

Periodo fundamental y clasificación de sitios en el cantón Central de San José (Costa Rica) usando la técnica H/V

Fundamental period and site classification in San José (Costa Rica) using H/V technique

Víctor Schmidt-Díaz^{1*}  y Luis C. Esquivel-Salas² 

¹Universidad de Costa Rica (UCR), Instituto de Investigaciones en Ingeniería (IINI), San José, Costa Rica

²Universidad de Costa Rica (UCR), Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), San José, Costa Rica

*Autor para contacto: victor.schmidt@ucr.ac.cr

(Recibido: 20/11/2022; aceptado: 15/03/2023)

RESUMEN: En esta investigación se identificó el periodo fundamental del suelo (T_f) en 185 sitios ubicados en el Cantón Central de San José (CCSJ) utilizando la técnica de razón espectral H/V. Los periodos fundamentales fueron obtenidos a partir de mediciones en cada sitio. En cerca del 85 % de los sitios donde se aplicó el método H/V se logró una identificación clara del periodo fundamental, que corresponde al pico de mayor amplitud en el gráfico de H/V. Al presentarse los resultados de T_f en mapas, se observan claramente 3 zonas, donde los periodos promedio para la zona 1 son de 0.5 s con valores extremos de 0.1 a 0.9 s, para la zona 2 inferiores a 0.3 s y para la zona 3 variables, entre 0.1 y 0.4 s. El periodo fundamental medido máximo se ubica como un punto aislado en el sector suroeste del distrito de Mata Redonda y tiene un valor superior a 0.8 s. Se estimó el parámetro V_{s30} y se clasificó el sitio según el Código Sísmico de Costa Rica, ambos a partir de correlaciones establecidas según Pinzón et al. (2021).

Palabras clave: periodo fundamental del suelo; V_{s30} ; clasificación de sitios; Código Sísmico; San José.

ABSTRACT: In this work, the fundamental period of the soil (T_f) was identified in 185 sites located in the Central Canton of San José (CCSJ), by using the H/V spectral ratio. The fundamental periods were obtained from measurements at each site. About 85 % of the sites where the H/V method was applied allowed a clear identification of the fundamental period, which corresponds to the peak of the highest amplitude in the H/V graph. When presenting the results of T_f in maps, 3 zones are clearly observed, where the periods are on average 0.5 s with extreme values of 0.1 to 0.9 s for zone 1, less than 0.3 s for zone 2 and variable between 0.1 and 0.4 s for zone 3. The highest measured fundamental period is located as an isolated point in the southwestern sector of the Mata Redonda district and has a value greater than 0.8 s. Both the soil classification and the V_{s30} parameter were estimated from correlations established by Pinzón et al. (2021).

Keywords: soil fundamental period; V_{s30} ; site classification; San Jose.



Introducción

Clasificar adecuadamente el tipo de suelo en un sitio es sumamente importante para varios usos como: definir las condiciones de cimentación de una obra civil, determinar los efectos locales o amplificación de las ondas sísmicas en un sitio en particular, generar espectros de diseño y mapas de microzonificación sísmica, entre otros.

En Costa Rica no existen métodos sistemáticos que se apliquen de manera generalizada para clasificar sitios según el tipo de suelo y menos aún para definir mapas en una escala adecuada, que permitan identificar regionalmente sus principales parámetros dinámicos, como por ejemplo el periodo fundamental (T_f). Por esta razón es que se plantea esta investigación, en la zona definida como el Cantón Central de San José (CCSJ), el cual tiene un área aproximada de 45 km², formado por 11 distritos y 196 barrios (Municipalidad de San José, 2016).

Se escogió dicha zona ya que es una de las más densamente poblada del país, con 288 054 habitantes según el último Censo Nacional de Población (INEC, 2013), y en ella se concentra gran cantidad de bienes y servicios, por lo que se constituye como el núcleo central del país y su zona de mayor desarrollo. Esto hace necesario conocer y clasificar los tipos de sitios que predominan desde el punto de vista de dinámica de suelos, de manera que se generen insumos que permitan hacer diseños de obras civiles sismorresistentes cada vez más eficientes.

Para lograr dicha clasificación, se aplicó la técnica de H/V siguiendo los criterios propuestos por Bard (1999, 2004) en 185 puntos contenidos dentro del CCSJ, de manera que los resultados sean lo más representativos posible.

Con la aplicación de la técnica H/V se identifica el periodo fundamental del suelo en cada punto y se elaboran mapas con esta información, los cuales muestran tanto los valores puntuales como la interpolación entre ellos, de manera que se visualicen las variaciones del parámetro estudiado.

Con base en criterios definidos por Pinzón et al. (2021) y el Código Sísmico de Costa Rica 2014 (CSCR-2014) (CFIA, 2014), se lleva a cabo la clasificación del suelo en cada sitio de estudio, considerando el parámetro V_{s30} , que se define como el promedio de velocidades de onda cortante de los estratos de suelo identificados desde la superficie hasta 30 metros de profundidad. Estos resultados también se muestran en forma de mapas.

Los datos se obtuvieron según una campaña de medición realizada durante el primer semestre de 2020 por el personal del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica, con el uso de sismógrafos, tal y como se detalla más adelante.

Metodología

Descripción de la técnica H/V

Propuesto por Nakamura (1989), el método H/V ha probado ser útil para la identificación del periodo fundamental de depósitos de suelo (T_f), que se define de la siguiente manera, para varios estratos de espesor H_i :

$$T_f = 4 * (\sum H_i / V_{si}) \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo T_f el periodo fundamental del sitio, H_i el espesor de cada estrato de suelo hasta alcanzar el basamento o un suelo semejante a S1 según el CSCR-2014 (CFIA, 2014) al y la V_{si} la velocidad de onda cortante asociada a cada estrato.

La definición indica que tanto el espesor h y como la velocidad de onda cortante V_s , son los principales factores determinantes del periodo fundamental. Por separado, ninguno es suficiente para definir este parámetro.

Es recomendable que existan estudios previos como sondeos geotécnicos y geofísicos, de manera que los resultados puedan ser comparados aplicando otros procedimientos, debido a que la técnica H/V no siempre produce resultados confiables por diversas razones como: ausencia de contraste significativo de impedancias entre estratos consecutivos, falta de horizontalidad de los estratos, débiles fuentes de ruido, entre otros (Schmidt-Díaz, 2010).

La técnica consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontales y de la vertical de registros de vibraciones ambientales, obtenidos con un velocímetro o un acelerógrafo triaxial. A partir de ellos se obtiene la

razón H/V (cociente espectral), que es considerado por Nakamura (1989) como la función de transferencia aproximada de los estratos del suelo presentes sobre el basamento. Al contarse con dos componentes horizontales, H suele ser calculado como el promedio de los espectros en el plano horizontal.

Desde el punto de vista de justificación, el método H/V parte de que las vibraciones ambientales están compuestas por varios tipos de ondas y considera que estas son similares horizontal y verticalmente en el basamento. Las vibraciones son amplificadas por las distintas capas del suelo, sufriendo las componentes horizontales multirreflexiones de la onda S, por lo que se ven amplificadas mientras que la componente vertical sufre un fenómeno semejante, pero para la onda P. Una mayor descripción de este proceso de propagación puede encontrarse en Schmidt-Díaz (2010).

La función de transferencia de los estratos superficiales es:

$$S_T = S_{HS} / S_{HB} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

S_{HS} : espectro de Fourier de las vibraciones horizontales en superficie.

S_{HB} : espectro de Fourier de las vibraciones horizontales en la base.

Nakamura (1989) asume que el movimiento vertical no se ve amplificado por las capas superficiales. Propone el siguiente término para representar el efecto de las ondas Rayleigh en las vibraciones verticales:

$$E_S = S_{VS} / S_{VB} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

S_{VS} : espectro de Fourier de las vibraciones verticales en superficie

S_{VB} : espectro de Fourier de las vibraciones verticales en la base

Entonces, las premisas del método son:

1- Se tienen en cuenta los efectos de las ondas Rayleigh.

2- Los efectos de las ondas Rayleigh son iguales en la componente horizontal y en la vertical. De ahí se establece STT como una función de transferencia más confiable.

$$S_{TT} = S_T / E_S = R_S / R_B \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

R_S representa la división de los espectros H y V en superficie (S).

R_B representa la división de los espectros H y V en el basamento (B).

R_B es aproximadamente igual a la unidad para un rango amplio de frecuencias, cosa que se puede probar a partir de registros obtenidos en el basamento.

Siendo así, $S_{TT} = R_S = S_{HS} / S_{VS}$ representa la función de transferencia buscada. Esto significa que el movimiento vertical en superficie (S_{VS}) contiene las características del movimiento horizontal en el basamento (S_{HB}).

3- Como S_{HB} / S_{VB} es aproximadamente igual a la unidad, S_{TT} se obtiene de la razón espectral entre la componente horizontal y la vertical en superficie.

Muchos autores sostienen que el método está basado en algunas suposiciones y que requiere comprobaciones de campo. Por ejemplo, Kudo (1995) plantea que la segunda premisa no es válida porque la composición de las vibraciones no puede ser expresada como una convolución de ondas internas y superficiales, sino que son generalmente una suma de estos dos tipos de ondas; entonces S_T / E_S no genera ninguna compensación de ondas Rayleigh.

La tercera suposición es únicamente válida si en las vibraciones ambientales predominan ondas Rayleigh y su elipticidad es casi vertical, pero generalmente esto sucede en medios estratificados donde hay un contraste significativo entre las impedancias del medio estratificado y del basamento; por lo tanto, es una hipótesis no siempre válida. En resumen, a pesar de la ausencia de justificaciones teóricas convincentes, la técnica funciona de manera experimental y su uso es muy extendido alrededor del mundo.

Equipo utilizado

Se utilizó un digitalizador marca Sara, modelo SL06 de tres canales con un consumo de potencia de 3 W y que además permite el uso de diferentes servicios de internet como TCP/IP, HTTP, TELNET, FTP and SMTP. La comunicación con software sísmico se hace a través de Linux OS, en formatos Miniseed y SeedLink. Tiene además su propia antena de GPS, lo que permite geo-referenciar tanto los registros, como asignar el tiempo UTC a cada muestra tomada en cada instante de tiempo. Se le conecta un sismógrafo marca Lennartz modelo LE-3D/20 triaxial, para realizar las mediciones en cada sitio. La figura 1 muestra los equipos interconectados. El sensor se coloca dentro de una caja plástica para evitar el efecto de las ráfagas de viento excesivas, que pudiesen alterar el registro de las vibraciones ambientales.

Campaña de medición

La gran mayoría de las mediciones fueron realizadas de enero a junio de 2020, con significativos retrasos debido a la pandemia mundial como consecuencia del virus Sars-Cov-2. El criterio de selección de los sitios de medición es del tipo político-administrativo. Las mediciones se llevaron a cabo en los centroides de 185 barrios (o en la proximidad de estos), del total de 196 que conforman el CCSJ. Los sensores se colocaron sobre una losa de concreto rígida, como por ejemplo una acera. Cada una tuvo una duración entre los 12 y 15 min ininterrumpidos.

Con la finalidad de garantizar la calidad de los datos, se repitieron las mediciones para los casos de vibraciones excesivas externas, tales como el paso de un camión pesado. Además, se tuvo la precaución de colocar la instrumentación lejos de posibles fuentes de vibración que pudieran afectar la señal, como raíces de árboles, tuberías o válvulas del sistema de alcantarillado público. Finalmente, se colocaron conos cerca del equipo para hacer aún más visible el espacio de trabajo y de esta manera evitar que los transeúntes golpearan o movieran los equipos, según se muestra en la figura 2.

La figura 3 muestra los centroides de los 196 barrios del cantón de San José. Se destacaron en rojo los 185 puntos donde se pudo realizar al menos una medición de H/V, en azul se muestran los 11 barrios en los cuales no fue posible realizarla. Hacia el oeste del CCSJ no se hicieron mediciones debido a restricciones por la pandemia y a requerimientos de seguridad en el trabajo de campo que no se pudieron lograr.

Uso de programa Geopsy para la obtención de H/V

Las razones espectrales H/V se obtuvieron mediante la utilización del software libre Geopsy, desarrollado por Marc Wathelet del ISTerre (Wathelet et al., 2020). Se siguieron los criterios establecidos por Bard (2004) para determinar los parámetros de procesamiento a utilizar para obtener una curva H/V confiable. Para el cálculo de las transformadas de Fourier, se utilizó la configuración predeterminada del programa: un suavizado tipo Konno & Ohmachi (Konno y Ohmachi, 1998) al espectro de Fourier y una disminución gradual con coseno en ambos lados de las ventanas.

La obtención de la curva H/V se realizó en dos etapas. Primero se generó una curva H/V preliminar con los parámetros predefinidos por el programa, esto con el fin de verificar de manera rápida que la medición hubiese sido exitosa. En esta fase se utilizó una longitud de ventana dependiente del periodo. Como se está analizando la curva en el rango 0.3 Hz – 14 Hz, la configuración predefinida del programa toma una ventana de 30 veces el periodo correspondiente a la mitad del rango.

Luego se procesaron de nuevo los datos, pero en esta ocasión se revisaron todos los requisitos de estabilidad para las razones espectrales según Bard (2004) y resumidos en Fonseca (2017).

Datos recolectados

Las figuras 4 a 8 muestran algunos resultados de las mediciones realizadas, siguiendo los procedimientos descritos en los apartados anteriores.



Fig. 1: Digitalizador (caja naranja a la izquierda) y sensor (dentro de caja transparente a la derecha) utilizados en la campaña de medición. El digitalizador es marca SARA y el sismógrafo usado como sensor triaxial es marca Lennartz.

La figura 4 muestra un registro común de vibraciones ambientales en tres componentes: norte – sur, este-oeste y vertical. Las ventanas de tiempo tomadas son generalmente de 12 a 15 min (escala horizontal) y la escala vertical corresponde a cuentas, por lo que se considera adimensional.

En otras palabras, los valores verticales no han sido multiplicados por ningún factor de sensibilidad del instrumento que permita pasar de cuentas a unidades de velocidad o de desplazamiento, que son las más comunes en los sismógrafos. Lo anterior no representa ningún inconveniente debido a que la técnica H/V estima cocientes espectrales, por lo que las unidades de las ordenadas verticales de los espectros se cancelan y lo que se obtiene son valores de amplificación.

A partir de un registro como el mostrado en la figura 4, el programa Geopsy selecciona las ventanas con las que se estimarán los espectros y los cocientes espectrales, dejando de lado intervalos de tiempo con picos excesivos, que no corresponden a la forma de natural vibrar del sitio, sino que representan anomalías debidas a vibraciones inducidas, golpes, caída de objetos, etc.

Las siguientes figuras muestran diferentes tipos de resultados obtenidos al aplicar la técnica de H/V según el sitio. Las figuras 5a y 5b representan sitios donde resulta claro leer el periodo del sitio de la razón espectral: un único pico bien definido, tanto en amplitud como en valor de frecuencia. Cada línea de color representa la razón espectral para cada ventana de tiempo seleccionada en el programa Geopsy. La línea negra continua corresponde al promedio de todas estas razones, mientras que las líneas negras discontinuas muestran las desviaciones estándar.

En ambos casos se tiene una lectura cercana a 2.3 Hz asociada a la mayor amplitud, lo que corresponde a un periodo fundamental del sitio de 0.43 s. Principalmente en la figura 5a, para frecuencias inferiores a 1.5 Hz, se observan amplitudes muy diversas en las razones espectrales. Esto suele ser debido a la presencia de viento en el sitio de medición (Fonseca, 2017), que se trata de minimizar al cubrir el sensor con una caja plástica, tal y como se indicó antes. Sin embargo, no siempre se logra eliminar este efecto del todo, aunque en la mayoría de los casos esto no impide tener una lectura clara del valor de frecuencia asociada a la máxima amplificación, o frecuencia fundamental del depósito. La figura 6 presenta dos casos donde se evidencia dos picos significativos en las razones espectrales.

Estas situaciones suelen estar asociadas a la presencia de dos contrastes entre impedancias significativos en profundidad, según el análisis realizado por Fonseca (2017) y otros autores. En estos casos, el primer pico correspondiente a una amplitud



Fig. 2: Ejemplos de sitios donde se colocó el equipo de medición de ondas superficiales, priorizando superficies rígidas en contacto con el suelo, como las losas de concreto.

significativa representa la frecuencia fundamental del sitio y el segundo pico estaría asociado a un segundo contraste, que en este estudio no se va a analizar ya que lo que buscamos es la identificación de la frecuencia (o periodo) fundamental del sitio.

La figura 7 ejemplifica dos sitios con razones espectrales bastante planas, donde no sobresale significativamente ningún pico o bien, sus amplificaciones no superan un valor de 2 para la mayor parte de las frecuencias.

Estos casos pueden asociarse a sitios de roca, según es descrito en Fonseca y Schmidt-Díaz (2018). En este caso, la roca es asociada a una razón espectral H/V que muestra amplificación cercana a la unidad en todo el rango de frecuencias. Normalmente, esto corresponde a sitios con una V_{s30} igual o superior a 750 m/s en el sitio considerado según el CSCR-2014 (CFIA, 2014).

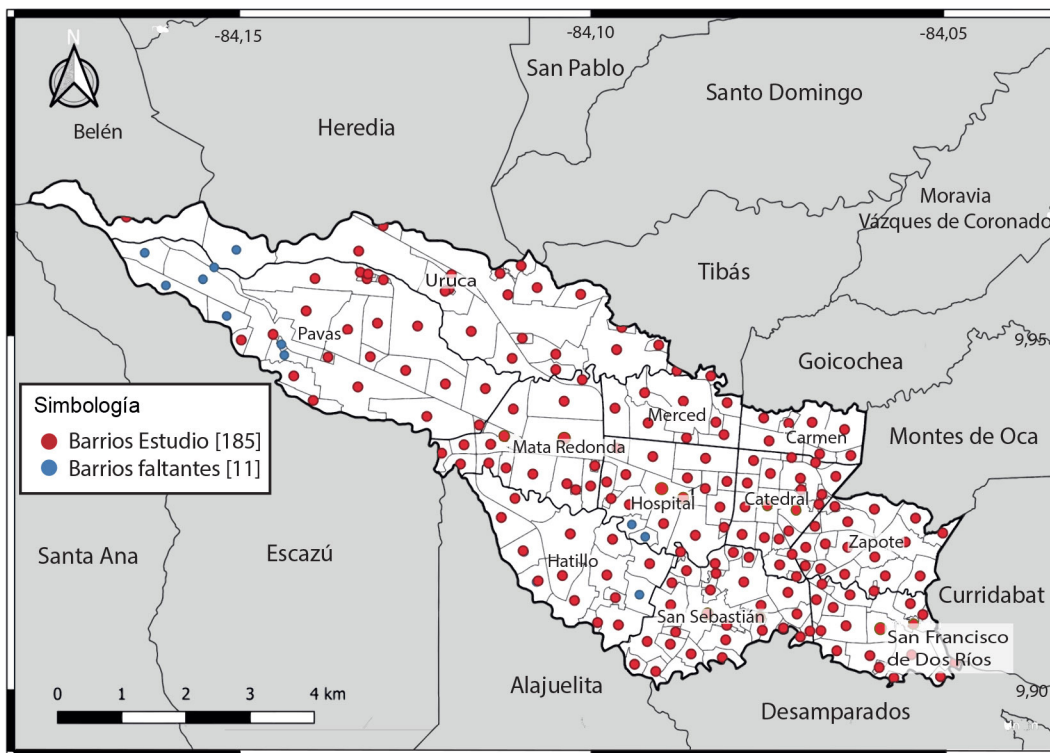


Fig. 3: Centroides de los barrios del cantón de San José. En rojo los 185 barrios donde se realizó al menos 1 medición y azul donde la medición no logró efectuarse.

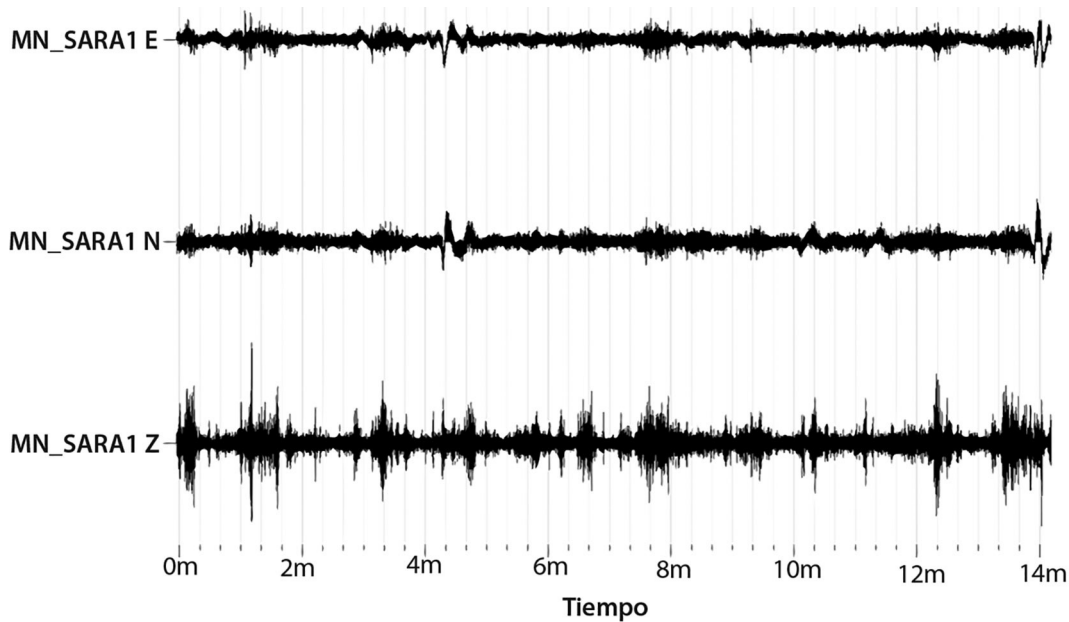


Fig. 4: Registro común de vibraciones ambientales en tres componentes, obtenido en uno de los 185 sitios seleccionados.

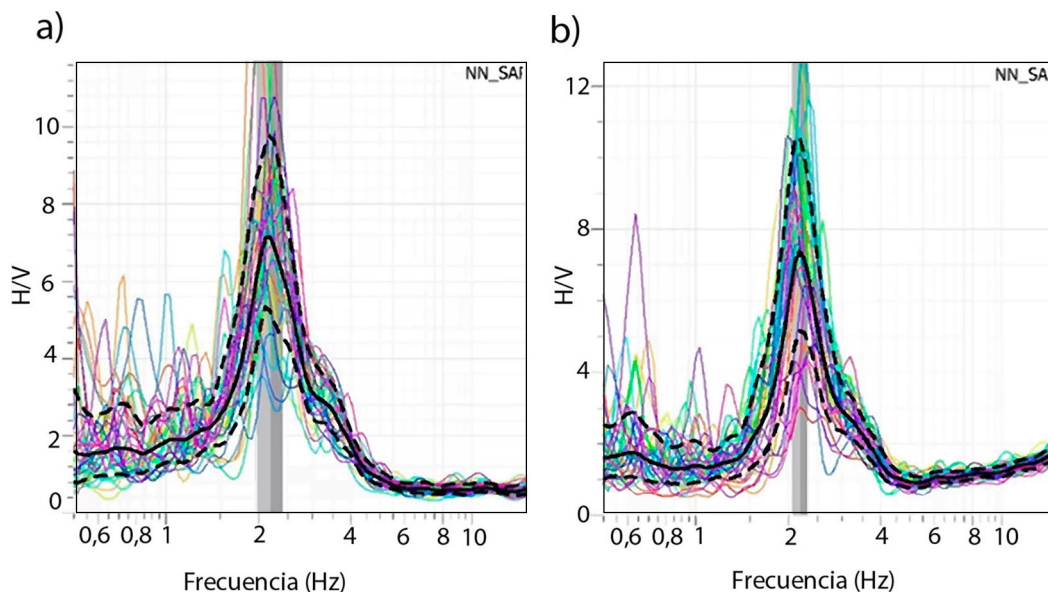


Fig. 5: Razones espectrales obtenidas en los sitios No.7 (5a) y No.150 (5b) según mapa presentado en la figura 3. En ambos casos es sencillo identificar las frecuencias asociadas a las máximas amplificaciones.

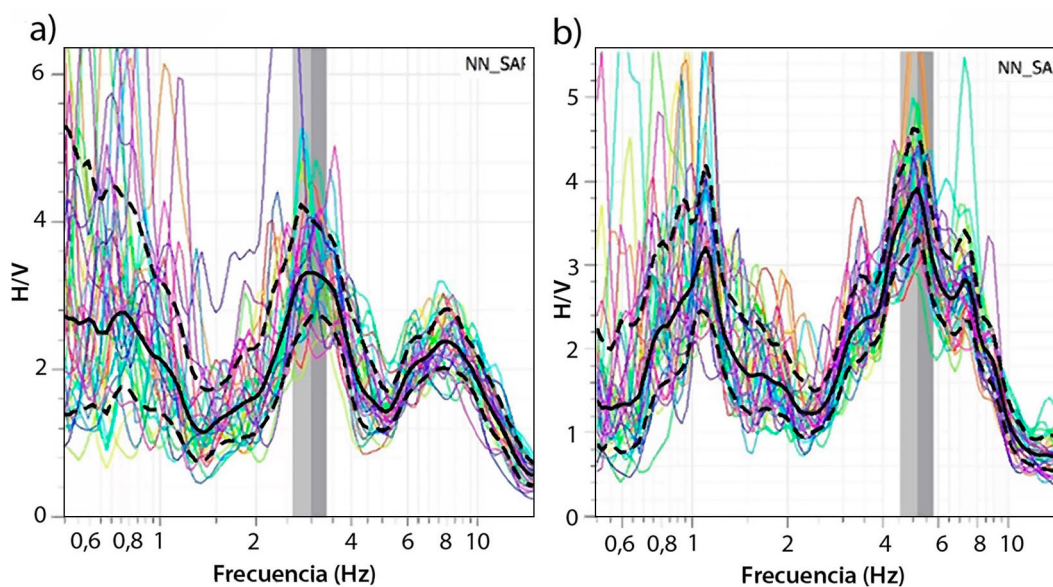


Fig. 6: Ejemplos donde se observan dos picos en las razones espectrales, posiblemente asociados a la existencia de más de un contraste significativo de impedancias en profundidad. La figura 6a corresponde al sitio No. 126, mientras que la figura 6b proviene del sitio No. 163.

La figura 8 presenta dos sitios donde es prácticamente imposible identificar un pico asociado a la máxima amplitud y, por lo tanto, se imposibilita identificar la frecuencia natural del lugar.

Esto puede ser debido a varias causas como: inclinación del basamento, excesivas fuentes de ruido externas a las vibraciones ambientales en el sitio, falta de horizontalidad de la estratigrafía debajo de la superficie, falta de contraste significativo

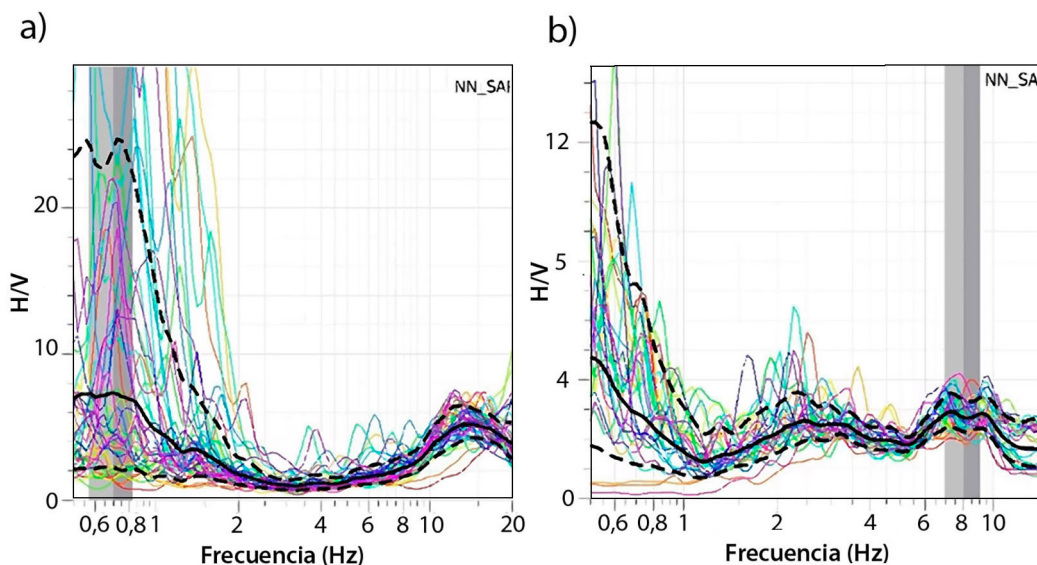


Fig. 7: Sitios con razones espectrales H/V bastante planas y de amplificación inferior a 2, clasificados como sitios de afloramiento de roca. La 7a corresponde al sitio No. 13 y la 7b al sitio No. 189 según el mapa de la figura 3.

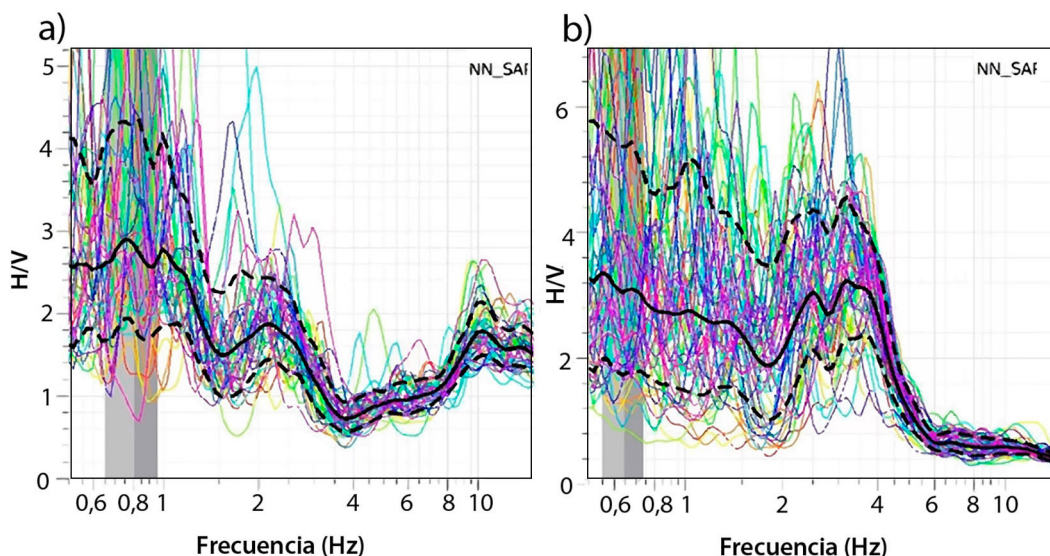


Fig. 8: Casos en los que no es posible clasificar el sitio ya que no se logra identificar un pico de amplitud significativa, que sobresalga respecto a los demás. Estos corresponden a los puntos No.4 (Fig. 8a) y No. 12 (Fig. 8b) según el mapa de la figura 3.

entre impedancias de estratos consecutivos, etc. (Fonseca y Schmidt-Díaz, 2018). Sin embargo, debe aclararse que sitios con razones H/V como los mostrados en la figura 8 solamente corresponden al 15 % de todos los puntos analizados en esta investigación, por lo que la gran mayoría de los lugares en estudio pueden ser asociados a casos como los mostrados en las figuras 5, 6 y 7, y por lo tanto, pudo hacerse una lectura clara de la frecuencia fundamental del sitio (inverso del periodo fundamental) o bien, ser clasificado como roca, donde tal frecuencia es muy alta o, la razón espectral es prácticamente plana y de baja amplitud.

Resultados

Las figuras 9 a 14 muestran mapas con los resultados obtenidos a partir de las mediciones realizadas y de las lecturas de los T_f (periodos fundamentales, que corresponden al inverso de la frecuencia fundamental) de cada razón espectral H/V obtenida por sitio. En el mapa de la figura 9 se visualiza el periodo fundamental definido para cada punto de medición.

Se observa una tendencia hacia periodos más altos, superiores a 0.5 s (círculos más oscuros) en los distritos de Mata Redonda, Merced, Hospital y Carmen. Al oeste del Cantón Central de San José (CCCSJ) se identifica una tendencia hacia valores de periodo bajos, inferiores a 0.3 s con algunas excepciones. Hacia el sureste del CCSJ (distritos de Zapote, San Sebastián y San Francisco de Dos Ríos) se observan periodos que van entre 0.1 a 0.4 s, que pueden ser considerados bajos e intermedios según la escala definida en la figura 9. El valor de T_f más alto medido aparece de forma aislada con un valor superior a 0.8 s, en el sector suroeste del distrito de Mata Redonda. Este valor puede deberse a alguna condición geológica puntual en el sitio, ya que las mediciones de campo fueron detalladamente revisadas. Debido a la naturaleza de este estudio, que se basa exclusivamente en la aplicación de la técnica H/V, no se hicieron estudios geológicos específicos en sitios que mostraron alguna singularidad. Esto quedará para algún estudio futuro.

La figura 10 muestra las tendencias del periodo del sitio, también conocido como mapa de isoperiodos, que se obtuvo a partir de un proceso de interpolación tipo Kriging entre los puntos individuales, utilizando el complemento “Contorno” para el software Qgis.

En la mayor parte de la zona en estudio, principalmente en la central, se observa el predominio de valores intermedios según la escala, que van de 0.4 a 0.6 s. Hacia el oeste se identifican periodos bajos (oeste de los distritos de Pavas y La Uruca) y hacia el este y sureste existe una amplia variedad de valores que van de 0.2 a 0.6 s. Nuevamente, se observa un punto aislado en la zona central hacia el oeste, donde el periodo supera 0.8 s.

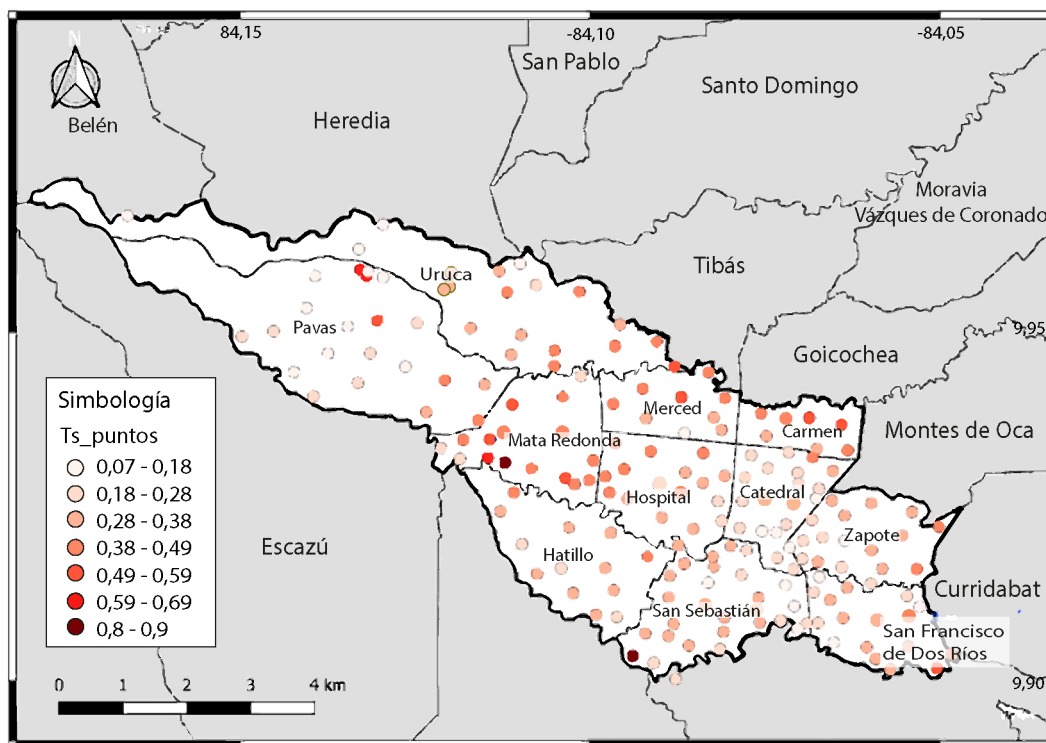


Fig. 9: Valores de periodo fundamental del suelo de los puntos medidos.

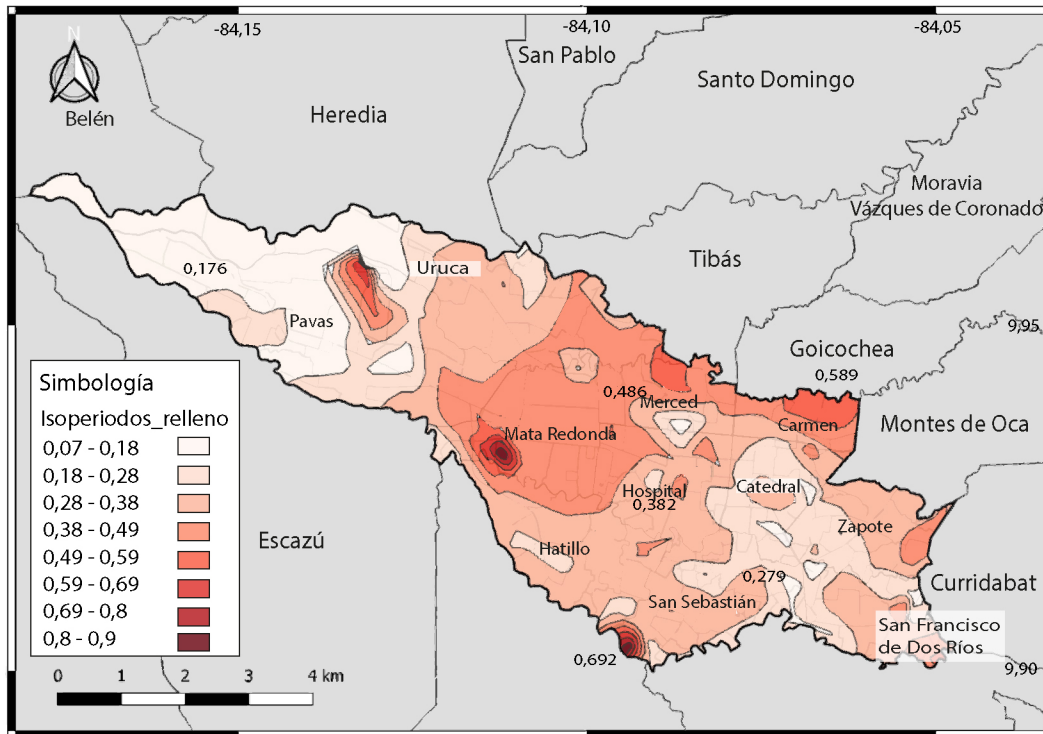


Fig. 10: Valores de periodo fundamental del suelo aplicando interpolación.

En la figura 11 se superpone el mapa de periodos en cada punto con la geología definida por la hoja Abra según el mapa geológico propuesto por Castillo y Krushensky (1977).

Según dicho mapa, la zona en estudio se ubica en tres unidades litológicas:

i. Qal, definida según la referencia citada como “aluvión de 0 a 20m: limo, arena y grava estratificados y escogidos, localmente lahares no escogidos”. Esto se identifica hacia el sureste del CCSJ.

ii. Qt3, definida como “Unidad de toba de corrientes de piroclásticos, la parte superior de la zona con fase de vapor es una toba pardo amarillenta, desvitrificada, no soldada a parcialmente soldada, muchos fragmentos líticos accidentales de toba densamente soldada gris clara, y de andesita vesicular, pardo grisácea oscura; la parte inferior es una zona desvitrificada a vidriosa que consiste en una toba densamente soldada, pardo clara a gris azulada clara, abundantes líticos, fragmentos pumíceos parcial a completamente colapsados, foliación por compactación localmente bien desarrollada. Esto se identifica al este de la zona en estudio.

iii. Qt4: la definen como “unidad de enfriamiento de toba de flujo de ceniza simple, de color amarillo-marrón claro a marrón rojizo, masivo, de grano muy fino, desvitrificado, sin soldar; localmente abundantes clastos líticos accidentales de densa andesita vesicular del flujo de lava Ql3; común a abundantes fragmentos de piedra pómez”. Esta descripción litológica corresponde a la franja central del CCSJ, aproximadamente, según se observa en la figura 11.

Según las descripciones anteriores y los valores de periodo fundamental identificados en cada punto, no se logra observar una clara correlación entre estos y la litología asociada, ya que dentro de una misma unidad geológica, por ejemplo la correspondiente a Qt4 (central), los periodos van desde 0.1 hasta 0.9s.

Solamente en el área identificada como Qt3, que se ubica al Oeste del CCSJ, donde hay un predominio de tobas y fragmentos abundantes de piedra pómez, se observa una tendencia hacia periodos cortos, típicos de materiales competentes, a los que se les suele asociar periodos bajos. Sin embargo, no existen muchos puntos de medición ubicados en esa zona, por lo que no se pueden sacar conclusiones definitivas.

Se logró la clasificación de suelos según el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) a partir del valor de periodo fundamental de cada sitio, según lo proponen Pinzón et al. (2021). Esta propuesta se muestra en el mapa correspondiente a la figura 12.

El CSCR propone 4 tipos de suelo: S1 (roca), S2 (suelo firme), S3 (suelo blando) y S4 (suelo muy blando). Una descripción más detallada sobre esta clasificación se puede encontrar en CFIA (2014). La correlación entre esta clasificación y el rango de periodos asociados se presenta en el cuadro 1, tomado de Pinzón et al. (2021).

En la figura 12 se observa de manera bastante clara una predominancia de sitios tipo S2 y S3 en la zona de estudio. En una franja central horizontal (distritos de Mata Redonda, Merced, Carmen y Hospital), se identifican sitios tipo S3 y en menor medida tipo S2. Hacia el sur y sureste predominan sitios del tipo S2 y hacia el oeste, aunque con pocos puntos de medición, se observa una tendencia hacia sitios tipo S2 y S1, es decir, más competentes, tal y como se ha discutido a lo largo del documento.

En la figura 13, se muestra un mapa donde se extrapola el tipo de sitio del centroide de cada barrio para la totalidad del mismo. Esta suposición en ocasiones debe tomarse para ciertos análisis, como por ejemplo los estudios de riesgo sísmico.

Finalmente, la figura 14 muestra el mapa de valores de V_s30 , tomando en cuenta el espesor de las distintas capas de suelo (Fonseca y Schmidt-Díaz, 2018).

La obtención de este parámetro en el campo suele ser costoso y no siempre sencillo, aunque tiene un gran uso dentro de la comunidad ingenieril en términos de clasificación de sitios, por lo que resulta valioso estimarlo. Su importancia radica en que éste representa un término de fácil comparación entre condiciones de sitio observadas en distintas partes del mundo. Además, V_s30 se puede asociar a la respuesta dinámica del suelo ante sismos y por ende, a sus potenciales efectos en estructuras, ya que en los primeros 30 metros de suelo es donde se concentran los denominados “efectos de sitio”, que corresponden a posibles amplificaciones generadas en las ondas sísmicas en su avance hacia la superficie.

En vista de las dificultades asociadas a su obtención, se han propuesto correlaciones entre el periodo fundamental y la V_s30 . En este estudio en particular, nos interesa utilizar las propuestas por Pinzón et al. (2021) debido a que fueron obtenidas a partir de registros acelerográficos de alta calidad y con mediciones de V_s30 realizadas en Costa Rica por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INI-UCR).

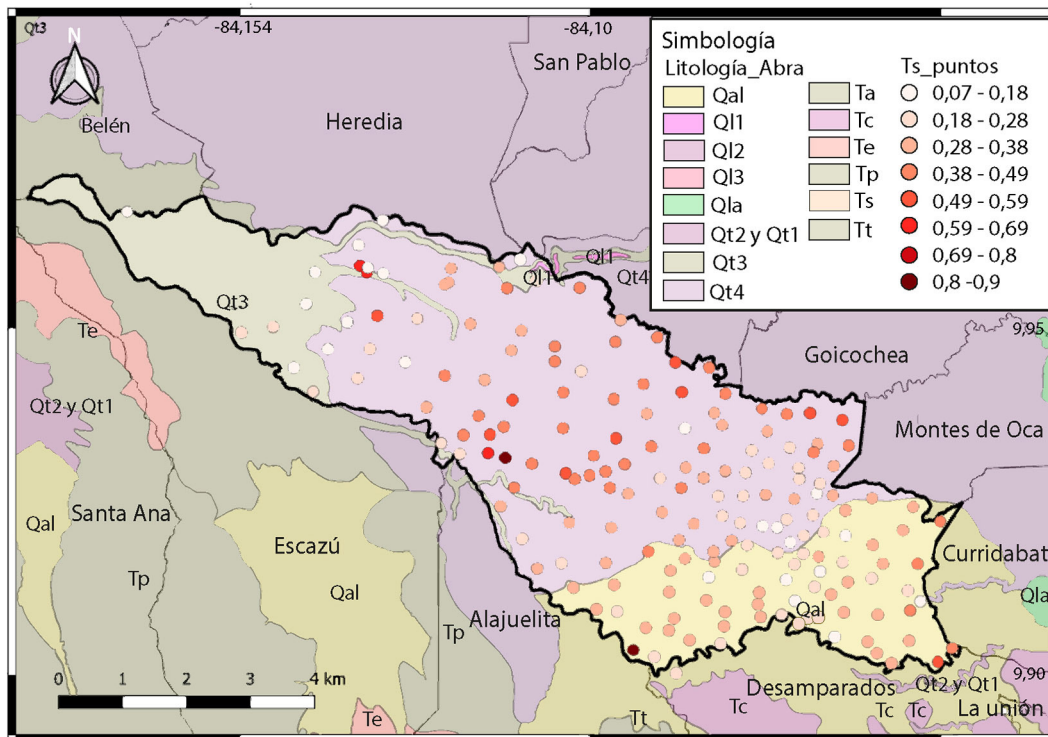


Fig. 11: Valores de periodo fundamental del suelo en cada sitio de medición superpuestos al mapa geológico según (Castillo y Krushensky, 1977).

Cuadro 1

Clasificación de sitio según el CSCR-2014, su equivalencia según el código NEHRP, los rangos de V_{s30} asociados y los rangos de periodo fundamental propuestos por Pinzón et al. (2021).

Clasificación de sitios según el CSCR-2014 (CFIA, 2014)	Equivalencia con NEHRP (FEMA, 2003)	Velocidad de onda cortante hasta los 30 m de profundidad	Periodo fundamental del sitio
S1 (roca)	A+B	$V_{s30} \geq 750$ m/s	$T_f < 0.15$ s
S2 (suelo firme)	C	$360 < V_{s30} \leq 750$ m/s	$0.15 \leq T_f < 0.35$ s
S3 (suelo blando)	D	$180 < V_{s30} \leq 360$ m/s	$0.35 \leq T_f < 0.75$ s
S4 (suelo muy blando)	E	$V_{s30} \leq 180$ m/s	$T_f \geq 0.75$ s

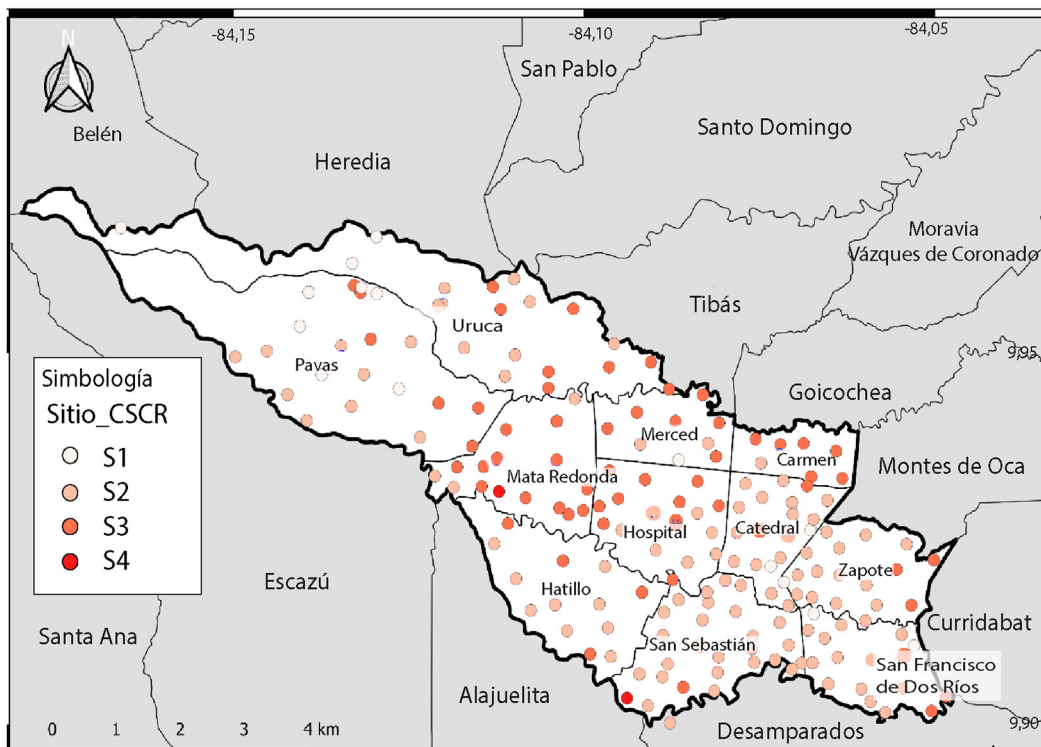


Fig. 12: Clasificación de sitios según el CSCR-2014 siguiendo la metodología propuesta por (Pinzón et al., 2021) basada en rangos del periodo fundamental.

Las correlaciones propuestas son las siguientes:

$$\log_{10}(V_{s30}) = 0.88 \log_{10}(1/T_f) + 2.15 \quad \text{para } T_f < 0.5 \text{ s} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\log_{10}(V_{s30}) = \log_{10}(260) \quad \text{para } T_f \geq 0.5 \text{ s} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

T_f es el periodo fundamental del sitio

V_{s30} : el promedio de velocidades del suelo de los primeros 30 metros, medidos desde la superficie.

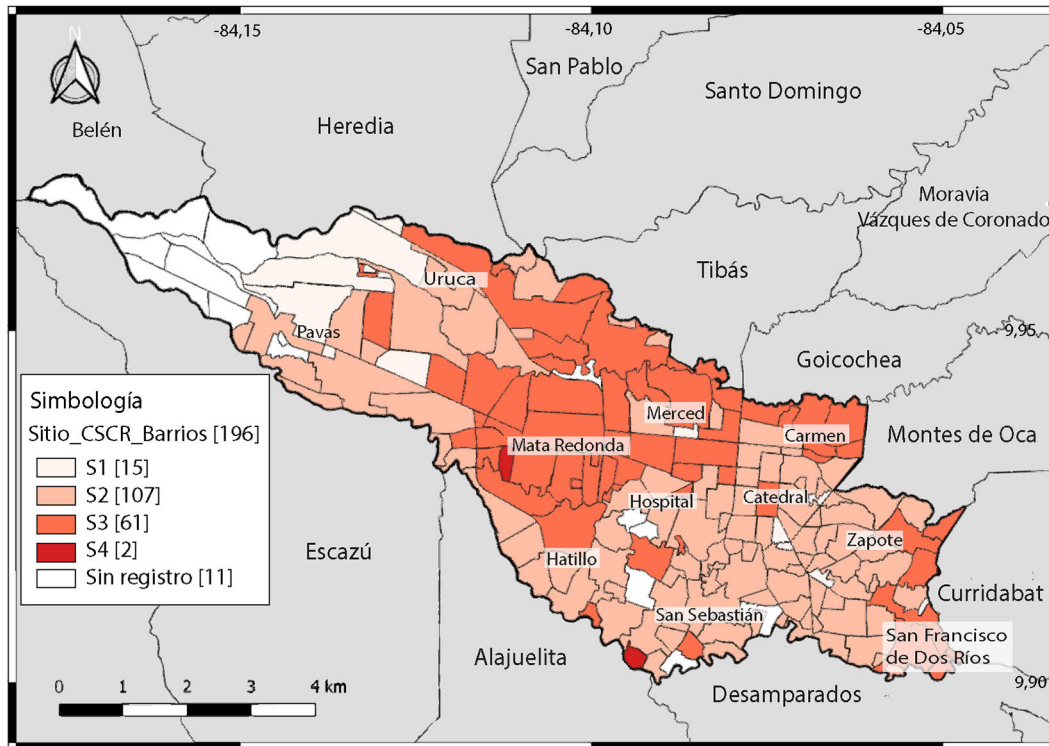


Fig. 13: Clasificación de sitios extrapolando el resultado obtenido en el centroide para todo el barrio.

Según estas correlaciones, las V_{s30} más bajas obtenidas se observan en una franja central de la zona en estudio, específicamente en los distritos de Mata Redonda, Hospital, Carmen, Merced y norte de Hatillo, con valores entre 260 y 405 m/s (Fig. 14). Esto significa que en esta zona se identifican los sitios con suelos menos competentes desde el punto de vista geotécnico. El distrito Catedral, así como las zonas en las que limitan los distritos de Zapote, San Sebastián, San Francisco de Dos Ríos y el sur de Catedral, muestran valores de V_{s30} entre 550 y 850 m/s aproximadamente.

Hacia el oeste de la zona en estudio, los distritos de Pavas y Uruca presentan V_{s30} variables, pero tienden a valores altos, superiores a los 695 m/s que se acerca una velocidad de onda cortante de 760 m/s definida comúnmente en ingeniería sísmica como una “roca ingenieril”.

No se realizan interpolaciones entre puntos para obtener mapas de V_{s30} suavizados ya que se evidencian grandes cambios de este parámetro en distancias cortas, por lo que un valor de V_{s30} interpolado podrá no ser realista.

Conclusiones

Se identificó el periodo fundamental del suelo (T_f) en 185 sitios ubicados en el Cantón Central de San José (CCSJ), al aplicar la técnica de razón espectral H/V. Los puntos seleccionados coinciden aproximadamente con los centroides de los barrios de los 11 distritos que forman dicho cantón.

Cerca del 85 % de los sitios donde se aplicó el método H/V, permitió una identificación clara del periodo fundamental, que corresponde al pico de la mayor amplitud en el gráfico de H/V.

Al presentarse los resultados de T_f en mapas, se observa que en una franja central y horizontal (distritos de Mata Redonda, Merced, Hospital y Carmen), los periodos son alrededor de 0.5 s. Hacia el oeste de la zona en estudio se identifican periodos

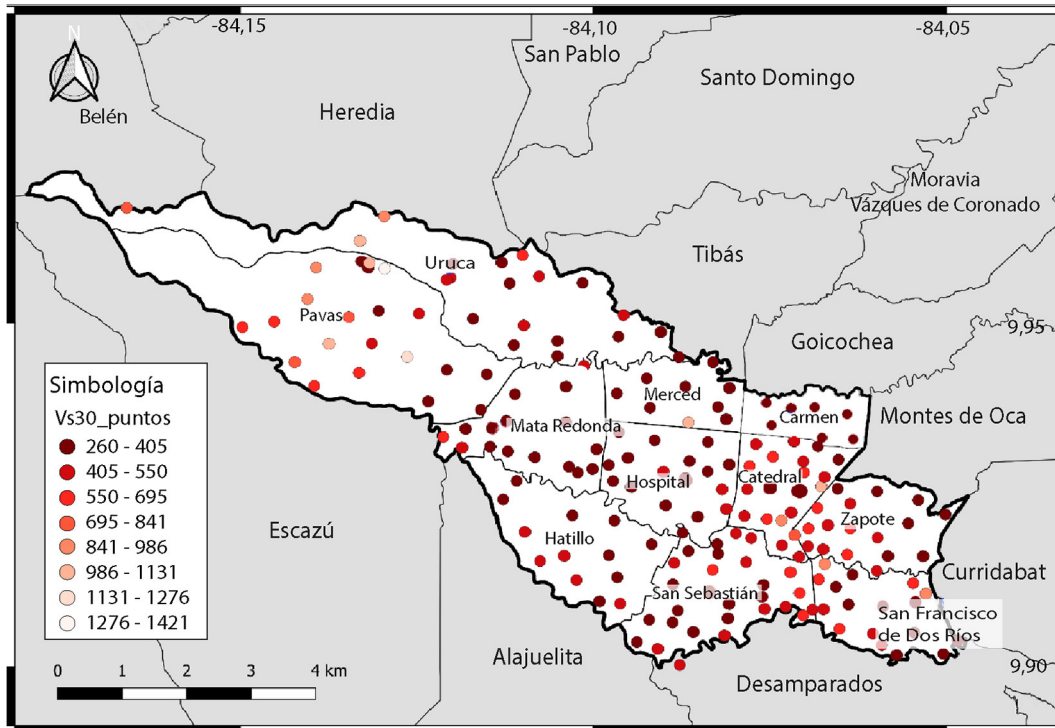


Fig. 14: Valores de Vs30 en cada sitio de medición, siguiendo la metodología propuesta por (Pinzón et al., 2021) a partir de correlaciones entre este parámetro y el periodo fundamental del sitio.

más bajos, inferiores a 0.3 s, además de que en esta zona existen menos puntos de medición debido a diversas razones logísticas. Hacia el sureste del CCSJ se identifican periodos variables, entre 0.1 s y 0.4 s. El periodo fundamental más alto de todos los medidos se ubica como un punto aislado en el sector suroeste del distrito de Mata Redonda y tiene un valor superior a 0.8 s.

Al superponer el mapa de periodos obtenidos en cada sitio de medición con la geología definida para la zona Abra según Castillo y Krushensky (1977) y tratar de establecer tendencias en términos de los periodos identificados y la litología, no se observa una correlación evidente entre los valores de T_f y las descripciones litológicas, ya que dentro de una misma unidad geológica, el T_f es variable. Tal es el caso de Qt4 (zona central), donde el periodo fundamental va de 0.1 s a 0.9 s. Solamente en el área identificada como Qt3 ubicada al oeste del CCSJ se observa una tendencia hacia periodos cortos, además de una presencia de tobas y fragmentos abundantes de piedra pómez, lo que parece ser consistente.

Es importante señalar algunas posibles razones que impiden lograr una adecuada correlación clara entre los resultados de este estudio con respecto a la geología que define la hoja Abra según Castillo y Krushensky (1977). Esto puede deberse a que la hoja mencionada tiene un nivel de detalle no tan específico para los puntos seleccionados en este estudio, donde fueron hechas las mediciones de campo. Por otro lado, tal y como se mencionó, el periodo fundamental de un sitio depende directamente del espesor de los estratos y de la velocidad de onda cortante asociada a cada uno de ellos, información que no forma parte de las descripciones geológicas. Debido a lo anterior, las comparaciones establecidas no son concordantes a excepción de sitios donde aparecen tobas, a las que se les asocian valores de periodo cortos. Para encontrar mejores correlaciones, es recomendable hacer estudios geofísicos más detallados en puntos de interés dentro de la zona en estudio, de manera que se logren mejorar las correlaciones entre los resultados de H/V y las condiciones geotécnicas de cada sitio.

Con respecto a la clasificación propuesta según el Código Sísmico de Costa Rica 2014 (CFIA, 2014), al seguir los criterios de correlación según Pinzón et al. (2021), se observa un predominio bastante claro de sitios S2 y S3 en toda la zona en estudio. En una franja central horizontal se identifica claramente S3 y en menor medida S2. Hacia el sureste se observan sitios S2 y hacia el oeste hay una tendencia hacia S1 y S2 o sea, los más competentes de todo el CCSJ según criterios ingenieriles.

Finalmente, respecto al parámetro Vs30, se sigue de nuevo la propuesta de clasificación dada por Pinzón et al. (2021) obtenida a partir de mediciones de Vs30 y periodos identificados en razones espectrales calculadas con registros acelerográficos obtenidos por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII-UCR). Según las correlaciones propuestas entre el T_f y Vs30 en esta referencia, las Vs30 más bajas se identifican en la zona central, que corresponde a los distritos de Mata Redonda, Hospital, Carmen, Merced y el norte de Hatillo, con valores que varían entre 260 m/s y 405 m/s. El distrito Catedral, así como las zonas en las que limitan los distritos de Zapote, San Sebastián y San Francisco de Dos Ríos, muestran valores de Vs30 entre 550 y 850 m/s, por lo tanto, parecen ser los sitios con suelos más competentes de los presentes en la franja central mencionada dentro de la zona en estudio. Hacia el oeste, los distritos de Pavas y Uruca muestran Vs30 también variables pero con una tendencia hacia valores altos, superiores a 695 m/s, por lo que parecen ser los suelos más competentes desde el punto de vista ingenieril de toda la zona en estudio. Esta competencia se refiere a sitios de cimentación posiblemente más adecuados, así como a amplificaciones dinámicas de suelos previsiblemente bajas.

Se recomienda avanzar en este tipo de estudios en otros cantones de la provincia de San José, así como en otras zonas densamente pobladas del país, de manera que se cuente con información de gran relevancia como lo es el T_f obtenido de manera directa, así como Vs30 y la clasificación de suelos según el Código Sísmico de Costa Rica 2014, logrados a partir de correlaciones. Con esta información se podrá también mejorar las correlaciones actuales entre la geología superficial, el tipo de suelo, Vs30 y el periodo fundamental, siendo este último parámetro muy útil para una adecuada clasificación de sitios y sencillo de obtener en la mayoría de los casos.

Estos resultados representan un aporte más en los estudios que se llevan a cabo orientados a la mitigación de los efectos destructivos que traen consigo los terremotos, ya que el periodo fundamental del suelo es cada vez utilizado en las normas de diseño, que buscan lograr diseños sismorresistentes cada vez más eficientes.

Agradecimientos

Esta investigación se llevó a cabo gracias a la colaboración de las siguientes personas: Ing. Steven Vásquez González como asistente de investigación y a los técnicos: Lic. Arturo Jiménez Rivas, Esteban Cordero Camacho, Andrés Fallas Flores y Gabriel Solano Quirós, quienes llevaron a cabo el trabajo de campo. Todos ellos como parte del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII-UCR). Se agradece al estudiante Osvaldo Villalobos por su colaboración en la edición de las imágenes y formato del documento. Este proyecto se realizó gracias al apoyo financiero otorgado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, en específico en la asignación de horas asistente dentro del proyecto 731-B7-900 “Monitoreo de sismos y registro de vibraciones ambientales e inducidas en suelos y en estructuras” del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (INII-UCR), así como fondos provenientes del Transitorio I de la Ley Nacional de Emergencias (N° 8488) de la República de Costa Rica en el marco del proyecto B7-501 “Estimación del Riesgo Sísmico en el cantón de San José, Costa Rica” del Laboratorio de Ingeniería Sísmica.

Referencias bibliográficas

- Bard, P.-Y. (1999). Microtremor measurement: a tool for site effect estimation?. En K. Irikura, K. Kudo, H. Okada y T. Sasatani (eds), *Second international symposium on the effects of surface geology on seismic motion* (pp. 1251-1279, vol. 3). Balkema.
- Bard, P.-Y. (coord.). (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations*. SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12. http://sesame.geopsy.org/Papers/HV_User_Guidelines.pdf
- Castillo, R. M., y Krushensky, R. D. (1977). Mapa geológico y corte transversal de la hoja Abra, Costa Rica. Dirección de Geología y Minas de Costa Rica, 1.
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2014). *Código Sísmico de Costa Rica 2010* (Revisión 2014). https://www.codigosismico.or.cr/respuestas2010_14.htm

- Fonseca, J. C. (2017). *La razón espectral H/V obtenida a partir de vibraciones ambientales y su correlación con la estratigrafía del subsuelo*. [Tesis de licenciatura inédita]. Universidad de Costa Rica.
- Fonseca, J. C., y Schmidt-Díaz, V. (2018). Correlación entre la forma de la razón espectral H/V con la estratigrafía del subsuelo en 10 sitios de estudio. *Revista Ingeniería*, 28(2), 1. <https://doi.org/10.15517/ri.v28i2.31730>
- Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC). (2013). *X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011. Resultados generales*. INEC. <http://sistemas.inec.cr/pad5/index.php/catalog/113/related-materials>
- Konno, K., y 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>
- Kudo, K. (1995). Practical estimates of site response: state-of-the-art report. En French Association for Earthquake Engineering y Earthquake Engineering Research Institute (eds), *Proceedings of the fifth International Conference on Seismic Zonation, October 17-18-19, 1995, Nice, France* (Vol. 3, pp. 1878–1907). Ouest éditions.
- Municipalidad de San José. (2016). *Diagnóstico cantonal 2016*. Municipalidad de San José, Dirección de Planificación y Evaluación. <https://www.msj.go.cr/docu/Informes%20y%20Estudios%20de%20Desarrollo%20Urbano/Diagn%C3%B3stico%20Cantonal%202016.pdf>
- Nakamura, Y. (1989). Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quality Report of the Railway Technology Research Institute*, 30(1), 25–33.
- Pinzón, L. A., Hidalgo-Leiva, D. A., Moya-Fernández, A., Schmidt-Díaz, V., y Pujades, L. G. (2021). Seismic site classification of the Costa Rican Strong-Motion Network based on Vs30 measurements and site fundamental period. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 383–389. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n4.93927>
- Schmidt-Díaz, V. (2010). *Avances para estudios del riesgo sísmico a escala regional y local : aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España)*. [Tesis de doctorado inédita]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C., Giulio, G. Di, Guillier, B., Ohrnberger, M., y 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>