

Artículo de investigación

Estudio sísmico determinista para estructuras en el sector “Ciudadela Oriente” de la Ciudad de Ambato.

William Mise-Flores^[1]  Fernanda Pico-Núñez^[1]  Andrés Almeida-Mayorga^[1]  Carlos Navarro-Peñaherrera^[1] 

[1] Universidad Técnica de Ambato (UTA). Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Ambato, Ecuador.

Autor para correspondencia: mf.pico@uta.edu.ec



Resumen

Los métodos necesarios para diseñar una estructura de un edificio de varios pisos, incluyen dentro de sus parámetros el cálculo de los espectros sísmicos de respuesta, debido a que los efectos de estos sobre los edificios dependen de la variabilidad de la aceleración máxima en el suelo (PGA), la altura y demás variables dentro de la misma, para ello, se puede utilizar un método de cálculo aplicado por la normativa, o mediante métodos determinísticos que permiten calcular un espectro de respuesta a partir de un ensayo de penetración estándar (SPT) y estudios de mecánica de suelos; esto mismo se puede replicar en varios puntos alrededor de una zona establecida. Así, cuando el tipo y la altura de la estructura que se planea analizar, varía, se pueden considerar los resultados estructurales tanto con los métodos determinísticos como con el espectro calculado mediante la normativa, al compararlos, se logra identificar la viabilidad de aplicar uno u otro método en las estructuras idealizadas.

Palabras Clave: *estructura, espectro de respuesta, aceleración máxima del suelo, sísmica.*

Deterministic seismic study for structures in the “Ciudadela Oriente” sector of Ambato city.

Abstract

The necessary methods to design a structure of a building with many stories, include in their parameters the calculus of seismic response spectrum, because this effects over the buildings depends of the variability of the peak ground acceleration (PGA), the height and some other variables inside it, for that, it's possible to use a calculus method applied by the norm standards, o by deterministic methods which ones allows to calculate the response spectrum begging on an standard penetration test (SPT) and other mechanical soil studies; this can be replicated above several points around the stablished zone. From there, when the type and the height of the planning analyzed structures change, it can be considered the structural results as the calculated deterministic methods as the results obtained by the norm standards, once compared, can be identified the viability to applicate one or other method in the idealized structures.

Keywords: *structure, response spectrum, peak ground acceleration, seismicity.*

1. Introducción

Con el fin de la planificación y construcción de edificaciones seguras, es prioritario el estudio del peligro sísmico, dando prioridad a zonas propensas a movimientos tectónicos intensos. Ecuador está geográficamente localizado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, que es una de los lugares sísmicamente más activos del planeta debido a una zona de subducción entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana.

Por la presencia de este deslizamiento de placas tectónicas, se han originado eventos sísmicos históricos de gran magnitud, como el terremoto de Esmeraldas de 1906 (Mw 8.8), y el terremoto de Ambato de 1949 (Mw 6.8), que dejó daños significativos en ambas regiones. Bajo esta premisa, el estudio del peligro sísmico se vuelve un requisito obligatorio para reducir la vulnerabilidad estructural y proteger a las comunidades (Instituto Geofísico Militar-IGM, 2012).

El cantón Ambato, esta caracterizado como una zona de alto riesgo sísmico, por la presencia de fallas geológicas activas y a la tipología de sus suelos, generalmente clasificados como tipo D según la Norma Ecuatoriana de la Construcción. (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2015). Los suelos tipo D corresponden a suelos rígidos que amplifican las ondas sísmicas, provocando el aumento de intensidad de sus vibraciones, consecuentemente aumentando la probabilidad de daños estructurales. La zona en estudio presenta un alto número de edificaciones de uno a cinco pisos, que carecen de diseños estructurales adecuados para resistir sismos significativos.

El análisis de peligro sísmico tiene dos enfoques principales: probabilístico y determinista. Por una parte, el método probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar de una manera racional las incertidumbres acerca de la ubicación, tamaño y recurrencia de un terremoto, logrando así proveer una mejor evaluación de la amenaza sísmica (Aguilar et al., 2013). Por otra parte, el método determinista, crea un escenario donde se desarrolle un sismo de especificado en un lugar determinado, con el fin de identificar el impacto máximo esperado en un área dada. Esta metodología permite diseñar medidas específicas para mitigar riesgos, en regiones con alta densidad poblacional y estructuras críticas. (Aguilar et al., 2013).

En este documento, se presenta un análisis sísmico determinista para el sector “Ciudadela Oriente”, perteneciente a la parroquia Huachi Loreto, al sur Oeste de la ciudad de Ambato. La zona de estudio tiene la particularidad de que se ha sentido la intensidad de terremotos pasados que han tenido su hipocentro en diferentes lugares del país (Diario la Hora, 2002). Se identificaron cinco fallas tectónicas. Las cuatro primeras fallas con del tipo cortical (Huachi, Ambato, Totoras y

Samanga), la última falla es la de subducción que bordea todo el perfil costero del Ecuador (Instituto Geofísico Militar IGM, 2012). Además, se realizaron perforaciones in situ con el propósito de caracterizar el suelo mediante ensayos de penetración estándar (SPT) y determinar la velocidad promedio de la onda de corte (V_{s30}). Con estos datos, se generaron espectros de respuesta sísmica utilizando ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPEs), que posteriormente se compararon con el espectro de diseño de la NEC-15.

2. Metodología

Como paso inicial en la investigación se definió el área de estudio en el sector “Ciudadela Oriente”, del cantón Ambato de la provincia de Tungurahua. Debido a la vulnerabilidad sísmica del lugar y su proximidad a fallas activas que han generado movimientos sísmicos históricos de magnitudes considerables. El área delimitada incluye las calles Bolivariana, Los Chasquis, Letamendi y Seymour, cubriendo zonas residenciales y estructuras representativas de distinta altura.

Para el desarrollo del método determinista, se identificaron fallas activas que tienen una influencia directa en el área de estudio. Cuatro de ellas son del tipo cortical que se caracterizan por presentar movientes superficiales y cernamos a la zona de estudio. Las fallas son: Huachi, Ambato, Totoras y Samanga, como se muestra en la Figura 1. Y una falla de subducción relacionada con el cheque de la placa de Nazca y la Sudamericana (Instituto Geofísico Militar IGM, 2012).

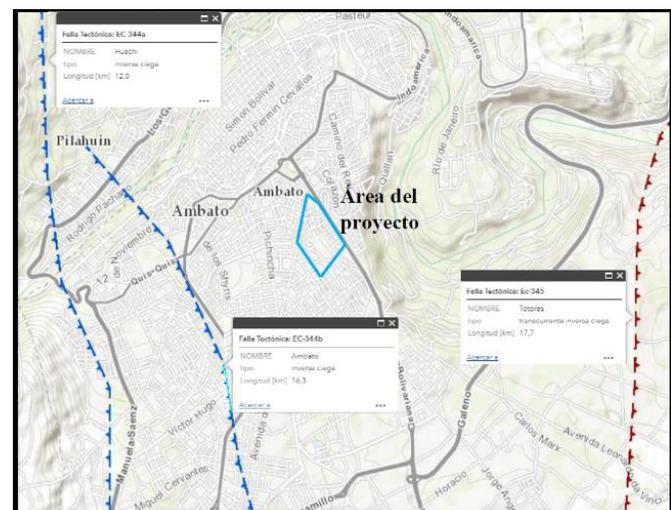


Figura 1: Área del proyecto y fallas activas Huachi, Ambato y Totoras. Fuente: Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Una vez identificadas las fallas se realizó una caracterización del suelo a través de ensayos de campo y análisis geotécnico.

Empleando el ensayo de penetración estándar (SPT) (NTE INEN 0689, 1982). Se realizaron cinco perforaciones en lugares estratégicos en el área de estudio, con el fin de contabilizar el número de golpes necesario para hincar el muestreador en el suelo hasta profundidades donde se encuentre estrato firme. De cada perforación se recogió muestras de suelo para determinar granulometrías.

Con los resultados de cada muestra y con ayuda del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Juárez & Rico, 1976), de determinó la tipología del suelo (Tabla 1), y con el cálculo de la velocidad de las ondas de corte, se determinó la tipología de suelo según la Norma ecuatoriana de la Construcción NEC-15.

Tabla 1: Clasificación de suelos SUCS. Fuente: (ASTM D2487, 1970)

División Principal		Símbolo del Grupo	Nombres Típicos		
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido en el tamiz No. 4	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos finos o sin finos		
		GP	Gravas y mezclas de gravas y arenas mal gradadas con pocos finos o sin finos		
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas de grava y limo	
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava y arcilla	
	ARENAS Más del 50% de la fracción gruesa para el tamiz No. 4	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos finos o sin finos	
			SP	Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos finos o sin finos	
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
			LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido de 50% o inferior	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas
				CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas arenosas, suelos con mucha arcilla
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido superior a 50%	MH	Limos inorgánicos, arenas finas limosas o arcillosas, limos elásticos			
	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta, arcillas gordas			
	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta a media, arcillas limosas orgánicas			
Suelos altamente orgánicos		PT	Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos		

Con el propósito de determinar el comportamiento del suelo y su impacto en las estructuras, se generaron espectros de respuesta mediante modelos GMPeS (*Ground Motion Prediction Equations*). Estos modelos trabajan en función de parámetros como magnitud, distancia y condiciones locales. Para el estudio de peligro determinista se utilizaron las ecuaciones de predicción de Atkinson y Boore, Akkar y

Bommer y Kanno, validadas por el *Global Earthquake Model*, para las fallas corticales.

El modelo Boore y Atkinson, se basa en la predicción de movimientos sísmicos en sitios con condiciones de suelo blando, su ecuación (1) considera datos como la magnitud del sismo, la distancia del epicentro, las características del sitio y el tipo de falla (Boore & Atkinson, 2008).

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \epsilon \quad (1)$$

Donde:

Y: Valor de la aceleración PGA (Aceleración Máxima del Suelo)

F_M: Ecuación en base a la escala de magnitud.

M: Magnitud de momento (Wells & Coppersmith, 1994).

F_D: Ecuación en función de la distancia *R_{JB}*.

R_{JB}: Distancia a partir de donde se libera la energía hasta el punto de estudio o distancia fuente.

F_S: Ecuación en función de la ampliación de sitio.

V_{S30}: Velocidad media de la onda de corte.

ε: Desviación estándar.

En el caso del modelo Akkar y Bommer, su ecuación (2) de predicción de movimiento del suelo fue desarrollada para estimar parámetros como la aceleración máxima del suelo (PGA), la velocidad máxima del suelo (PGV) y aceleraciones espectrales (SA). Este modelo se basa en un análisis estadístico de registros sísmicos, considerando variables como la magnitud del sismo, la distancia a la fuente, el tipo de falla y las condiciones de sitio (Akkar & Bommer, 2010).

$$\log Y = b_1 + b_2 M + b_3 M^2 + (b_4 + b_5 M) \log \sqrt{R_{JB}^2 + b_6^2} + b_7 S_S + b_8 S_A + b_9 F_N + b_{10} F_R + \epsilon \sigma \quad (2)$$

Donde:

Y: Valor de la aceleración PGA (Aceleración Máxima del Suelo)

b₁, b₂, ..., b₁₀: Coeficientes de regresión

M: Momento de Magnitud (Wells & Coppersmith, 1994).

R_{JB}: Distancia a partir de donde se libera la energía hasta el punto de estudio o Distancia Fuente.

S_S: Coeficiente para suelo rígido.

S_A: Coeficiente para suelo blando.

F_N: Falla Normal.

F_R: Falla Inversa.

ε: Número de desviación estándar.

σ: Desviación estándar.

De la misma manera el modelo de Kanno está enfocado en predecir el movimiento del suelo (GMPE); su ecuación (3) fue desarrollada para estimar la aceleración máxima del suelo (PGA), también basado en un extenso conjunto de datos sísmicos, considerando variables como la magnitud del sismo, distancia a la fuente y las características del sitio. (Kanno, 2006)

$$\log pre = a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 * 10^{e1M_w}) + C_1 \quad (3)$$

Donde:

pre: Valor de la aceleración PGA (Aceleración Máxima del Suelo)

a₁, b₁, c₁, d₁: Coeficientes de regresión para eventos superficiales.

M_w : Momento de Magnitud. (Wells & Coppersmith, 1994)
 X : Distancia Fuente – Sitio.
 D : Profundidad Focal.
 e_1 : Base de logaritmo natural
 F_N : Falla Normal.
 F_R : Falla Inversa.
 ϵ : Número de desviación estándar.

Por otra parte, para la falla de subducción se emplearon las ecuaciones de predicción de Youngs, Zhao y Lin & Lee, mismas que están validadas por el Global Earthquake Model. Youngs plantea una ecuación (4) de predicción de movimiento del suelo permitiendo estimar la aceleración máxima del suelo (PGA) en zonas de subducción. esta metodología es ampliamente utilizada en estudios de ingeniería sísmica y evaluación de riesgos (Youngs et al., 1997).

$$\ln(y) = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(R + 1.097e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (4)$$

Donde:
 y : Valor de PGA (Aceleración Máxima del Suelo) expresada en g.
 M : Momento de Magnitud. (Wells & Coppersmith, 1994)
 C_1, C_2, C_3 : Coeficientes de regresión para eventos de subducción
 R : Distancia Fuente-Sitio (km).
 H : Profundidad Focal (km).
 Z_T : Tipo de falla Tectónico.
 e : Base de logaritmo natural

El modelo de Zhao está definido por la ecuación (5); esta considera variables como la magnitud del sismo, la distancia a la fuente, la profundidad focal y las condiciones de sitio clasificadas como roca dura, roca, suelo duro, suelo medio y suelo blando. Históricamente ha sido utilizada en estudios de peligro sísmico y evaluación de riesgos con actividad sísmica (Zhao et al., 2023).

$$\log Y = aM_w + bX - \log(r) + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_L + S_S + S_{SL} \log(X) + C_k \quad (5)$$

Donde:
 Y : Valor de PGA (Aceleración Máxima del Suelo).
 a, b : Coeficientes de regresión para el suelo de subducción.
 X : Distancia Fuente – Sitio.
 r : Coeficiente de amplificación en función de la distancia.
 e : Base de logaritmo natural.
 h : Profundidad focal.
 h_c : Profundidad focal.
 δ_h : Variable en función de h y h_c .
 F_R : Coeficiente para Fallas inversas.
 S_L : Coeficiente para Eventos de Interface.
 S_S : Coeficiente para Eventos de Intraplaca.
 S_{SL} : Término de modificación de ruta independiente de la magnitud para eventos de Intraplaca.
 C_k : Clase de sitio

Por último, el modelo de Lin & Lee, al igual que todos los vistos anteriormente, busca estimar la aceleración máxima del suelo (PGA). Ha sido utilizado en estudios de ingeniería sísmica y para evaluación de riesgos, que proporcionan

estimaciones para diseños sismorresistentes y en la planificación urbana. Su ecuación (6) de predicción toma en cuenta variables como magnitud del sismo, distancia a la fuente y consideraciones de sitio (Lin et al., 2023).

$$\ln(y) = C_1 + C_2M + C_3 \ln(R + C_4e^{C_5M}) + C_6H + C_7Z_T \quad (6)$$

Donde:
 Y : Valor de PGA (Aceleración Máxima del Suelo).
 C_1, C_2, \dots, C_7 : Coeficientes de regresión para sitios de suelo.
 M : Magnitud de Momento (Wells & Coppersmith, 1994)
 R : Distancia fuente-sitio.
 H : Profundidad Focal.
 Z_T : Tipo de Falla.

Todos los modelos mencionados fueron empleados para el cálculo de espectros determinados en la zona de estudio para cada una de las fallas seleccionadas (Huachi, Ambato, Totoras, Samanga y la falla por subducción). Todos estos espectros se combinaron en un único espectro crítico mediante una envolvente. Este espectro representa las máximas aceleraciones esperadas en la zona de estudio. A continuación, se evaluaron las estructuras locales, enfocándose en tres tipologías representativas: edificaciones de un piso, caracterizadas por su baja altura y menor rigidez estructural y edificaciones de tres pisos y de cinco pisos. Las edificaciones fueron sometidas al análisis estructural estático y dinámico.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del suelo

Mediante la ejecución de los ensayos de penetración estándar (SPT), se determinó que los valores de velocidad de corte (V_{s30}) (Ohta & Goto, 1978) oscilan entre 294.55 m/s y 330.27 m/s, dando un promedio de una velocidad de onda de corte de 311.78 m/s, entre todas las perforaciones (Tabla 2).

Con estos resultados se confirmó que en el área predomina los suelos tipo D según la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Esta clasificación indica suelos con baja rigidez, alta capacidad de amplificación sísmica y limitaciones de disipación de energía. También, con el análisis granulométrico se identificó que mayormente suelo finos con porcentajes significativos de limos y arcillas.

Tabla 2: Velocidad de ondas de corte de cada pozo y tipo de perfil de suelo (Mise, 2018).

# Pozos	V_{s30} (m/s)	V_{s30} Promedio (m/s)	Perfil del Suelo
1	307.51	311.78	D
2	294.55		
3	330.27		
4	301.77		
5	324.83		

3.2. Generación de espectros críticos

Se generaron espectros de respuesta específicos para cada una de las fallas identificadas en el área de estudio, empleando ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPEs). El análisis incluyó cuatro fallas corticales (Huachi, Ambato, Totoras y Samanga) y una falla asociada al fenómeno geológico de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana.

En la Figura 2, se presentan los espectros de respuesta de las fallas corticales utilizando el modelo de Boore y Atkinson. Los valores máximos de aceleración obtenidos para las fallas Huachi, Ambato, Totoras y Samanga fueron 0.72g, 0.95g, 0.79g y 0.68g, respectivamente, destacándose la falla Ambato como la más relevante en este modelo. Este comportamiento se repite al emplear los modelos de Akkar y Bommer, así como el modelo de Kanno, en los cuales la falla Ambato nuevamente presenta los valores más altos de aceleración, tal como se observa en las Figura 3 y Figura 4.

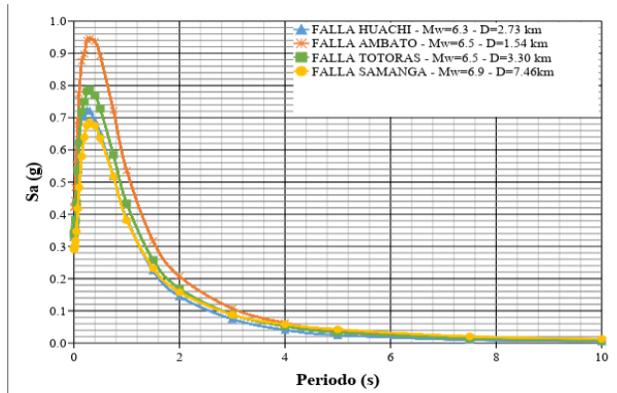


Figura 2: Espectro de aceleraciones obtenidos con el Modelo Boore y Atkinson.

Por otro lado, el espectro generado para la falla de subducción mostró mayores valores en periodos largos, reflejando la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud y profundidad. Mediante el uso de los modelos de Zhao, Youngs y Lin & Lee, se obtuvieron espectros de respuesta que se ilustran en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7. Los resultados indican que esta falla alcanzó valores de aceleración máxima de 0.51g, 0.50g y 0.59g en periodos de 0.2 segundos, 0.3 segundos y 0.5 segundos, respectivamente. Es importante señalar que cada una de las fuentes fueron evaluadas considerando parámetros clave como la magnitud de momento (Mw), la distancia epicentral y la profundidad focal.

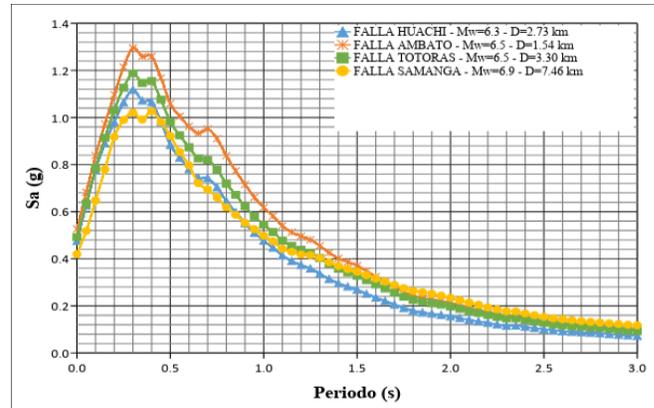


Figura 3: Espectro de aceleraciones obtenidos con el Modelo Akkar y Bommer.

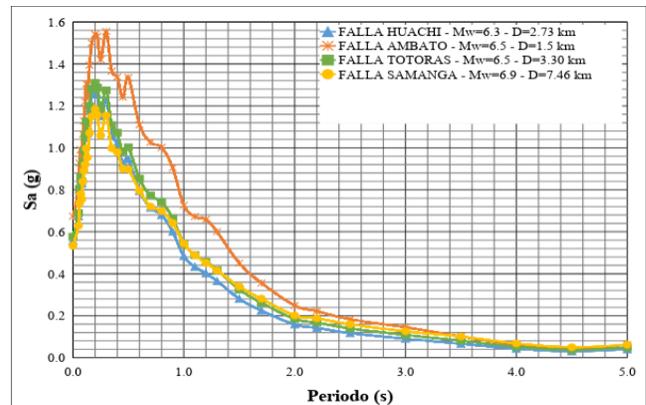


Figura 4: Espectro de aceleraciones obtenidos con el Modelo Kanno.

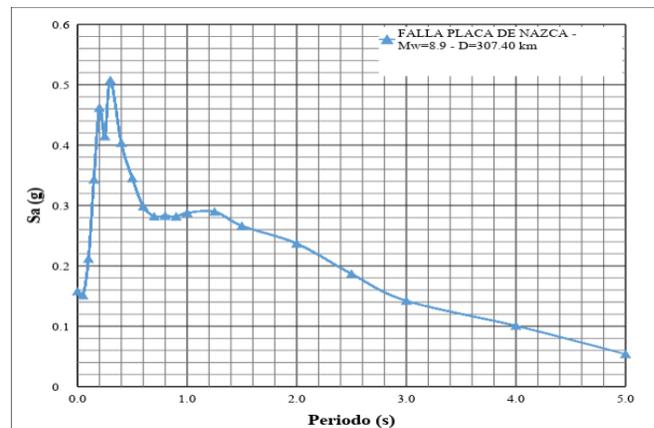


Figura 5: Espectro de aceleración obtenido con el Modelo Zhao.

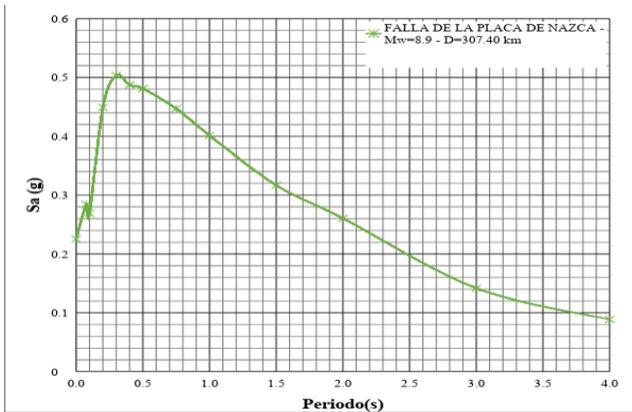


Figura 6: Espectro de aceleración obtenido con el Modelo Youngs.

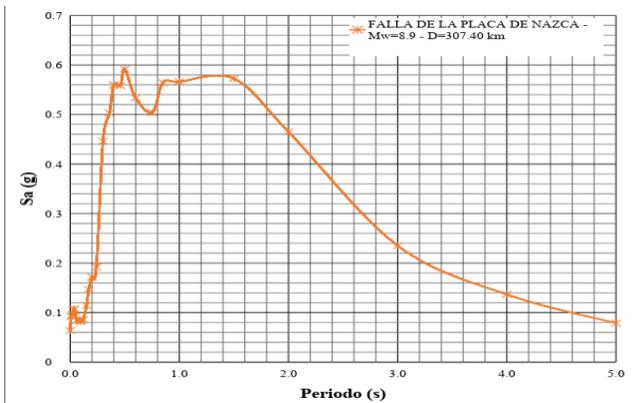


Figura 7: Espectro de aceleración obtenido con el Modelo Lin & Lee.

A forma de resumen se presenta la Tabla 3, donde se presenta las aceleraciones máximas determinadas por cada modelo implementado para cada una de las fallas, también se ha determinado las variaciones porcentuales de cada modelo para todas las fallas. Diez de las quince aceleraciones ocurrieron en un periodo de 0.3seg. que corresponde a un 66.67%, 4 de las 15 aceleraciones máximas se presentaron en un periodo de 0.2seg. que representan un 26.67% y finalmente solo una de las 15 aceleraciones máximas se manifestó en un periodo de 0.5seg. es decir, solo un 6.66% de todos los espectros generados.

También se realizó una comparación entre los espectros obtenido y el espectro de la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015. En el caso de la falla Huachi y la falla de Totoras, solo el modelo de Kanno sobrepasa el rango de valores de aceleración del espectro de la NEC-15, durante un breve intervalo de periodo para luego vuelva a estar dentro del rango. A diferencia de la falla Ambato, donde el modelo Kanno y el modelo Akkar y Bommer sobrepasan los valores de aceleración de la NEC-15, durante breves intervalos de periodo. Por último, para la falla Samanga y la falla de subducción, todos los espectros están dentro de los valores

de aceleración dados por el espectro de la NEC-15. Para las fallas corticales predominan periodos cortos y afectan a estructuras pequeñas, como las que predominan en el área de estudio, por otro lado, para la falla de subducción prevalecen periodos largos afectando a estructuras de gran altura.

Tabla 3: Aceleraciones máximas de cada falla.

FALLA DE HUACHI				
Modelo	Aceleración max.	Periodo T	Variación % de la Aceleración	
Atkinson y Boore	0.72g	0.3s	Atkinson-B y Akkar-B	35.71%
Akkar y Bommer	1.12g	0.3s	Akkar-B y Kanno	12.50%
Kanno	1.28g	0.2s	Atkinson-B y Kanno	43.75%
FALLA DE AMBATO				
Modelo	Aceleración max.	Periodo T	Variación % de la Aceleración	
Atkinson y Boore	0.95g	0.3s	Atkinson-B y Akkar-B	27.48%
Akkar y Bommer	1.31g	0.3s	Akkar-B y Kanno	15.48%
Kanno	1.55g	0.3s	Atkinson-B y Kanno	38.71%
FALLA DE TOTORAS				
Modelo	Aceleración max.	Periodo T	Variación % de la Aceleración	
Atkinson y Boore	0.79g	0.3s	Atkinson-B y Akkar-B	33.61%
Akkar y Bommer	1.19g	0.3s	Akkar-B y Kanno	9.16%
Kanno	1.31g	0.2s	Atkinson-B y Kanno	39.69%
FALLA DE SAMANGA				
Modelo	Aceleración max.	Periodo T	Variación % de la Aceleración	
Atkinson y Boore	0.68g	0.3s	Atkinson-B y Akkar-B	33.98%
Akkar y Bommer	1.03g	0.4s	Akkar-B y Kanno	12.71%
Kanno	1.18g	0.2s	Atkinson-B y Kanno	42.37%
FALLA DE SUBDUCCIÓN				
Modelo	Aceleración max.	Periodo T	Variación % de la Aceleración	
Zhao	0.51g	0.3s	Zhao y Youngs	1.96%
Youngs	0.50g	0.3s	Youngs y Lin-Lee	15.25%
Lin y Lee	0.59g	0.5s	Zhao y Lin-Lee	13.56%

Para generar el espectro crítico se combinaron los 14 espectros individuales generados seleccionando el valor máximo en cada periodo, obteniendo los valores como se muestra en la tabla 3.

El espectro crítico obtenido tiene un valor máximo de aceleración de 1.55g en un periodo de 0.3 seg., superando el valor máximo de aceleración Sa del espectro de la NEC-15, que tiene un valor de 1.19g durante un periodo de 0.0 seg. A 0.6 seg., donde la aceleración máxima del espectro crítico tiene un incremento del 23.23%. De los resultados obtenidos se determinó que el espectro crítico afecta a estructuras de baja altura, a diferencia de espectro de la normativa afecta a edificaciones de mayor altura (Figura 8).

Tabla 4: Valores de aceleración y periodos para el espectro determinístico.

Periodo T (s)	Sa (g)	Periodo T (s)	Sa (g)
0,00	0,67	0,50	1,34
0,05	0,80	0,60	1,11
0,06	0,93	0,70	1,03
0,07	0,99	0,80	1,00
0,08	0,96	0,90	0,91
0,09	1,07	1,00	0,73
0,10	1,13	1,10	0,67
0,11	1,22	1,20	0,66
0,12	1,31	1,30	0,60
0,13	1,25	1,50	0,45
0,15	1,39	1,70	0,36
0,17	1,50	2,00	0,26
0,20	1,54	2,50	0,19
0,25	1,42	3,00	0,14
0,30	1,55	4,00	0,10
0,40	1,34	5,00	0,06

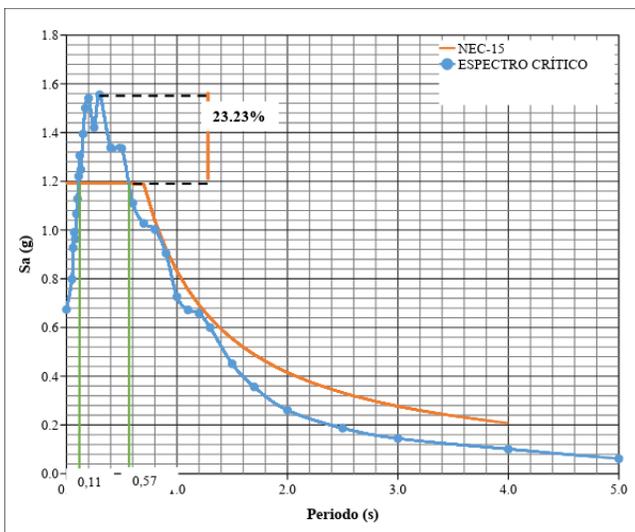


Figura 8: Espectro Crítico para el área de estudio VS Espectro de la NEC-15

3.3. Evaluación del comportamiento estructural

Las estructuras representativas del área de estudio fueron sometidas a un análisis estructural, mediante la modelación de cada una de ellas en un programa especializado en el cual se introdujo el espectro determinístico de la zona. Las edificaciones corresponden a 3 viviendas tipo de diferentes niveles, cuya altura total es de 2.50m, 7.70m y 13.0m para

las estructuras de 1 piso, 3 pisos y 5 pisos respectivamente. En la **Tabla 5** se muestran las dimensiones de los elementos estructurales de cada vivienda.

Las verificaciones del comportamiento de las estructuras se realizaron con: el periodo de vibración, modo de vibración de la estructura, modos necesarios para la acumulación del 90% de la masa, derivas y validación de análisis dinámico de una estructura.

Tabla 5: Datos de columnas, vigas y losas de las edificaciones

	Edificación de 1 piso	Edificación de 3 pisos	Edificación de 5 pisos
Columna	25*25 cm	30*30 cm	45*45 cm (1er, 2do piso)
			35*35 cm (3er, 4to piso)
			Tubo Estructural (5to piso)
			D= 5" y e= 5 mm
Vigas	20*20 cm	25*20 cm	25*30 cm (1er al 4to piso)
			Perfil Estructural "U" (5to piso)
			h=150mm, b=80mm y e=5mm
Losa	15 cm	20 cm	20 cm (1er al 4to piso)
			fibrocemento (5to piso)
Altura total	2.50 m	7.70 m	13.00 m

Los resultados de las derivas dinámicas determinadas con el espectro de la NEC-15 y con el espectro determinístico se presentan en la **Tabla 6**, además se calculó la diferencia porcentual entre estos valores. La estructura de 1 piso presenta una diferencia notable entre los valores de las derivas de piso obtenidas con los dos espectros, a diferencia de, las estructuras 3 y 5 pisos muestran una diferencia mucho menor.

Con el espectro crítico para el barrio Oriente, se determinó un intervalo de periodo de 0.11seg. A 0.57seg., lo que significa que las edificaciones que se encuentren dentro de ese rango son las que tienen un nivel de amenaza significativo debido a que las aceleraciones por la NEC-15 son menores a las aceleraciones esperadas con el espectro crítico.

La evaluación de desempeño de las edificaciones de 1, 3 y 5 niveles en función al espectro crítico dieron como resultado que la estructura de 1 piso presenta un grado de amenaza mínimo, en cambio, las estructuras de 3 pisos manifestaron un nivel de amenaza medio-alto y por último las estructuras de 5 pisos tuvo un índice de amenaza alto. Estos resultados

corroboran para afirmar que el barrio Oriente pueden sufrir durante un evento sísmico.

Tabla 6: Derivas elásticas dinámicas obtenidas con los 2 espectros reducidos, para cada estructura.

ESTRUCTURA DE 1 PISO				
NIVEL	Dirección Horizontal	NEC-15	Determinístico	Diferencia %
		Δ_D	Δ_D	
2.50 m	Dirección X	0.000588	0.000757	22.32
	Dirección Y	0.000602	0.000771	21.92
ESTRUCTURA DE 3 PISOS				
NIVEL	Dirección Horizontal	NEC-15	Determinístico	Diferencia %
		Δ_D	Δ_D	
5.30 m	Dirección X	0.001732	0.001869	7.33
	Dirección Y	0.001721	0.001859	7.42
ESTRUCTURA DE 5 PISOS				
NIVEL	Dirección Horizontal	NEC-15	Determinístico	Diferencia %
		Δ_D	Δ_D	
7.80 m	Dirección X	0.002150	0.002060	4.37
	Dirección Y	0.001928	0.002024	4.74
13.00 m (E. Metálica)	Dirección X	0.009834	0.01042	5.62
	Dirección Y	0.008478	0.009166	7.51

3.4. Discusión

Mediante el método determinístico, los estudios demuestran que en estructuras de menor altura la variabilidad entre los dos métodos es mayor debido a que los primeros estratos de suelo no tienden a tener variaciones importantes en su comportamiento por efecto del PGA y la velocidad de propagación de onda Vs, sin embargo, el método determinístico se acerca más a la realidad que el método de la NEC-15 puesto que incluye variables más exactas del suelo.

Las estructuras cuyo periodo de vibración es corto, producen aceleraciones mayores en estructuras de bajo nivel y predomina el espectro determinístico frente al encontrado con la metodología de la NEC-15, en los estudios analizados en este documento se corrobora que las estructuras de menor

altura son afectadas por el PGA de manera más crítica que estructuras de gran elevación, y los valores de derivas y cortantes basales son predominadas por el espectro crítico. Sin embargo, a pesar de que el incremento de la aceleración se produce en estructuras de menor altura, los valores de fuerza cortante y derivas son mucho mayores en estructuras de gran altura.

Al variar la altura, se encuentra cada vez menor diferenciación entre el espectro crítico de diseño y el espectro de la NEC-15, siendo la diferencia de los efectos de la vibración estructural entre ambos métodos cada vez menor, de tal forma que, a mayor altura, es fiable usar cualquiera de los dos métodos.

4. Conclusión

Al comparar las respuestas de una estructura de hormigón armado a los espectros de la NEC y determinístico, a diferentes alturas, se evidencia que la variación de las aceleraciones es mayor a una altura menor, pero los efectos estructurales de corte, distorsión torsional, derivas inelásticas y periodos de vibración son mucho más críticos en estructuras de mayor altura.

La variación de los valores de cortante y derivas inelásticas entre estructuras metálicas y hormigón armado, siendo analizadas bajo el efecto del espectro sísmico determinístico y el espectro NEC-15, tienen una variación de 1.89% en sus resultados, siendo fiable el uso de cualquiera de los dos métodos para cualquier tipo de estructura a una altura mayor de 3 pisos.

Cada estructura analizada tiene una correlación directa con el suelo donde se planea implantar, de tal forma que es menester implementar un estudio de suelos individual en estructuras que se construyan en el área subyacente alrededor de la zona delimitada en el presente documento, debido a que se debe realizar un mayor estudio complementario en zonas donde no existan los ensayos aquí presentados.

Referencias

- Aguiar, R., Sangurima, K., Frau, C., Quishpe, M., Quishpe, D., Cuaical, S., & Chunga, K. (2013). Microzonificación sísmica del centro norte de Quito. *Segunda Jornada de Investigación científica desde las aulas*, 1-39. <https://acortar.link/bw8JyY>
- Akkar, S., & Bommer, J. J. (2010). Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. *Seismological Research Letters*, 81(2), 195–206. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.2.195>
- ASTM D2487. (1970). ASTM International—Standards Worldwide. <https://www.astm.org/>

- Boore, D. M., & Atkinson, G. M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99–138. <https://doi.org/10.1193/1.2830434>
- Diario la Hora. (2002, abril 19). Ambato necesita identificar zonas de alto riesgo. Disponible en: <https://www.lahora.com.ec/secciones/ambato-necesita-identificar-zonas-de-alto-riesgo/>
- Instituto Geofísico Militar - IGM. (2012). Terremoto de Esmeraldas de 1906 - Uno de los sismos más grandes de la historia reciente. Disponible en: <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/575-terremoto-de-esmeraldas-de-1906-uno-de-los-sismos-más-grandes-la-historia>
- Juárez, E., & Rico, A. (1976). Mecánica de Suelos: Vol. Tomo III. LIMUSA.
- Kanno, T. (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879–897. <https://doi.org/10.1785/0120050138>
- Lin, Y., He, T., Da, Y., Yang, R., & Zheng, D. (2023). Effects of recycled micro-powders mixing methods on the properties of recycled concrete. *Journal of Building Engineering*, 107994. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107994>
- Mise, W. (2018). Estudio de peligro sísmico determinista para las estructuras del cantón Ambato – sector Huachi Loreto – barrio Ciudadela Oriente [Tesis de grado. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil]. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/28767>
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-DS-2015 (2015). <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>
- NTE INEN 0689: Mecánica de suelos. Ensayo de Penetración Estandar, 440 (1982). <https://studylib.es/doc/5656356/nte-inen-0689--mecánica-de-suelos.-ensayo-de>
- Ohta, Y., & Goto, N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(2), 167–187. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060205>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>
- Zhao, G., Zhu, Z., Ren, G., Wu, T., Ju, P., Ding, S., Shi, M., & Fan, H. (2023). Utilization of recycled concrete powder in modification of the dispersive soil: A potential way to improve the engineering properties. *Construction and Building Materials*, 389, 131626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131626>

Contribución de los autores (CRediT)

Mise-Flores, W.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Recursos materiales, Redacción- borrador original, Redacción-revisión y edición.
Pico-Núñez, F.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Recursos materiales, Redacción- borrador original, Redacción-revisión y edición.
Almeida-Mayorga, A.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Recursos materiales, Redacción- borrador original, Redacción-revisión y edición.
Navarro-Peñaherrera, C.: Conceptualización, Análisis formal de datos, Investigación, Metodología, Recursos materiales, Redacción- borrador original, Redacción-revisión y edición. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores han declarado que no existe conflicto de intereses en esta obra.

Nota del Editor

Descargo de responsabilidad: Los datos, declaraciones, opiniones contenidas en el documento son responsabilidad únicamente de los autores y no de la *Revista Científica FINIBUS – Ingeniería, Industria y Arquitectura*. La Revista y sus editores renuncian a toda responsabilidad por daño a persona o propiedad resultante de los métodos, instrucciones, producto o idea mencionado en el contenido.



Derechos de autor 2025. Revista Científica FINIBUS - ISSN: 2737-6451.

Esta obra está bajo una licencia: Internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0

