

29

EFECTOS DE SITIO EN CUENCA-ECUADOR A PARTIR DE ESTUDIOS UNIVERSITARIOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL

SITE EFFECTS IN CUENCA-ECUADOR FROM UNIVERSITY ENVIRONMENTAL VIBRATION STUDIES

Antonio Marcos Sacoto Toledo¹

E-mail: antonio.sacoto.79@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8530-5000>

Juan Sebastián Maldonado Noboa¹

E-mail: jmaldonadon@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Cesar Humberto Maldonado Noboa¹

E-mail: cmaldonadon@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

¹ Universidad Católica de Cuenca. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Sacoto Toledo, A. M., Maldonado Noboa, J. S., y Maldonado Noboa, C. H. (2024). Efectos de sitio en Cuenca-Ecuador a partir de estudios universitarios de vibración ambiental. *Revista Conrado*, 20(97), 318-331.

RESUMEN

Cuenca Ecuador es una Zona de Alta Sismicidad, de ahí la necesidad de realizar estudios de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico, como son los Estudios de Microzonificación Sísmica. Este trabajo, estudia el comportamiento de seis lugares de la Ciudad de Cuenca frente a dos eventos sísmicos de magnitud 6.9 cerca de Guayaquil y otro de 5.2 en La Maná, Cotopaxi, para lo cual se instaló equipos de medición de vibración ambiental en cada lugar, realizando la respectiva calibración y fijación; posteriormente los datos obtenidos fueron procesados y analizados mediante un filtrado para la eliminación del ruido sísmico, obteniendo aceleraciones y períodos; también se estudió los efectos de sitio calculando la Velocidad de Onda de Corte Vs30, Relación H/V, así como el Factor de Amortiguamiento del Suelo. A partir de los resultados, se concluye que existe una heterogeneidad en la respuesta sísmica entre los diferentes lugares de estudio, recomendando generar una base de datos de Registros de Vibraciones Ambientales enfocada a Estudios de Microzonificación Sísmica, continuar desarrollando estudios de vibración ambiental, así como compararlos y relacionarlos con resultados de Estudios Geotécnicos.

Palabras clave:

Vibración ambiental, frecuencia, sismos, periodos.

ABSTRACT

Cuenca Ecuador is a High Seismic Zone, hence the need to carry out studies of the threat, vulnerability and seismic risk, such as Seismic Microzoning Studies. This work studies the behavior of six places in the City of Cuenca in the face of two seismic events of magnitude 6.9 near Guayaquil and another of 5.2 in La Maná, Cotopaxi, for which environmental vibration measurement equipment was installed in each place. performing the respective calibration and fixation; Subsequently, the data obtained were processed and analyzed by filtering to eliminate seismic noise, obtaining accelerations and periods. Site effects were also studied by calculating the Shear Wave Velocity Vs30, H/V Ratio, as well as the Damping Factor Soil. From the results, it is concluded that there is heterogeneity in the seismic response between the different study locations, recommending generating a database of Environmental Vibration Records focused on Seismic Microzoning Studies, continuing to develop environmental vibration studies, as well as compare and relate them with results of Geotechnical Studies.

Keywords:

Vibración ambiental, frecuencia, sismos, periodos.

INTRODUCCIÓN

La investigación de los efectos sísmicos sobre las estructuras urbanas y el suelo es un campo de estudio crucial, especialmente en regiones de alta actividad sísmica como Ecuador. En este contexto, el presente artículo aborda una serie de ensayos de vibración ambiental realizados por estudiantes universitarios en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, con el objetivo de comprender mejor el comportamiento del suelo y las estructuras ante eventos sísmicos.

El estudio se centra en dos sismos específicos: uno ocurrido el 17 de agosto de 2023, con una magnitud de 6.9 y una profundidad de 5 km cerca de Guayaquil, y otro de magnitud 5.2 a 20 km de profundidad en la ciudad de La Maná, Cotopaxi. Estos eventos proporcionan una valiosa oportunidad para analizar la respuesta del suelo y las estructuras bajo diferentes intensidades y profundidades sísmicas. La metodología empleada incluye la realización de ensayos de vibración ambiental en seis puntos diferentes de Cuenca, distribuidos en dos series de pruebas.

En el primer ensayo, realizado antes y durante el sismo de Guayaquil, se colocaron equipos de medición de vibración en tres ubicaciones estratégicas: el Centro de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación (CITT) de Ricaurte, la Basílica de la Universidad Católica de Cuenca (UCACUE) y en Rayoloma. Estos sitios fueron seleccionados por su relevancia en términos de actividad urbana y su representatividad de diferentes tipos de construcciones y usos del suelo en Cuenca. El propósito era captar una imagen clara de cómo varía la vibración del suelo en diferentes entornos urbanos.

El segundo ensayo, llevado a cabo en relación con el sismo de La Maná, incluyó la instalación de equipos en la Universidad del Azuay, la Universidad de Cuenca y en el Parque de la República. Estas ubicaciones ofrecen un contraste con los sitios del primer ensayo, permitiendo una comparación más rica y detallada de los resultados.

Un aspecto crucial del estudio es el proceso de filtrado de datos para determinar los períodos naturales de vibración del suelo, tanto una hora antes como durante los sismos. Este análisis es fundamental para entender la dinámica del suelo y las estructuras en respuesta a estímulos sísmicos, lo que a su vez tiene implicaciones directas en la ingeniería sísmica y en las prácticas de construcción en zonas de riesgo.

La justificación de un estudio sobre el comportamiento del suelo ante eventos sísmicos, en lugares que poseen una diversidad de tipos de suelo, como la ciudad de Cuenca-Ecuador, radica en aspectos fundamentales

desde la perspectiva de la ingeniería civil como de la gestión del riesgo de desastres. Esta justificación se construye sobre la premisa de que el conocimiento detallado del comportamiento del suelo frente a sismos es crucial para la seguridad, la planificación urbana y el diseño estructural de edificaciones en zonas sísmicas.

Seguridad Pública y Reducción del Riesgo de Desastres: El estudio del comportamiento sísmico del suelo es vital para la seguridad pública. En zonas sísmicas, como la mayoría de áreas del Ecuador, comprender el comportamiento de los diferentes tipos de suelo durante los eventos sísmicos de gran magnitud, puede ser la diferencia entre la vida y la muerte de las personas. Al caracterizar la respuesta sísmica de varios tipos de suelos, este estudio apunta a mejorar los modelos predictivos y las estrategias de mitigación de riesgos, contribuyendo así a salvaguardar vidas humanas y reducir la vulnerabilidad de las comunidades frente a desastres naturales.

El objetivo de este trabajo de definir las características del comportamiento sísmico del Ecuador, utilizando conceptos de energía sísmica liberada. El patrón histórico de liberación de energía sísmica puede ser utilizado para identificar periodos de comportamiento y proyectarla en el futuro. Con este mismo enfoque se plantea un método alternativo de estimación del riesgo sísmico y mapa que resultó de su aplicación. Los datos utilizados incluyeron 500 años de datos históricos y cien años de datos medidos (Theurer, 2016).

Para el estudio se han empleado datos de más de 2.400 eventos sísmicos, extraídos de la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). La región de investigación está ubicada en la zona de subducción donde interactúan la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Esta área de subducción es la principal fuente de actividad sísmica en la región. Además, la zona cuenta con varias fallas geológicas activas, que se encuentran mayormente en paralelo a la zona de subducción (López y Largos, 2015).

Ecuador, un país de alto riesgo sísmico, la vulnerabilidad de las construcciones se ha convertido en un foco crítico para la mitigación de riesgos. Se han adoptado diversas metodologías para evaluar esta vulnerabilidad, incluyendo el proyecto SARA en Quito, así como las metodologías NEC-15, FUNVISIS (Hernández et al., 2011), destacadas en tesis y trabajos académicos. Estos métodos comparten características, pero también presentan diferencias significativas que son vitales para considerar las condiciones específicas de las edificaciones ecuatorianas. Los porcentajes de edificaciones vulnerables identificadas son clave y ameritan análisis más exhaustivos. Se reconoce

que las metodologías son útiles y complementarias entre sí; por lo tanto, se aconseja utilizar al menos tres para una evaluación robusta, siendo NEC-15 y FUNVISIS especialmente recomendadas (Cunalata y Caiza, 2022).

En la Ciudad de Cuenca, en el año 2002, la Red Sísmica del Austro, regentada por la Universidad de Cuenca, realizó el Estudio Amenaza Sísmica en el Austro, Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en la Ciudad de Cuenca, mismo que evidenció y concluyó que la Ciudad de Cuenca es una zona de alta sismicidad, por lo tanto, existe una importante vulnerabilidad sísmica, especialmente en su centro histórico (Jiménez et al., 2018).

Se conoce como Efectos de Sitio a los fenómenos de modificación de la señal sísmica, debido a que se encuentran controlados por las condiciones geológicas y topográficas del lugar donde ocurre el sismo.

El estudio de eventos sísmicos destructivos del pasado, demuestra que un gran porcentaje de los daños ocasionados tiene estrecha relación con la amplificación de ondas sísmicas, debido a efectos de sitio locales (Rivera-Álvarez y Pérez-Aleman, 2019).

Los efectos de sitio se caracterizan en función de las propiedades dinámicas del suelo, como por ejemplo el Período Fundamental (T), la Velocidad de Onda de Corte (Vs); de ahí la necesidad de ejecutar el análisis los efectos de sitio para llegar a resultados que permitan entender el comportamiento dinámico del suelo, y la importancia de estos en la formulación de los códigos de diseño sismorresistentes (Ríos y Cruz, 2016).

Las técnicas de Medición y Análisis de Registros de Vibración Ambiental son una opción efectiva para el Análisis de Efectos de Sitio, debido a su eficiencia, practicidad y bajo costo. Existen varios métodos de vibración ambiental para la caracterizar los efectos de sitio como el Método del Cociente Espectral H/V, destacando la importancia del control de calidad en el procesamiento de los datos obtenidos en las mediciones a fin de obtener resultados y conclusiones racionales (Ríos y Cruz, 2016).

Los Métodos de Vibración Ambiental permiten realizar el Análisis de Efectos de Sitio en lugares donde existen pocos registros instrumentales de eventos sísmicos de gran magnitud (Rivera-Álvarez y Pérez-Aleman, 2019).

Desde la perspectiva de la Ingeniería Civil, un entendimiento profundo del comportamiento del suelo es indispensable para el diseño y construcción de infraestructuras resilientes. La variabilidad en la respuesta del suelo ante cargas sísmicas influye directamente en la estabilidad de las estructuras. Este estudio proporciona información que puede ser utilizada para mejorar las normativas

de construcción y los códigos de edificación, asegurando que las estructuras sean diseñadas para resistir los efectos específicos de los sismos en diferentes tipos de suelo (Hernández y Tena, 2018).

Este estudio aborda la importancia de las mediciones geofísicas y su complementación con conocimientos ingeniero-geológicos para clarificar el efecto de sitio y estimar el comportamiento dinámico del suelo frente a terremotos. Aplicado al edificio de la Empresa Comercializadora y Distribuidoras de Medicamentos (EMCOMED), se demostró que no hay riesgo de licuación en el sitio y que la señal sísmica podría amplificarse aproximadamente el doble según los procedimientos utilizados en la investigación (Domínguez, 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis vibracional en Ecuador involucra una selección rigurosa de zonas de ensayo, centrada en criterios como la representatividad geográfica, el tipo de suelo, la densidad constructiva y la historia sísmica. Inicialmente, se eligieron tres lugares estratégicos: el CITT de Ricaurte por su rol en desarrollo tecnológico; la Basílica de UCACUE, por su importancia cultural en el centro de Cuenca; y Rayoloma, reflejando las áreas residenciales en crecimiento. Posteriormente, la atención se dirigió a la Universidad del Azuay y la Universidad de Cuenca, ambos centros educativos con infraestructura notable, y el Parque de la República, un área pública vital con un entorno urbano variado. Estos sitios ofrecen una perspectiva amplia de las condiciones del suelo y tipologías estructurales en la ciudad, asegurando además la accesibilidad y seguridad para los investigadores durante el despliegue y monitoreo de instrumentos (Cevallos et al., 2023).

Se instalaron equipos de medición especializados en las zonas previamente seleccionadas. Los instrumentos, que incluyen geófonos de 4Hz, están diseñados para registrar con alta precisión las vibraciones del suelo, capturando movimientos en los ejes vertical y horizontales esenciales para el análisis vibracional ante sismos. Estos dispositivos son compactos, portátiles y cuentan con sensores de alta sensibilidad, capaces de detectar frecuencias de vibración claves para comprender la dinámica del suelo bajo condiciones sísmicas. Cada dispositivo está dotado de memoria interna amplia para el almacenamiento de datos a largo plazo y sistemas de energía autónomos, asegurando la operatividad constante durante el monitoreo, lo cual es crítico para documentar eventos sísmicos impredecibles.

Previo a la recopilación de datos, se realizó una calibración meticulosa de los equipos de medición. Orientando

los geófonos con brújulas de precisión hacia las direcciones cardinales, se aseguró una interpretación exacta de los datos y consistencia en las mediciones entre los distintos sitios de ensayo. Esta alineación precisa es crucial para correlacionar las señales con las direcciones de las ondas sísmicas. Los equipos, una vez orientados, se anclaron firmemente al suelo para evitar desplazamientos durante los sismos y reducir las vibraciones ajenas a las del suelo. Se utilizó un anclaje adaptado a las características de la superficie base de cada ubicación, buscando que las mediciones reflejaran solamente las respuestas del suelo. Se efectuaron pruebas preliminares para comprobar la fidelidad de la señal y ajustar la sensibilidad de los dispositivos de acuerdo con las condiciones ambientales y el ruido de fondo. Esta rigurosa metodología de calibración y anclaje es indispensable para la integridad del estudio, garantizando la recopilación de datos fiables y representativos de la dinámica sísmica real en cada punto de ensayo.

El post-procesado de datos sísmicos registrados antes de los sismos implica un enfoque riguroso para asegurar que las mediciones de la respuesta vibracional del suelo sean tanto precisas como relevantes. El primer paso crítico es la aplicación de filtros para eliminar el ruido sísmico que no está relacionado con la respuesta del suelo que se quiere estudiar. Para el filtrado del ruido, se emplea un filtro pasa-bandas, el cual está diseñado para permitir el paso de un rango específico de frecuencias mientras bloquea las frecuencias por debajo y por encima de este rango. Esta técnica es efectiva para aislar las señales de interés y suprimir el ruido ambiental y las frecuencias no deseadas. El rango de frecuencias que se permite pasar se selecciona en función de las características esperadas de la señal de interés y los parámetros geofísicos del sitio (Pueyo et al., 2005).

Por ejemplo, si se espera que el suelo de interés tenga un periodo de vibración natural entre 0.1 y 2 segundos, el filtro pasa-bandas podría estar configurado para permitir frecuencias entre 0.5 Hz y 10 Hz, lo que corresponde a la gama de frecuencias asociada con esos periodos. Este rango es crucial para asegurar que las señales de baja frecuencia, como las vibraciones del tráfico o las oscilaciones de edificios, así como las de alta frecuencia, como el ruido producido por el viento o las actividades humanas, sean efectivamente eliminadas del conjunto de datos.

Tras la aplicación del filtro pasa-bandas, se realiza un análisis espectral de las señales para identificar y caracterizar las frecuencias dominantes de la respuesta del suelo. Este análisis ayuda a determinar los modos de vibración naturales del suelo y las posibles resonancias estructurales, las cuales son fundamentales para comprender la respuesta del suelo ante estímulos sísmicos.

En contraste con el enfoque utilizado para los datos pre-sismo, el procesamiento de las señales registradas durante el sismo se enfoca en capturar y analizar los picos de vibración causados por el evento sísmico. En este caso, se realiza lo que podría considerarse un proceso inverso al filtrado previo (Patiño et al., 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para una interpretación adecuada de los datos, se generan representaciones visuales de las señales, como espectrogramas y gráficos de tiempo-frecuencia. Estas visualizaciones permiten a los investigadores identificar las características de las ondas sísmicas, como la dispersión, la atenuación y la frecuencia predominante. El análisis de estos gráficos proporciona información crítica sobre la respuesta del suelo y las estructuras durante el sismo. El “efecto de sitio” se refiere a la modificación de las ondas sísmicas a medida que viajan a través de las diferentes capas de suelo antes de llegar a la superficie. Este fenómeno es crucial en la ingeniería sísmica, ya que las propiedades del suelo pueden amplificar o atenuar las vibraciones sísmicas, afectando significativamente la respuesta de las estructuras construidas en la superficie.

La Tabla 1 presenta los Tipos de Perfiles Suelos para Diseño Sísmico incluida en la (Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015), clasificación que se ha adoptado de la National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)(FEMA 450, 2004). Para determinar cada tipo de perfil suelo se consideran parámetros basados en la velocidad de la onda de corte (V_s), así como criterios geotécnicos cuando aplican.

Tabla 1. Tipos de Perfiles de Suelo para el Diseño Sísmico.

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s

C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360 \text{ m/s}$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$; $N \geq 50.0$; $S_u \geq 100 \text{ kPa}$
E	Perfil que cumple el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$V_s < 180 \text{ m/s}$; $50 > N \geq 15.0$; $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50 \text{ kPa}$; $IP \geq 20$; $w \geq 40\%$; $S_u < 50 \text{ kPa}$

Fuente: Elaboración de autores

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los diferentes tipos de perfiles de suelo. Estudios como los de Schmidt (2014), presentan información que relaciona el período natural del sitio, con el promedio de las velocidades de onda de cortante V_{s30} , así como la equivalencia con la Clasificación de Suelos propuesta por el NEHRP (FEMA 450, 2004), presentado en la Tabla 2:

Tabla 2. Promedio de las velocidades de onda de cortante V_{s30} .

Cuadro 1

Correspondencia entre clases de sitio, T_0 y rangos de velocidades V_s (Zhao et al. 2006)

Clases de sitio	Periodo natural del sitio T_0 (s)	Promedio de las velocidades de onda cortante (m/s)	Equivalencia con la clasificación del NEHRP
S I (roca/suelo rígido)	$T_0 < 0,2$	$V_{s30} > 600$	A+B
S II (suelo firme)	$0,2 = T_0 < 0,4$	$300 < V_{s30} = 600$	C
S III (suelo medio)	$0,4 = T_0 < 0,6$	$200 < V_{s30} = 300$	D
S IV (suelo blando)	$T_0 = 0,6$	$V_{s30} = 200$	E

Fuente: Elaboración de autores

Correspondencia entre clases de sitio, Período natural del sitio, Promedio de las velocidades de onda de cortante y Equivalencia con la Clasificación NEHRP (Schmidt, 2014).

Los resultados obtenidos del primer ensayo proporcionan una perspectiva detallada de las aceleraciones y frecuencias de vibración del suelo en las tres ubicaciones seleccionadas en Cuenca. Se aplicó un filtro pasa-bandas de 10Hz para enfocar el análisis en las frecuencias más relevantes para la respuesta estructural. A continuación, se presentan los hallazgos específicos para cada ubicación.

Centro de Investigación, Transferencia de Tecnología e Innovación (CITT) de Ricaurte

En el CITT de Ricaurte, las mediciones revelaron una aceleración máxima del suelo de 0.054 m/s^2 . El período de vibración natural del suelo, que representa la frecuencia a la que el suelo tiende a oscilar en ausencia de perturbaciones continuas, se registró en 0.65 segundos. Estos datos sugieren una respuesta del suelo de moderada intensidad con un período que cae dentro del rango típico para suelos de tipo medio.

Basílica de la UCACUE (UCACUE)

En la Basílica de la Universidad Católica de Cuenca, se observó una aceleración del suelo de 0.071 m/s^2 . El período de vibración natural medido en este sitio fue de 0.53 segundos. Este valor indica una respuesta del suelo ligeramente más rígida en comparación con el CITT de Ricaurte, lo que puede atribuirse a diferencias en la composición del suelo o en las características estructurales circundantes.

Rayoloma

La zona de Rayoloma mostró una aceleración del suelo de 0.035 m/s^2 y un período de vibración natural de 0.58 segundos. Este período está en un rango similar al observado en la Basílica de la UCACUE, lo que puede indicar

características de suelo comparables entre estos dos sitios o una respuesta del suelo afectada por factores similares como la topografía o el tipo de construcciones en la zona.

Cada una de estas mediciones es crucial para entender cómo las diferentes áreas dentro de la ciudad de Cuenca podrían responder a eventos sísmicos futuros. Las diferencias en las aceleraciones y los períodos de vibración pueden influir significativamente en el diseño de estructuras sismorresistentes y en las estrategias de mitigación de daños para construcciones existentes. Los datos proporcionan información valiosa que puede ser utilizada para actualizar las normativas de construcción y mejorar la resiliencia urbana frente a sismos.

El segundo ensayo se centró en la evaluación de la respuesta vibracional del suelo durante un sismo en tres ubicaciones distintas de Cuenca, utilizando el mismo filtro pasa-bandas de 10Hz para mantener la coherencia con el primer ensayo. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada uno de los sitios.

Universidad del Azuay (UDA)

En la Universidad del Azuay, se detectó una aceleración máxima del suelo de 0.06 m/s², acompañada de un período de vibración natural de 0.42 segundos. Estos valores sugieren una respuesta del suelo con una rigidez considerable y una capacidad de absorción energética notable. El período más corto puede indicar una composición del suelo más rígida o una interacción suelo-estructura que contribuye a una respuesta más rápida del sistema vibratorio.

Universidad de Cuenca (UCUENCA)

En la Universidad de Cuenca, la aceleración registrada fue de 0.08 m/s² y el período de vibración fue significativamente más corto, de solo 0.115 segundos. Este período extremadamente breve es indicativo de un suelo muy rígido, posiblemente debido a la presencia de roca o suelo compacto. Esta característica puede tener implicaciones importantes en el diseño sísmico, ya que estructuras construidas sobre este tipo de suelo podrían experimentar respuestas vibratorias más rápidas y potencialmente más intensas durante un sismo.

Parque La República

En el Parque La República, las mediciones mostraron una aceleración del suelo de 0.047 m/s² con un período de vibración natural de 0.356 segundos. Este período intermedio refleja una respuesta del suelo que no es ni extremadamente rígida ni particularmente flexible. Esta característica del suelo puede ser beneficiosa desde un punto de vista sísmico, ya que sugiere una capacidad de disipar energía sin entrar en resonancia con estructuras de alturas comunes.

La variabilidad observada en las aceleraciones y períodos de vibración entre los diferentes sitios resalta la importancia de la microzonificación sísmica y la necesidad de considerar las características específicas del suelo en la planificación urbana, gestión de riesgos y el diseño estructural en la Ciudad de Cuenca. Estos datos pueden ser utilizados para refinar los modelos de riesgo sísmico y para desarrollar normas de diseño que mejoren la resiliencia de las infraestructuras de la Ciudad.

Tabla 3. Señales durante el Sismo.

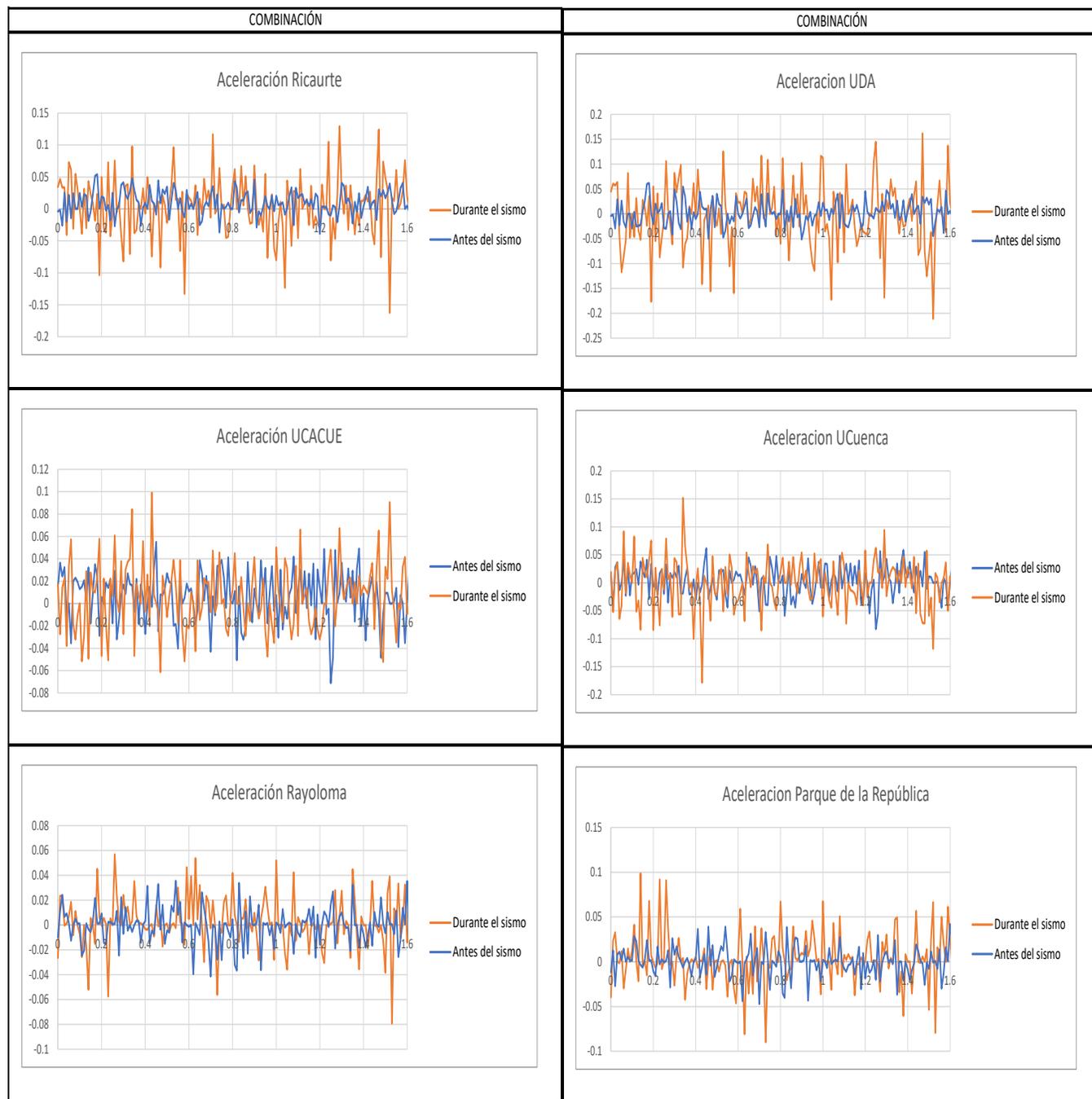
Señales durante el sismo			
Lugar	Aceleración (m/s ²)	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
Ricaurte	0.12	1.19	0.84
UCACUE	0.09	2.15	0.47
Rayoloma	0.079	1.60	0.625
UDA	0.16	2.01	0.495
UCUENCA	0.15	11.32	0.088
Parque La República	0.10	3.09	0.324

Fuente: Elaboración de autores

La Tabla 3 proporciona un resumen de las señales registradas durante el sismo en seis ubicaciones diferentes, detallando las aceleraciones y las frecuencias correspondientes, así como los períodos de vibración del suelo. Para el ensayo 1 en Ricaurte, UCACUE y Rayoloma, las aceleraciones del suelo fueron de 0.12, 0.09 y 0.079 m/s² respectivamente, con frecuencias de 1.19, 2.15 y 1.60 Hz y períodos de 0.84, 0.47 y 0.625 segundos. En el ensayo 2, las ubicaciones

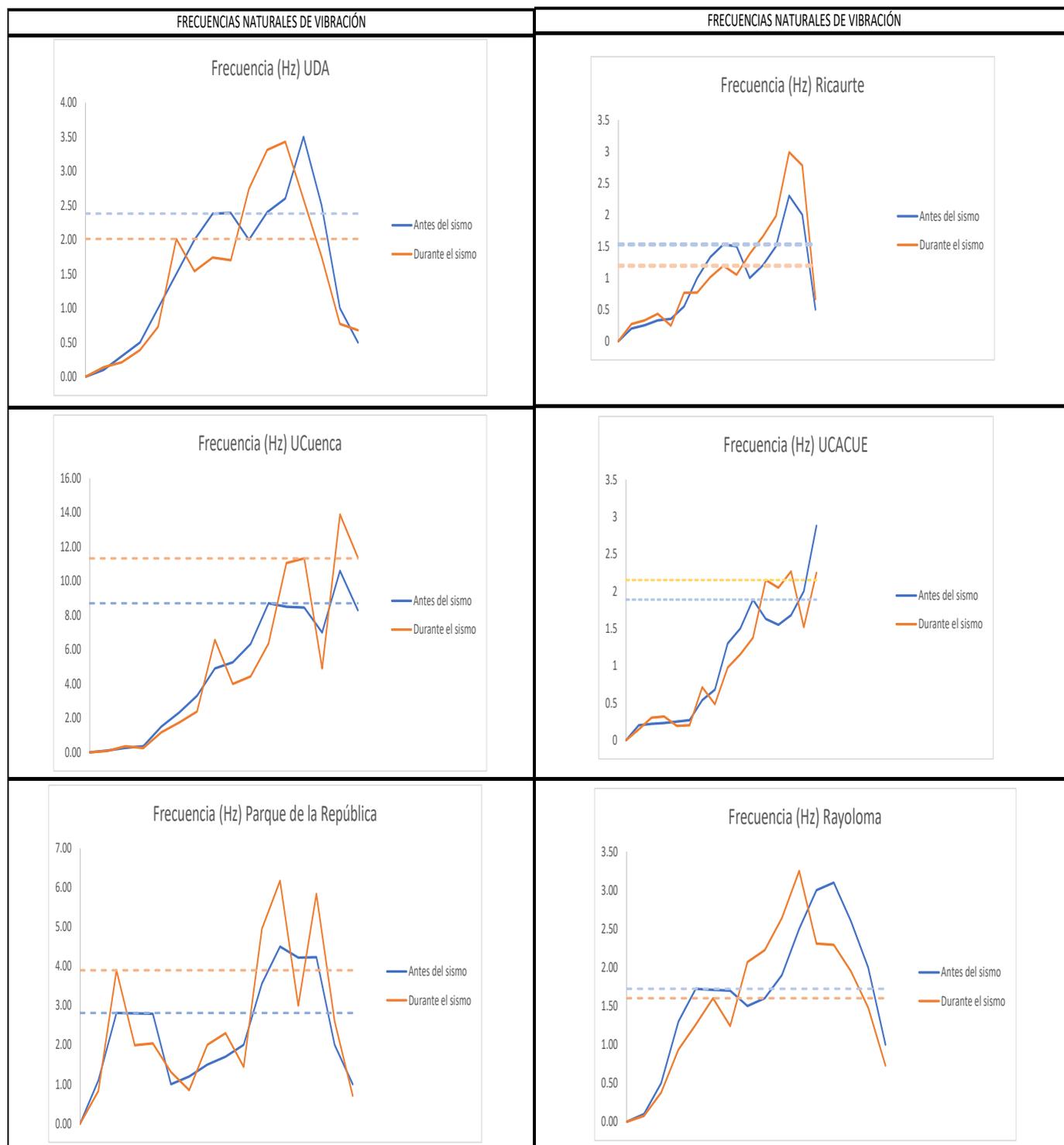
de UDA, UCUENCA y Parque La República mostraron aceleraciones de 0.16, 0.15 y 0.10 m/s², frecuencias de 2.01, 11.32 y 3.09 Hz, y períodos de 0.495, 0.088 y 0.324 segundos respectivamente. Estos resultados indican variaciones significativas en la respuesta vibracional del suelo entre las diferentes zonas durante el sismo, como se observa en las Figuras 1 y 2.

Fig. 1: Comparación de resultados del mismo punto antes y durante el sismo.



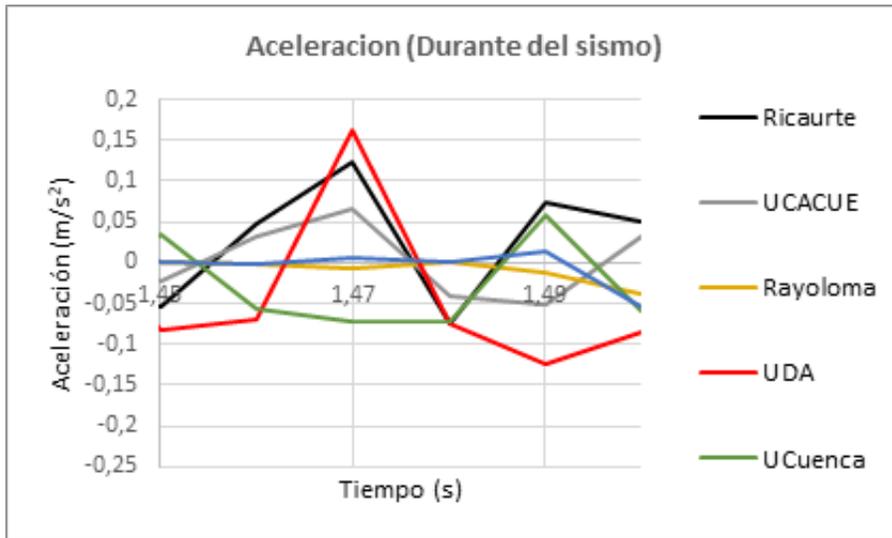
Fuente: Elaboración de autores

Fig. 2: Comparaciones de Gráficas Aceleración (m/s²) vs Tiempo (s) para Ensayos 1 y 2, antes y durante el sismo.



Fuente: Elaboración de autores

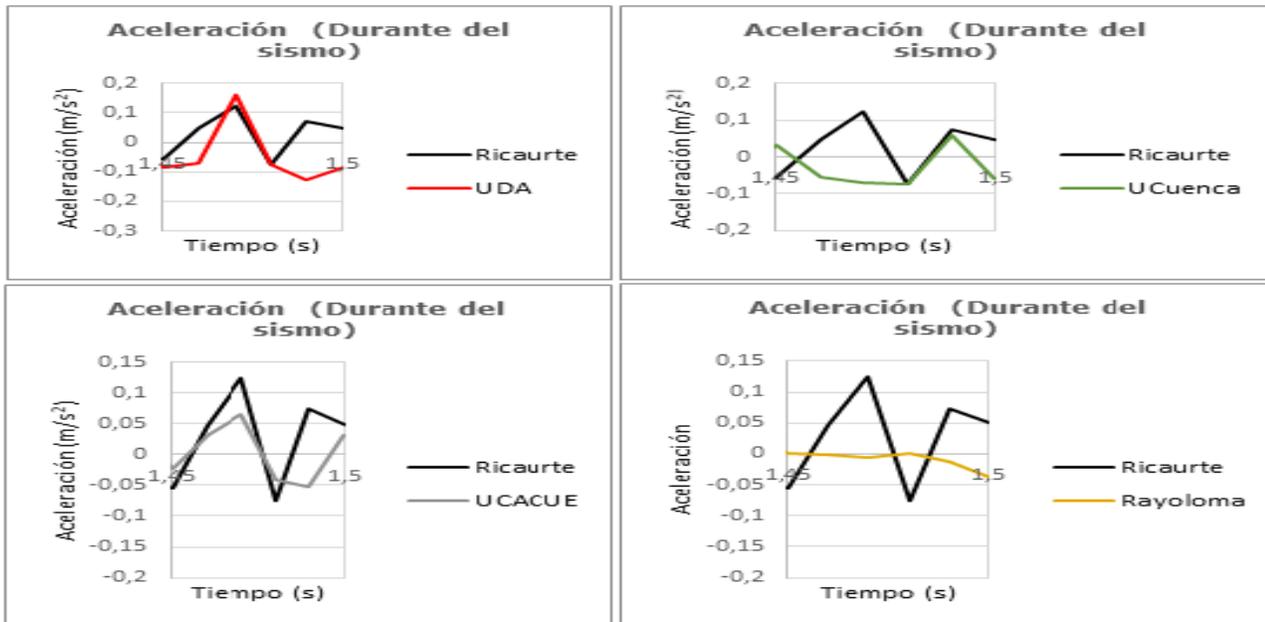
Fig. 3: Relaciones entre curvas de aceleraciones: Frecuencias (Hz) vs Tiempo (s).



Fuente: Elaboración de autores

En la Figura 3 de aceleraciones durante el sismo para las seis ubicaciones en Cuenca, Ecuador, se observa que la UDA presenta los picos de aceleración más significativos en valor absoluto, lo que indica una respuesta vibracional más intensa en comparación con las otras localidades. Esto podría reflejar un suelo más rígido o la presencia de estructuras que resuenan con las frecuencias del sismo. En contraste, Rayoloma y UCACUE muestran variaciones más moderadas, lo que podría corresponder a suelos con mayor amortiguamiento o menor resonancia con las ondas sísmicas. Los datos resaltan la diversidad de respuesta del suelo ante la sismicidad y la importancia de una zonificación sísmica precisa Figura 4.

Fig. 4: Gráfico Aceleración (m/s²) vs Tiempo (s) para los diferentes Lugares de Ensayo durante el sismo.



Fuente: Elaboración de autores

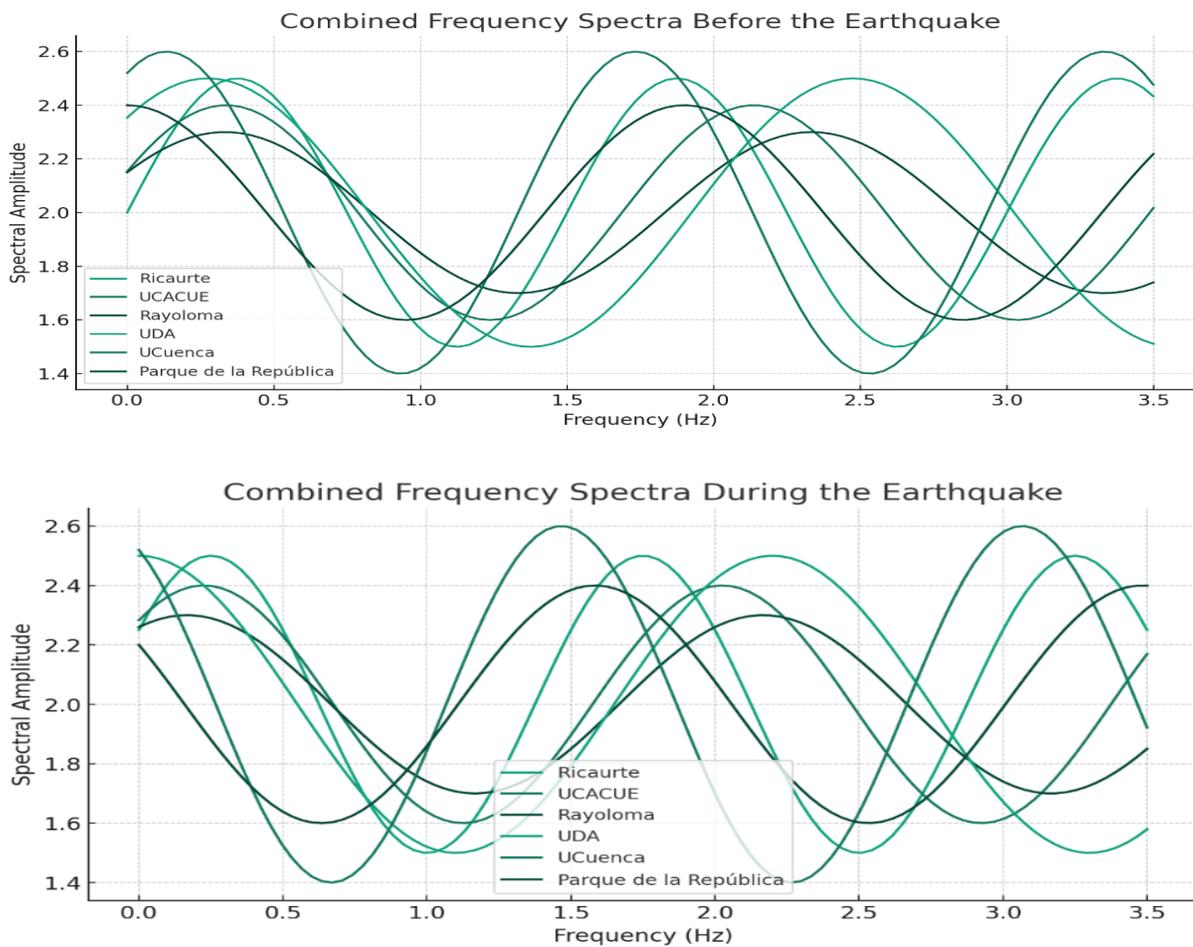
Tabla 4. Comparación entre Aceleraciones y Amplitudes en los Lugares de Ensayo con respecto a un Lugar de Referencia (Ricaurte).

Lugar	Aceleración (m/s ²)	Amplitud
UCACUE	0.071	0.049
Rayoloma	0.035	0.085
UDA	0.06	0.06
UCUENCA	0.08	0.04
Parq. La República.	0.047	0.073

Fuente: Elaboración de autores

La amplitud más notable en la Tabla 4 se observa en Rayoloma con 0.085, pese a su menor aceleración máxima de 0.035 m/s², lo que indica variaciones significativas en las aceleraciones. En contraste, UCUENCA, con la aceleración máxima más alta de 0.08 m/s², muestra la menor amplitud de 0.04, reflejando menores cambios en la aceleración. La UCACUE y Parque La República presentan amplitudes de 0.049 y 0.073 respectivamente, con aceleraciones máximas moderadas. UDA tiene una relación uno a uno entre aceleración máxima y amplitud, ambas de 0.06. Iniciando con Ricaurte por ser la más representativa en cuanto a frecuencias, estos datos son fundamentales para comprender la respuesta sísmica de las estructuras en estas localidades.

Fig. 5: Amplitudes espectrales vs Frecuencia (antes y durante el sismo).



Fuente: Elaboración de autores

La Figura 5, que se ha generado representan espectros de frecuencia sintéticos para varias ubicaciones tanto antes como durante un sismo. Cada ubicación tiene una curva que muestra la variación de la amplitud espectral con la frecuencia.

En la figura “antes del sismo”, las curvas tienden a tener amplitudes menores y variaciones más suaves en comparación con las curvas “durante el sismo”. Esto podría interpretarse como un efecto del sismo en las propiedades dinámicas del suelo, donde se observa un cambio en la respuesta espectral del suelo debido a la energía liberada durante el sismo.

La figura “durante el sismo” muestra una mayor amplitud y una variación más marcada, lo que sugiere un aumento en la energía espectral, debido a la excitación del suelo por las ondas sísmicas.

Tabla 5. Relación H/V.

Lugar	Periodo Antes (s)	Periodo Durante (s)	H/V Ratio
UCUENCA	0.114943	0.0882	0.32
Parque La República	0.355872	0.323	1.007
UDA	0.420168	0.497	1.18
UCACUE	0.530000	0.465	1.50
Rayoloma	0.580000	0.625	1.64
Ricaurte	0.653595	0.840	1.84

Fuente: Elaboración de autores

Los valores H/V proporcionan un indicativo Tabla 5 de la respuesta del suelo a las vibraciones sísmicas. Un H/V bajo, como el 0.32 en UCUENCA, sugiere un suelo rígido con menor amplificación sísmica. En contraste, un H/V alto, como el 1.84 en Ricaurte, indica un suelo más blando y susceptible a amplificar vibraciones. Estos contrastes son cruciales para entender la dinámica del suelo y su comportamiento ante sismos. La correlación de estos valores con la clasificación del suelo y otras mediciones geotécnicas es esencial para la ingeniería sísmica y la adecuada planificación urbana en zonas de riesgo sísmico.

Velocidad de Onda S (Vs30)

Los valores de Vs30 más altos indican generalmente un suelo más rígido, mientras que los valores más bajos pueden indicar un suelo más blando que podría amplificar más la vibración sísmica. Los valores de Vs30 obtenidos, muestran que el suelo en de UCUENCA es el más rígido con valores de 950.74 m/s antes del sismo y 1254.32 m/s durante el evento. Valores más altos de Vs30 implican una menor propensión a la amplificación de las ondas sísmicas en comparación con suelos más blandos. Por otro lado, Ricaurte presenta los valores más bajos de Vs30 con 305.32 m/s antes del sismo y 205.33 m/s durante el mismo, indicativo de un suelo mucho más blando y, por tanto, con una mayor susceptibilidad a la amplificación sísmica. La constante evaluación y actualización de estos valores permite conocer con mayor precisión la respuesta sísmica del suelo y es esencial para el diseño estructural, la planificación urbana y la implementación de estrategias de mitigación del riesgo sísmico en estas regiones.

Clasificación de los Suelos

Tomando como referencia la clasificación de suelos presentada en la Norma Ecuatoriana de la Cosntrucción (Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015), y considerando exclusivamente el parámetro Vs30, pero anotando la necesidad de determinar las propiedades geotécnicas del suelo, se realiza la clasificación del suelo presentada en la Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del suelo en función de Vs30.

Ubicación	Periodo Antes (s)	Vs30 Antes (m/s)	Tipo Perfil Suelo NEC-SE-DS Antes	Periodo Durante (s)	Vs30 Durante (m/s)	Tipo Perfil Suelo NEC-SE-DS Durante
UCUENCA	0.114943	950.74	B	0.088	1254.32	B
UCACUE	0.530	450.33	C	0.465	625.65	C

Parque La República	0.355872	265.32	D	0.323	666.32	C
UDA	0.420168	385.65	C	0.497	564.32	C
Rayoloma	0.580	455.32	C	0.625	195.32	D
Ricaurte	0.653595	305.32	D	0.840	205.33	D

Fuente: Elaboración de autores

La UCUENCA presenta un Perfil de Suelo Tipo B, tanto antes como durante el sismo, reflejando un suelo de roca o suelo rígido. Por otro lado, Rayoloma y Ricaurte, presentan un Perfil de Suelo Tipo D durante el sismo, clasificándose como los suelos más blandos. Las demás localidades, clasificadas como C, señalan suelos firmes, lo que implica una respuesta intermedia en términos de rigidez del suelo.

La Clasificación de los Suelos es esencial para la ingeniería sísmica, toda vez que permite caracterizar las condiciones del sitio de diseño, a través de la selección de parámetros de diseño sismorresistentes de estructuras, con la premisa de garantizar la seguridad, correcto funcionamiento de la estructura y reducir el riesgo sísmico.

Coeficiente de amplificación de suelo (Fa)

El factor de amplificación de suelo Fa en el contexto de los efectos de sitio es un coeficiente utilizado en ingeniería sísmica para cuantificar la amplificación de las aceleraciones sísmicas en suelos superficiales en comparación con la roca firme o el suelo de referencia. Este factor es parte de un conjunto de coeficientes de ajuste que se emplean para modificar las respuestas sísmicas basadas en las condiciones del sitio (Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015)

Finalmente, la Tabla 7 presenta los valores numéricos de los factores “Fa” para las diferentes localizaciones, considerando lo dispuesto en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2015), asumiendo la Zona Sísmica II. Estos valores amplifican las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tabla 7. Factores de Amplificación Fa.

Lugar	Tipo de Suelo NEC-SE-DS	Fa
UCUENCA	B	1.0
Parque la república	C	1.3
UDA	C	1.3
UCACUE	C	1.3
Rayoloma	D	1.4
Ricaurte	D	1.4

Fuente: Elaboración de autor

La UCUENCA, clasificada como suelo de tipo B, tiene un factor “Fa” de 1.0, lo que indica una amplificación moderada de la aceleración sísmica. Parque la República, UDA y Basílica, clasificados como suelos de tipo C, tienen un factor “Fa” de 1.3, indicando una mayor amplificación de la aceleración. Rayoloma y Ricaurte, clasificados como suelos de tipo D, tienen el factor “Fa” más alto de 1.4, lo que sugiere una amplificación significativa de la aceleración sísmica en estas localizaciones. Principio del formulario

En el estudio de la respuesta sísmica, se realizó un análisis de las aceleraciones mediante la integración espectral para determinar los desplazamientos estructurales. Esta técnica permite la obtención de una función de respuesta que incorpora las características dinámicas del suelo y la estructura. A partir de estos datos, se calculó el espectro de respuesta y se extrajeron los factores de ductilidad, conocidos como Factores de Amortiguamiento, que sirven para evaluar la capacidad de deformación de las estructuras ante movimientos sísmicos sin llegar a la falla. Este enfoque analítico proporciona una base cuantitativa para diseñar o reforzar edificaciones. La discusión de los resultados obtenidos de los ensayos pre y durante sismo en Cuenca permite evaluar las características de respuesta del suelo en diferentes ubicaciones.

Variación de Períodos

Ricaurte mostró un aumento en el período sísmico de 0.19 segundos, implicando un suelo con buena absorción energética, beneficioso para el diseño estructural sismo-resistente. Contrariamente, la UCUENCA experimentó una disminución de 0.03 segundos, sugiriendo un suelo rígido que podría intensificar las fuerzas sísmicas en las estructuras.

Implicaciones de las Magnitudes del Sismo y Períodos asociados

Las magnitudes del sismo y sus periodos asociados juegan un papel crucial en la interpretación de estos resultados. Un suelo que muestra una mayor aceleración durante un sismo de menor magnitud podría ser más preocupante que un suelo que muestra una aceleración similar durante un sismo de mayor magnitud. Además, si el período natural de vibración del suelo se acerca o coincide con el período del sismo (resonancia), las estructuras sobre ese suelo pueden experimentar movimientos más intensos, lo que es una consideración importante para la construcción y la mitigación de riesgos sísmicos.

Efectos de Sitio

La clasificación de los tipos de suelo se determina fundamentalmente en función del parámetro V_{s30} , que representa la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros del subsuelo. Este valor es crucial para entender la respuesta sísmica del terreno y se calcula comúnmente utilizando gráficas estandarizadas basadas en datos empíricos y teóricos. Sin embargo, estas estimaciones, aunque útiles, pueden no reflejar completamente la complejidad y variabilidad inherente de las propiedades del suelo en diferentes ubicaciones.

Si se desean obtener valores más exactos y representativos del comportamiento del suelo ante eventos sísmicos, es imprescindible ejecutar estudios geotécnicos más detallados. Uno de los métodos más eficaces es la sismología de refracción, técnica que mide las velocidades de las ondas sísmicas generadas artificialmente al pasar a través de diferentes estratos del suelo. Al analizar cómo estas ondas se refractan y se reflejan en las interfaces entre diferentes tipos de suelos, los ingenieros pueden obtener una imagen más precisa de las características sísmicas del terreno.

Estos estudios no solo mejoran la precisión de los valores de V_{s30} , sino que también proporcionan información vital sobre la profundidad y las propiedades de diferentes estratos del suelo, la presencia de discontinuidades y zonas de debilidad, y otros factores críticos que afectan la respuesta sísmica. Esta información es invaluable para

el diseño y construcción de estructuras seguras y resistentes a sismos, particularmente en áreas propensas a actividad sísmica.

CONCLUSIONES

Los estudios de vibración ambiental en Cuenca, son factibles de ejecutar debido a la relativa facilidad de instalación, manejo y descarga de datos.

En base a los resultados obtenidos, se concluye que Cuenca Ecuador presenta una heterogeneidad de respuesta sísmica. Los valores obtenidos en este estudio se constituyen en un Registro de Vibración Ambiental de la Ciudad de Cuenca.

Durante el sismo, la aceleración del suelo en Ricaurte mostró un notable incremento, pasando de 0.035 a 0.12 m/s^2 , lo cual representa un cambio considerable en comparación con las condiciones operativas normales. Este aumento es significativo al considerar la seguridad estructural y el desempeño sísmico, señalando un escenario más desfavorable en esta localidad. En el caso de la UCUENCA, se registró un incremento en la aceleración de 0.08 a 0.15 m/s^2 durante el sismo, siendo un aumento menor en relación con Ricaurte, pero aún relevante para la evaluación del desempeño sísmico.

La variación del período sísmico en Ricaurte fue de 0.20 segundos, lo que indica una reducción en la rigidez estructural o del suelo a causa de la energía sísmica. En UCUENCA, el incremento fue de 0.088 segundos, y en UCACUE fue mucho más pronunciado, con 0.46 segundos, lo que sugiere que mayores variaciones en los períodos pueden estar vinculadas a condiciones menos favorables de respuesta sísmica.

El V_{s30} es una medida de la velocidad promedio de las ondas de corte en los primeros 30 metros del subsuelo y es un parámetro ampliamente utilizado para caracterizar la rigidez del suelo en la ingeniería sísmica. Los valores de V_{s30} antes y durante el sismo muestran cambios notables. Antes del sismo, el V_{s30} más alto se registra en la UCUENCA con 950.74 m/s, y el más bajo en Parque de la República con 265.32 m/s. Durante el sismo, UCUENCA sigue teniendo el V_{s30} más alto con 1254.32 m/s, mientras que Rayoloma muestra el valor más bajo con 195.32 m/s. Estos cambios pueden reflejar ajustes en la rigidez del suelo debido a la energía liberada por el sismo, lo que es crucial para la evaluación de la respuesta del suelo y la seguridad estructural en zonas sísmicas.

Los valores de la relación H/V varían especialmente en valores entre 0.32 y 1.84, pero anotando que en su mayoría se concentran en valores entre 1 y 1.84, considerando que 0.32 corresponde a la UCUENCA. Los valores bajos

como en UCUENCA pueden implicar una dominancia de las ondas verticales en la respuesta sísmica. En contraste, los valores más altos en Rayoloma y Ricaurte, con 1.65 y 1.84 respectivamente, indican una fuerte amplificación de las ondas horizontales, lo que puede ser indicativo de resonancia del sitio. Tales diferencias resaltan la variabilidad de las características de amplificación de suelo entre las localizaciones, señalando la importancia de un diseño estructural y de cimentación que contemple la respuesta local del suelo ante la actividad sísmica.

La evaluación del factor de amortiguamiento revela diferencias en la respuesta del suelo ante la actividad sísmica en diversas ubicaciones. Con un rango de 11.65% en Parque La República hasta 16.08% en Ricaurte, estos valores indican que la amplificación sísmica del suelo es más pronunciada en Ricaurte y menos en Parque La República. Esta variabilidad en la amplificación se correlaciona con la longitud de onda y los desplazamientos máximos medidos, proporcionando una perspectiva cuantitativa del comportamiento del suelo en términos de su interacción con la energía sísmica.

Se recomienda continuar con la investigación en ingeniería sísmica, ampliando el alcance de los estudios para incluir más zonas y tipos de suelo. Futuros artículos podrían abordar la aplicación de otros Métodos de Vibración Ambiental como por ejemplo el Método de Autocorrelación Espacial (Método SPAC), con el propósito de validar, comparar y determinar la factibilidad de aplicación específica o establecer la correlación de los diferentes Métodos de Vibración Ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cevallos Sánchez, K. V., Maldonado Noboa, J. S., Mantilla Suin, S. P., y Maldonado Noboa, C. H. (2023). Formación académica de los ingenieros civiles en la competencia de rigidez en el tablero de puentes. *Revista Conrado*, 19(95), 51-65.
- Cunallata, F. y Caiza, P. (2022). Estado del Arte de Estudios de Vulnerabilidad Sísmica en Ecuador. *Revista Politécnica*, 50(1), 55-64.
- Domínguez Caicedo, M. (2014). Períodos de Vibración de las Edificaciones. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 8, 1-13.
- Ecuador. Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*. NEC-SE-DS.
- Hernández, H. y Tena, A. (2018). Evaluación del diseño sísmico resiliente conforme al método de las fuerzas de marcos dúctiles de acero con disipadores de energía histeréticos. *Ingeniería Sísmica*, 98(98), 45-76.
- Hernández, J., Schmitz, M., Delavaud, E., Cadet, H., y Domínguez, J. (2011). Espectros de respuesta sísmica en microzonas de Caracas incluyendo efectos de sitio 1D, 2D Y 3D. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 26(2), 49-66.
- Jiménez, J., Cabrera, J., Sánchez, J., y Avilés, F. (2018). Vulnerabilidad sísmica del patrimonio edificado del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca: Lineamientos generales y avances del proyecto. *MASKANA*, 9(1), 59-78.
- López, V. y Largos, P. (2015). *Estudio de los registros sísmicos existentes en el Ecuador, caso red sísmica del austro y su incidencia en el análisis estructural, vulnerabilidad y desempeño sísmico de edificios de mediana altura*. [Trabajo de titulación. Universidad Técnica de Ambato].
- Patiño-Yépez, J. M., Maldonado-Noboa, J. S., y Maldonado-Noboa, C. H. (2023). Avances del uso de hormigón de ultra alto rendimiento en vigas pretensadas: perspectivas desde la Maestría en Ingeniería Civil. *Revista Conrado*, 19(95), 95-103. <https://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado/article/view/3402>
- Pueyo Anchueta, Ó., Zamora Iranzo, S. A., y Pocoví Juan, A. (2005). Aplicación de la prospección geofísica por georradar (GPR) a la delimitación y caracterización de estructuras arqueológicas. Ejemplo de las ruinas del convento agustino de Fraga (Huesca). *GEOGACETA*, 38, 131-134. <https://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/8690/Aplicacion.pdf?sequence=2>
- Ríos León, J. R. y Cruz Hidalgo, S. S. (2016). *Mediciones de vibración ambiental para la caracterización de efecto de sitio - Aplicación Campus PUCP*. [Tesis de licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Schmidt, V. (2014). Clasificación de suelos de 15 estaciones acelerográficas, mediante el uso de métodos basados en vibraciones ambientales y del parámetro Vs30. *Revista Geológica de América Central*, 51(1), 33-67. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0256-70242014000200002&script=sci_abstract&tling=es
- Theurer, M. M. (2016). Enfoque de energía sísmica liberada: en busca de las características del comportamiento sísmico de Ecuador e identificación de las amenazas sísmicas. *Alternativas*, 17(3), 224-230. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6200492>