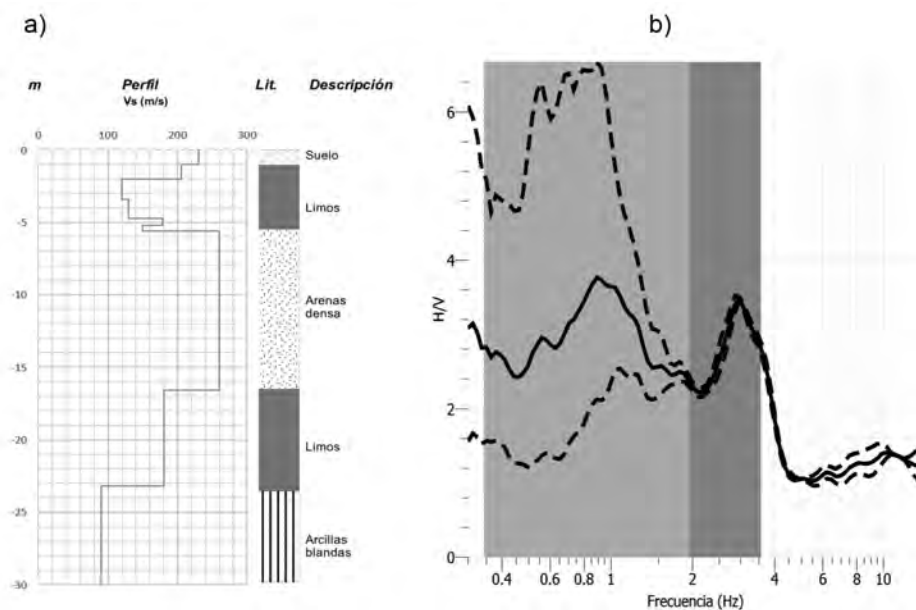


Figura 8. Ayala, Cartago: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

La figura 9a muestra el perfil de suelos del sitio Barreal, Heredia según Vargas (2010). Se observa un contraste importante entre cenizas e ignimbritas a los 6 m de profundidad. Sin embargo, en la figura 9b correspondiente a la razón espectral H/V no se observa la clara definición de ningún pico y más bien niveles de amplitud menores que 2 en todo el rango de frecuencias. Esto puede deberse a la no horizontalidad del basamento, donde suelen aparecer picos anchos.

El último sitio analizado comprende a ambas márgenes del río Purires, a la altura del puente que une a las comunidades de Tobosi y Barrancas, en el cantón de El Guarco. Las figuras 10a y 10b muestran el perfil de suelos del sitio según Coto & Vargas (2010). En ambos márgenes se observa una variación significativa de V_s respecto a la profundidad. Sin embargo, las figuras 10c y 10d presentan las razones espectrales H/V, donde se identifican curvas con picos bien definidos en 1,75 Hz y 2,5 Hz, para la margen izquierda y derecha, respectivamente.

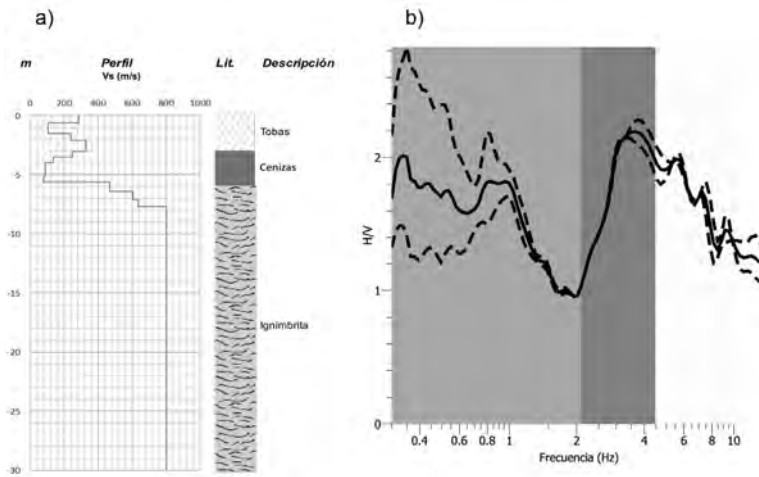


Figura 9. Barreal, Heredia: (a) Perfil de suelos en el sitio (Vargas, 2010). (b) Razón espectral H/V.

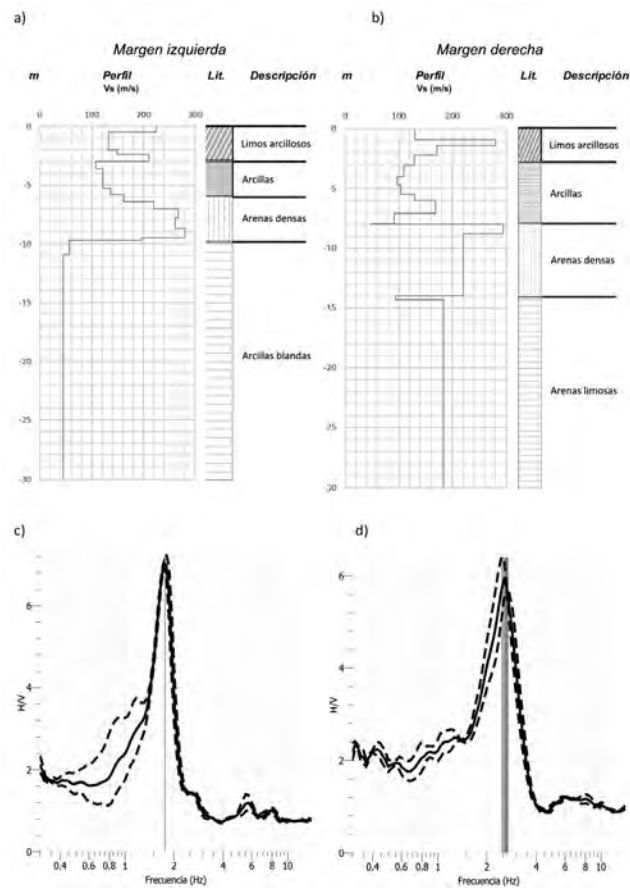


Figura 10. Río Purires, Tobosí, Cartago: (a) Perfil de suelos en el sitio, margen izquierda (Coto & Vargas, 2010). (b) Perfil de suelos en el sitio, margen derecha (Coto & Vargas, 2010). (c) Razón espectral H/V, margen izquierda. (d) Razón espectral H/V, margen derecha.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de resumir los resultados obtenidos, se dividieron los sitios en cuatro grupos de acuerdo con su forma espectral particular.

3.1 Picos anchos

Picos anchos como los observados en Santa Teresita, Alajuela, Pozos y Cerro Chiqueros sugieren grandes variaciones laterales de la estratigrafía o un basamento con una pendiente considerable. A manera de ejemplo, se presenta una curva H/V con pico ancho en la Fig.11 correspondiente a Santa Teresita, Zarcero. Bonnefoy-Claudet et al. (2009) menciona que picos con ancho de banda amplio podrían estar relacionados con la dispersión de las ondas de cuerpo generada cerca del borde de la pendiente del basamento. Como todos los sitios mencionados se encuentran en lugares con variaciones topográficas fuertes se puede afirmar que la inclinación del basamento provoca un ensanchamiento del pico y en ciertas ocasiones picos múltiples.

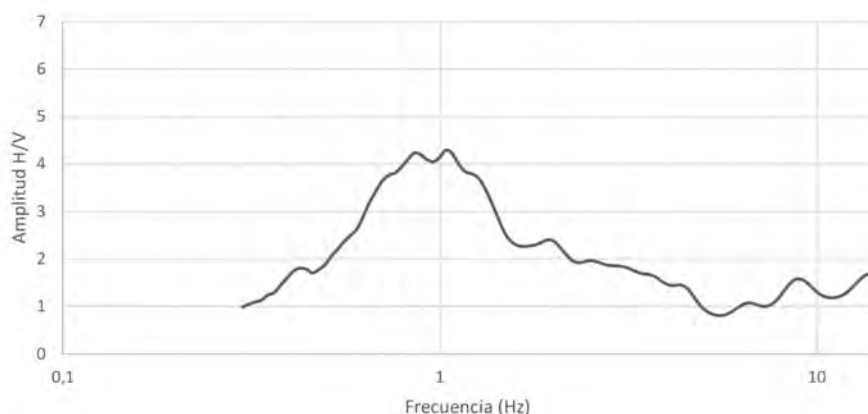


Figura 11. Ejemplo de curva H/V con pico ancho, correspondiente a Santa Teresita, Zarcero.

Uebayashi (2003) describe que la razón espectral H/V obtenida a partir de micro-tremores es fuertemente afectada por la forma de la interfaz suelo-basamento cerca de regiones con estructura subterránea irregular, pero no en sitios muy alejados.

En caso de que en futuros ensayos H/V se obtenga una curva con un pico ancho, se recomienda realizar pruebas adicionales en los alrededores de la zona, para detectar si hay variaciones significativas de un sitio a otro y si el pico hallado se encuentra dentro del rango de frecuencias del pico ancho. Si estas condiciones se cumplen, Bard (2004) afirma que hay grandes posibilidades de que la estructura subterránea del sitio en estudio sufra variaciones laterales significativas, lo que puede conducir a efectos 2D o 3D.

3.2 Picos definidos

Un pico claro de gran amplitud está relacionado a un contraste fuerte de impedancia entre la cubierta sedimentaria y el basamento. Una razón H/V que describe un único pico claro se muestra en la figura 12 y corresponde al Museo de Arte Costarricense. En Bard (2004) se menciona que si el primer pico es claro y no es de origen industrial, hay cierta certeza de que el sitio en estudio presenta un contraste de impedancias de al menos 4 y que es muy probable que amplifique el movimiento sísmico.

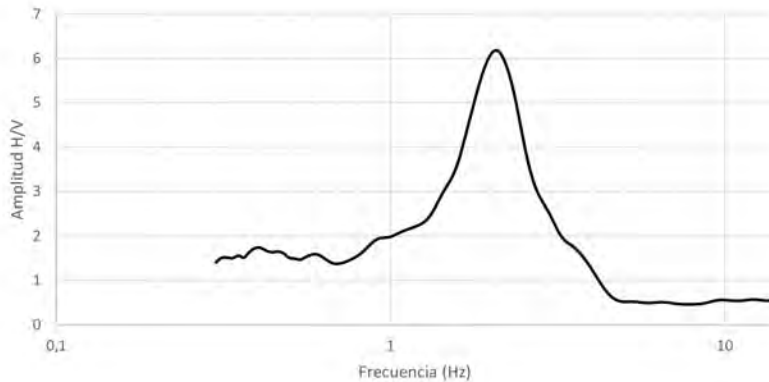


Figura 12. Ejemplo de curva H/V con pico definido correspondiente al Museo de Arte Costarricense.

Dentro de esta categoría coinciden los sitios de Jacó, Museo de Arte Costarricense y ambas márgenes del río Purires. Todos estos lugares se caracterizan por tener amplitudes superiores a 6 y cumplir con los requisitos de pico claro de Bard (2004). En el sitio Jacó el contraste fuerte no se presenta en el perfil de velocidad de Vargas (2010). Esto se puede deber a que se tiene la limitación de que la prueba SASW no es confiable más allá de los 20 m de profundidad cuando se utiliza como fuente de excitación un golpe de mazo, como fue el caso de la prueba disponible. Es posible que la energía del impacto no haya sido la suficiente para alcanzar el contraste principal.

A pesar de esto, las diversas descripciones geológicas sí indican la presencia de roca del Complejo Nicoya, que provoca el contraste principal del perfil.

En el caso de Museo de Arte Costarricense, como indica Schmidt (2014), el contraste principal se encuentra bajo los 30 m de profundidad por lo que fue necesario utilizar un perfil de velocidad obtenido a partir de la metodología de F-K, que tiene mayor resolución en profundidad. Cabe destacar que como este método utiliza una cantidad limitada de capas equivalentes, este perfil no se asemeja totalmente al obtenido por Vargas (2010). Sin embargo, respecto al promedio de velocidades, ambos perfiles son semejantes.

En río Purires margen derecha se concluyó que el contraste principal es somero y es provocado por la interfaz arcillas-arenas densas a los 8 metros de profundidad. Por el contrario, en la margen izquierda no se pudo obtener una conclusión certera

debido a que la descripción litológica difiere respecto a la de la derecha, a partir de los 8 metros (figuras 10a y 10b). Una explicación es que ambos sitios presentan una condición similar con el contraste principal a los ≈ 8 m y esto provoca que las razones H/V de ambos márgenes sean semejantes. Se recomienda realizar un perfil de velocidades con un método de mayor resolución para obtener la columna de suelo completa hasta el basamento, utilizando una técnica geofísica que permita alcanzar mayores profundidades.

3.3 Curva H/V plana

Una curva H/V plana, con amplitudes que no superan un valor de dos, puede indicar que el subsuelo contiene roca poco o no meteorizada. Tal es el caso del sitio de Barreal de Heredia (figura 13), en donde se tienen ignimbritas con una velocidad de onda cortante de 800 m/s a 6 metros de profundidad. Para futuras investigaciones que utilicen la prueba H/V se recomienda que si se obtiene una curva H/V plana se verifique que se trata de un sitio rocoso, esto en vista de que si corresponde a un sitio con depósitos de suelo, la curva plana puede indicar un medio homogéneo y no presentarse ningún pico. Como complemento a la prueba H/V, se podría obtener el parámetro Vs30 con el fin de clasificar el sitio de acuerdo al Código Sísmico de Costa Rica. Con base en esta información se podría diferenciar entre un sitio rocoso y un medio con ausencia de contraste entre estratos. En ambos casos se observarían razones espectrales muy planas pero debido a causas distintas.

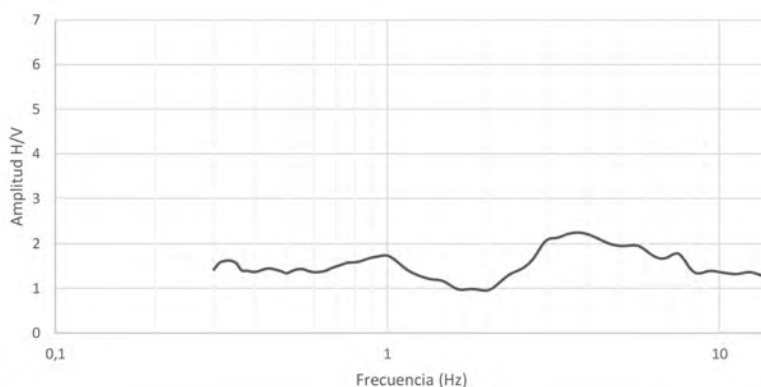


Figura 13. Ejemplo de curva H/V plana, correspondiente a Barreal de Heredia.

3.4 Inversión de velocidad de onda cortante

Los sitios que presentan una inversión de velocidades generan razones H/V de las cuales no se puede obtener mucha información confiable. Un sitio que presentó este fenómeno fue Ayala, que al tener arcillas blandas en profundidad hay varias inversiones de velocidad. No se recomienda aplicar la prueba H/V en sitios donde exista este fenómeno; en su lugar es recomendable aplicar otros métodos de investigación que suministren información más confiable sobre la estructura del subsuelo.

Una manera de identificar un sitio con inversión de velocidad basándose en la curva H/V obtenida, es analizar la forma y la amplitud de la razón H/V. Una curva irregular, con múltiples picos y con una amplitud mayor que 2 a lo largo de una amplia gama de frecuencias es un indicador de que en la columna de suelo puede haber inversiones de velocidad. Para ilustrar se presenta la curva H/V obtenida en sitio Ayala en la figura 14.

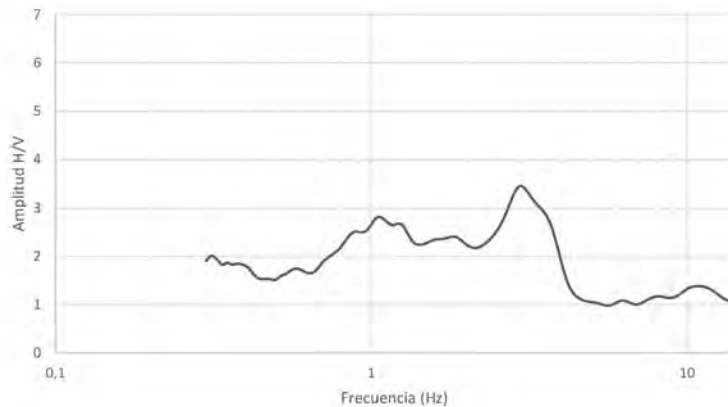


Figura 14. Ejemplo de curva H/V en sitio con inversión de velocidad, correspondiente al Campo Ayala, Cartago.

3.5 Verificación de correlaciones existentes

En este apartado se comprueban las relaciones entre la razón H/V y la geología propuestas por Leyton et al. (2013).

La primera relación establece que un pico de poca amplitud de la razón H/V está relacionado a un contraste menor, indicando la presencia de suelo duro. Los sitios de Cerro Chiqueros y Naciente obedecen a esta relación pues tienen amplitudes menores que cuatro y al ser sitios de roca meteorizada presentan suelos con velocidades de onda cortante superiores a los 400 m/s.

Luego, Leyton et al. (2013) describe a los picos provenientes de depósitos de ceniza volcánica con frecuencias resonantes entre 2,0 y 6,5 Hz y con amplitudes desde 2-3 hasta >5. Los sitios que presentan estas características son Santa Teresita, Alajuela, Museo de Arte Costarricense y Barreal. De manera general, las curvas de los lugares mencionados cumplen con esta descripción; sin embargo, el sitio de Santa Teresita no cumple con el rango de frecuencias. Hay que indicar que la frecuencia fundamental de este sitio no es confiable pues Bonnefoy-Claudet et al. (2009) recomienda no inferirla a partir de una curva de “pico ancho” sin tener simultáneamente datos de sismo.

Leyton et al. (2013) establece una diferencia en la forma de la curva H/V de acuerdo con el tamaño del grano del suelo. Para suelos de grano fino se menciona que las razones espectrales están caracterizadas por frecuencias fundamentales que van desde 0,3 a 6,5 Hz. Por otra parte se señala que las curvas provenientes de suelos de grano grueso poseen frecuencias naturales mayores a 6,5 Hz y curvas planas. En todas las pruebas

de esta investigación se obtuvieron frecuencias fundamentales en el rango 1 Hz-4 Hz. Bajo la clasificación propuesta por el autor, en todos los sitios predominarían suelos de grano fino. Sin embargo, se tienen sitios con una estratigrafía compuesta de grano grueso (Quebrada de Ganado, Pozos, Barreal), por lo que no se cumple la correlación propuesta.

Finalmente, el estudio de Leyton et al. (2013) describe la curva de los depósitos de material grueso aluviales-distales con picos de gran amplitud (>3), con frecuencias fundamentales menores que 6,5 Hz. La razón H/V del sitio Jacó, que se encuentra en una planicie aluvial, cumple con las características descritas pues se obtuvo una amplitud de 6,36 y una frecuencia fundamental de 1,72 Hz.

Se concluye que para poder aplicar correlaciones propuestas por otras investigaciones es necesario tener información adicional sobre la profundidad del basamento, pues es posible que las variaciones en la frecuencia fundamental no sean producto de la geología superficial, sino debidas a cambios en la profundidad del contraste principal (basamento), que las ondas superficiales no logran identificar.

En la figura 15 se presenta un resumen de los cuatro tipos de curvas halladas asociadas a la condición específica del sitio.

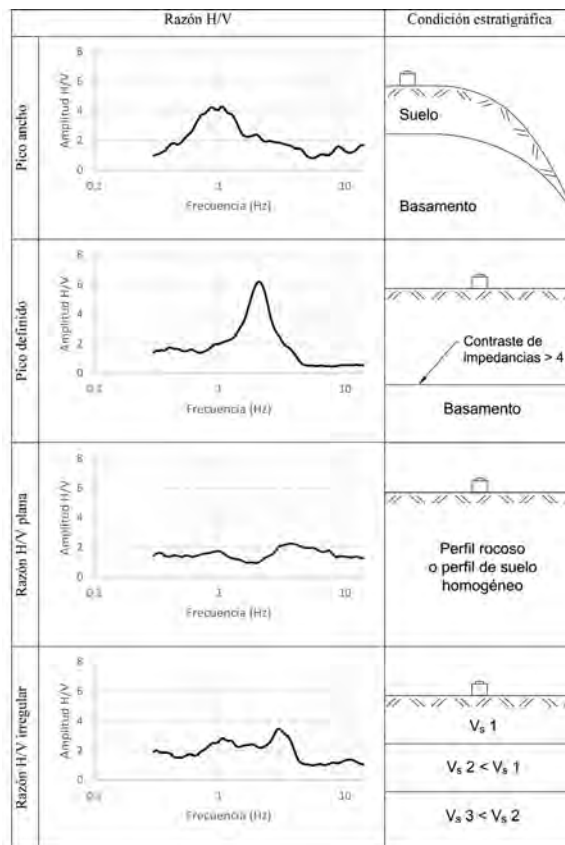


Figura 15. Resumen de correlaciones halladas

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una curva H/V con un pico ancho, que se extiende a lo largo de un amplio ancho de banda, sugiere la presencia de irregularidades laterales de la estratigrafía o un basamento con una inclinación. Este ensanchamiento es provocado por la dispersión de las ondas entrantes. A raíz de esto se recomienda aplicar la técnica H/V en zonas alejadas de montañas y pendientes pronunciadas, pues una topografía superficial quebrada puede indicar un basamento inclinado.

Si el espectro H/V describe un pico claro de gran amplitud que cumple con los criterios de claridad y confiabilidad de Bard (2004), se puede afirmar que existe un contraste de impedancia de al menos 4 en alguna de las interfaces entre capas del subsuelo.

Una curva H/V plana, con amplitudes que no superan un valor de dos, indican una estratigrafía homogénea en el subsuelo. Para diferenciar un perfil de suelo homogéneo de un perfil rocoso se recomienda clasificar el sitio de acuerdo al Código Sísmico de Costa Rica: si se obtiene un sitio tipo S1, o inclusive S2, se puede afirmar que se trata de un sitio rocoso. En caso contrario, un sitio S3 o S4 sugiere un perfil de suelo homogéneo sin contrastes importantes entre estratos, lo que puede generar también una curva H/V casi horizontal.

Una curva irregular, con múltiples picos y con una amplitud mayor que 2 a lo largo de un amplio rango de frecuencias es un indicador de que el sitio puede presentar inversiones de velocidad en profundidad. Un análisis con el método H/V en este tipo de sitios se dificulta, por lo que se recomienda aplicar otros métodos de investigación geofísica.

De las cuatro formas de curvas encontradas, únicamente se tiene certeza de los resultados de las curvas con pico claro y de las curvas con pico ancho. Las razones H/V con forma plana o irregular únicamente se hallaron en un sitio en cada caso, por lo que se recomienda realizar pruebas en sitios con condiciones similares para reforzar los hallazgos encontrados. Sin embargo, estas formas coinciden condiciones semejantes halladas por otros autores.

Se propone que se incluya la prueba H/V como un método de clasificación de sitios en el Código Sísmico de Costa Rica. Su implementación estará condicionada a sitios en los que se pueda obtener una frecuencia fundamental confiable.

Se aconseja únicamente inferir la frecuencia fundamental del sitio en caso de que se obtenga una forma de pico claro en la razón H/V. En caso de que la prueba describa una curva con pico ancho se debe analizar la forma del espectro. Si hay multiplicidad de picos no se recomienda inferir la frecuencia natural. Por el contrario, si es una única cúspide, sí se puede inferir, siempre que se verifique la estabilidad del pico con pruebas en la zona circundante. En caso de que existan variaciones significativas de este pico entre mediciones cercanas, sería un indicador de la presencia de una inclinación del basamento.

Para futuras investigaciones se recomienda que se utilicen perfiles de velocidad de onda cortante a partir de métodos con una mejor resolución en profundidad, pues esta parte profunda podría incluir materiales que caractericen la amplificación del sitio. Se recomienda utilizar la técnica MASW con una fuente de excitación mecánica, tal como

un agitador electromecánico o una excavadora que permita que las ondas generadas alcancen estratos más profundos y llegar en forma más confiable hasta el basamento.

REFERENCIAS

- Bard, P. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration measurements, processing and interpretation*. Francia: Sesame European research project.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L.F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P. & Verdugo, R. (2009). Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical. J. Int.*, 176(3-1), 925–937.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Coto, M. & Vargas L. Á. (2010). *Reporte geotécnico: proyecto puente sobre el río Purires*. San José, Costa Rica: MyV Soluciones Geotécnicas.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice-Hall. New Jersey.
- Lachet, C. & Bard, P.Y. (1994) Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique. *J. Phys. Earth*, (42), 377-397.
- Leyton, F., Ruiz, S., Sepúlveda, S.A., Contreras, J. P., Rebolledo, S. & Astroza, M. (2013). Microtremors' HVRS and its correlation with surface geology and damage observed after the 2010 Maule earthquake (Mw 8.8) at Talca and Curicó, Central Chile. *Engineering Geology*, 161, 26-33.
- Nakamura, Y. (1989). A method of dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quart. Rep. Railways Tech. Res. Inst*, 30, 25-33.
- Schmidt, V. (2010). *Avances para estudios de riesgo sísmico a escala regional y local: aplicación a America Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España)*. [Tesis de graduación para optar por el posgrado de Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural]. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica, Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Uebayashi, H. (2003). Extrapolation of irregular subsurface structures using the horizontal-to-vertical spectral ratio of long-period microtremors. *Bull. Sesism. Soc. Am.*, 93(2), 570-582.
- Vargas, C.A. (2010). Determinación de parámetros dinámicos de suelos para el diseño de infraestructura en Costa Rica. *Congreso CIC – 2010*.
- Vargas, C.A., Vargas, L.A & Coto, M. T (2009). Análisis espectral de ondas superficiales: Aplicación efectiva para la caracterización geológica de ocho sitios distintos de cimentación en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (41), 37-54.