



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO CON EL
PROGRAMA SASID DE LAS NTC-DS-2017 Y EL ESPECTRO DE
DISEÑO OBTENIDO ESPECÍFICAMENTE PARA UN SITIO EN
LA CDMX**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. GRESLI RUBÍ CASIMIRO VELÁSQUEZ

DIRECTOR DE TESINA: **DR. RAÚL AGUILAR BECERRIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

ABRIL 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RECONOCIMIENTOS

Una vez más, a la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma mater, con la cual tengo una deuda infinita, pues me ha acogido todos estos años abriéndome las puertas de sus aulas para mi formación académico, profesional y personal.

A la honorable Facultad de Ingeniería, mi segundo hogar, recinto del conocimiento, valor y amor por la ingeniería. Por permitirme desarrollar mi pasión por la ingeniería civil.

Al Posgrado de Ingeniería, por formar parte de los programas de posgrado que forman a profesionistas con los conocimientos necesarios para desempeñarse en el campo laboral.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología, por la beca a lo largo de este año de estudio.

Al Dr. Raúl Aguilar Becerril, por la confianza que recibí del él al ser mi director de tesis. Agradezco todo su conocimiento y colaboración con este trabajo.

Al grupo de profesores de la especialidad, por su gran interés y pasión por fomentar en los estudiantes el amor por la geotecnia, que, aunque la nueva modalidad de enseñanza requería aptitudes distintas, siempre mostraron esfuerzo y compromiso, aunque las condiciones no fueran las mejores.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios, por una vez más darme la oportunidad de comenzar y concluir un ciclo. Por guiarme por el camino exacto aunque a veces parezca que no es el indicado. Por permitirme concluir este trabajo y por permitirme obtener una beca. Y de nuevo gracias por dejar que sea parte de la Ingeniería Civil mexicana.

A mi mamá la Sra. María Velásquez Basaldúa, por obligarme a siempre insistir, persistir y nunca desistir. Gracias mamita por toda tu paciencia y amor, por estos 25 años que has fungido como la mejor mamá y papá del mundo. Gracias por siempre cuidarme y guiarme por el camino del bien. Agradezco a Dios tener una mamá tan fuerte y maravillosa como tú, que me enseñas a ser mejor cada día y no darme por vencida y sobre todo a ser una mujer tan excepcional como tú.

Agradezco a mis hermanos y hermanas, por su ayuda infinita, por sus consejos de todos los días y sobre todo por exigirme ser la mejor, siendo una persona humilde y agradecida todos los días.

A mis sobrinos, por todo su amor y compañía, aunque no lo saben me motivan a ser mejor para ustedes.

No me resta más que agradecer a todos, su compañía, amor y comprensión.

A mis compañeros y amigos de la especialidad, Arturo Rodríguez y Eduardo Telumbre, quienes estuvieron ayudándome y apoyándome a lo largo de todo este trayecto.

A mis amigos, Juan Pablo Vázquez y Marconi Rodríguez por todo su apoyo y motivación a lo largo de este año tan complicado.

A la vida por poner las cosas justo a su tiempo, sobre todo por continuar con salud mi familia , mis amigos y yo durante esta pandemia.

A mí, por el ímpetu y las ganas de progresar, de buscar siempre una nueva y mejorada versión de mí; por toda la dedicación que le pongo a mi crecimiento académico, profesional y personal. A lo largo de este tiempo, no sólo concluí una nueva etapa académica, sino que además, con el favor del universo, de Dios o de algún ser supremo, he conseguido la plenitud que hoy tengo y con gran satisfacción estoy segura de que hay muchísimas bendiciones más para mí.

Este es sólo un nuevo escalón para conseguir pronto ese Dra. antes de mi nombre.

“El mundo necesita más héroes. ¿Por qué esperar a que vengan, si el poder de convertirte en uno está en tu interior?”

-Robin Sharma

*“Be you
Strong
Inspiring
Passionate
Unstoppable”*

“Si lo puedo imaginar es por que existe, y si existe es porque es mío”

-A todo sí

“Dios, yo sé que tu favor viene hacia mí”

-Joel Osteen

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 2	
ESPECTROS DE DISEÑO.....	3
2.1 Obtención de los espectros de respuesta.....	3
2.2 Obtención de los espectros de diseño.....	6
CAPÍTULO 3	
ESPECTROS CON EL PROGRAMA SASID DE LAS NTC-DS-2017.....	17
CAPÍTULO 4	
PROPIEDADES DINÁMICAS PARA UN SITIO EN LA CDMX.....	21
4.1 Velocidad de propagación de ondas de corte.....	23
4.2 Espesor de los depósitos compresibles.....	24
4.3 Periodo dominante de vibración del suelo.....	25
4.4 Amortiguamiento del material.....	27
4.5 Determinación de las propiedades dinámicas para un sitio.....	28
de la CDMX.....	28
CAPÍTULO 5	
DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO.....	33
CAPÍTULO 6	
DETERMINACIÓN DE ESPECTRO DE DISEÑO A 50 AÑOS.....	36
6.1 SEHEDIS.....	36
6.2 Evolución del espectro de diseño a 50 años.....	38
6.2.1 Modelo 1: Evolución del Ts en un periodo de 50 años.....	39
6.2.1.1 Calculo del espectro de diseño considerando la evolución del Ts en un periodo de 50 años.....	42
6.2.2 Modelo 2: Evolución de Vs y Ts en un periodo de 50 años.....	45
6.2.2.1 Calculo del espectro de diseño considerando la evolución de Vs y Ts en un periodo de 50 años.....	49
CAPÍTULO 7	
COMPARACIÓN CON EL PROGRAMA SASID DE LAS NTC-DS-2017.....	57

CAPÍTULO 8	
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	66
CAPÍTULO 9	
CONCLUSIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	72
ANEXO A	
MODELO 2 DE ANÁLISIS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD SOMETIDO A UNA EXCITACIÓN SÍSMICA	4
FIGURA 2. GRÁFICO QUE MUESTRA LA OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA	5
FIGURA 3. MODELO DEL ESPECTRO DE RESPUESTA ANTE UN REGISTRO DE ACELERACIÓN DEL TERRENO.....	6
FIGURA 4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (NTC-DS, 2004)	8
FIGURA 5. ESPECTRO DE DISEÑO SÍSMICO (LIBERTAD, 2018).....	10
FIGURA 6. ESPECTRO ELÁSTICO Y ESPECTRO DE DISEÑO	11
FIGURA 7. COMPONENTES DEL ESPECTRO DE DISEÑO	11
FIGURA 8. ESPECTRO DE DISEÑO VARIANDO EL FACTOR DE IMPORTANCIA	14
FIGURA 9. ESPECTRO DE DISEÑO VARIANDO EL FACTOR K_1	15
FIGURA 10. ESPECTRO DE DISEÑO VARIANDO EL FACTOR DE REDUCCIÓN POR COMPORTAMIENTO SÍSMICO.....	16
FIGURA 11. ESPECTROS DE DISEÑO Y ELÁSTICO DEL SASID.....	19
FIGURA 12. ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS DEL SASID.....	20
FIGURA 13. MAPA CON CURVAS DE IGUAL ESPESOR PARA LA CIUDAD DE MÉXICO (NTC-DS, 2004)	25
FIGURA 14. MAPA DE ISOPERIODOS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	26
FIGURA 15. COCIENTES ESPECTRALES OBTENIDOS DE LOS REGISTROS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL.....	29
FIGURA 16. REGISTROS DE V_s OBTENIDOS DEL DOWN HOLE	32
FIGURA 17. ESPECTROS CALCULADOS PARA UN $T_s=4$ s, (A) ESPECTRO DE DISEÑO REDUCIDO CON $Q=1$, (B) ESPECTRO DE DISEÑO REDUCIDO CON $Q=2$, (C) ESPECTRO DE DISEÑO REDUCIDO CON $Q=3$ Y (D) ESPECTRO DE DISEÑO REDUCIDO CON $Q=4$	34
FIGURA 18. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO REDUCIDO CON $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ Y $Q=4$ PARA UN $T_s=4$ s.....	35
FIGURA 19. VISTA GENERAL DEL SEHEDIS (IMAGEN OBTENIDA DE: HTTPS://BIT.LY/2Nz8MId).....	37
FIGURA 20. PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL BANCO DE NIVEL CERCANO 138-B(SO2E03)04 EN UN RADIO DE 115 M (IMAGEN OBTENIDA DE: HTTPS://BIT.LY/2PAUNT2).....	38
FIGURA 21. EVOLUCIÓN DEL H EN LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS	41
FIGURA 22. EVOLUCIÓN DEL T_s EN UN PERIODO DE 50 AÑOS	42
FIGURA 23. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ Y $Q=4$ CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s EN UN PERIODO DE 50 AÑOS (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON $T_s=4$ s, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON $T_s=3.88$ s, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON $T_s=3.76$ s, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON $T_s=3.65$ s, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON $T_s=3.53$ s Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON $T_s=3.42$ s	43
FIGURA 24. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s EN EL AÑO 2020 Y 2070.....	45
FIGURA 25. INCREMENTO DE LA V_s PARA CADA MODELO DE ANÁLISIS EN EL AÑO 2070.....	47
FIGURA 26. REDUCCIÓN DEL T_s PARA CADA MODELO DE ANÁLISIS EN EL AÑO 2070.....	48
FIGURA 27. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ Y $Q=4$ CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s Y EL INCREMENTO DE V_s PARA LOS CINCO MODELOS DE ANÁLISIS (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON $T_s=4$ s, (B) ESPECTROS DEL MODELO 2.A CON $T_s=3.36$ s, (C) ESPECTROS DEL MODELO 2.B CON $T_s=3.29$ s, (D) ESPECTROS DEL MODELO 2.C CON $T_s=3.23$ s, (E) ESPECTROS DEL MODELO 2.D CON $T_s=3.17$ s Y (F) ESPECTROS DEL MODELO 2.E CON $T_s=3.11$ s	50
FIGURA 28. ESPECTROS DE DISEÑO CON $Q=1$ DEL AÑO 2020 (CURVA ROJA) Y AÑO 2070 PARA CADA INCREMENTO PORCENTUAL DE LA V_s	52
FIGURA 29. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s Y EL INCREMENTO PORCENTUAL DE V_s EN EL AÑO 2070 CONTRA EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL 2020	53
FIGURA 30. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s VS LA EVOLUCIÓN DE T_s Y V_s EN EL AÑO 2070.....	55

FIGURA 31. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO DE LOS MODELOS 1 Y 2 EN 2070 CONTRA EL ESPECTRO DE DISEÑO CALCULADO PARA 2020.....	56
FIGURA 32. ESPECTROS DE DISEÑO CONSIDERANDO LOS VALORES DE Q=1, Q=2, Q=3 Y Q=4 OBTENIDOS DEL PROGRAMA SASID 2017.....	58
FIGURA 33. ESPECTROS DE DISEÑO CONSIDERANDO LOS VALORES DE Q=1, Q=2, Q=3 Y Q=4 OBTENIDOS DEL PROGRAMA SASID 2020.....	60
FIGURA 34. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2017 VS. EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2020	61
FIGURA 35. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2017 Y EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2020 VS. EL ESPECTRO CALCULADO PARA EL SITIO.....	62
FIGURA 36. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2017 Y EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2020 VS. EL ESPECTRO CALCULADO PARA EL SITIO, CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts PARA EL AÑO 2070 (MODELO 1)	64
FIGURA 37. COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2017 Y EL ESPECTRO DE DISEÑO DEL SASID 2020 VS. EL ESPECTRO CALCULADO PARA EL SITIO, CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts Y Vs PARA EL AÑO 2070	65
FIGURA 38. EVOLUCIÓN DE LA Vs DEL MODELO 2.A EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	74
FIGURA 39. EVOLUCIÓN DEL Ts DEL MODELO 2.A EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	75
FIGURA 40. EVOLUCIÓN DE LA Vs EN EL MODELO 2.B EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	76
FIGURA 41. EVOLUCIÓN DEL Ts DEL MODELO 2.B EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	76
FIGURA 42. EVOLUCIÓN DE LA Vs DEL MODELO 2.C EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	77
FIGURA 43. EVOLUCIÓN DEL Ts DEL MODELO 2.C EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	78
FIGURA 44. EVOLUCIÓN DE LA Vs DEL MODELO 2.D EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	79
FIGURA 45. EVOLUCIÓN DEL Ts DEL MODELO 2.D EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	80
FIGURA 46. EVOLUCIÓN DE LA Vs DEL MODELO 2.E EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	81
FIGURA 47. EVOLUCIÓN DEL Ts DEL MODELO 2.E EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CDMX.....	81
FIGURA 48. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON Q=1, Q=2, Q=3 Y Q=4 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts Y EL CAMBIO DE Vs PARA EL MODELO 2.A (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON Ts=4s, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON Ts=3.87s, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON Ts=3.74s, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON Ts=3.61s, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON Ts=3.48s Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON Ts=3.36s	84
FIGURA 49. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON Q=1, Q=2, Q=3 Y Q=4 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts Y EL CAMBIO DE Vs PARA EL MODELO 2.B (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON Ts=4s, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON Ts=3.85s, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON Ts=3.71s, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON Ts=3.57s, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON Ts=3.43s Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON Ts=3.29s	85
FIGURA 50. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON Q=1, Q=2, Q=3 Y Q=4 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts Y EL CAMBIO DE Vs PARA EL MODELO 2.C (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON Ts=4s, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON Ts=3.84s, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON Ts=3.68s, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON Ts=3.53s, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON Ts=3.38s Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON Ts=3.23s	86

FIGURA 51. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ Y $Q=4$ CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s Y EL CAMBIO DE V_s PARA EL MODELO 2.D (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON $T_s=4s$, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON $T_s=3.82s$, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON $T_s=3.65s$, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON $T_s=3.49s$, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON $T_s=3.33s$ Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON $T_s=3.17s$ 87

FIGURA 52. CÁLCULO DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ Y $Q=4$ CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL T_s Y EL CAMBIO DE V_s PARA EL MODELO 2.E (A) ESPECTROS EN EL AÑO 2020 CON $T_s=4s$, (B) ESPECTROS EN EL AÑO 2030 CON $T_s=3.81s$, (C) ESPECTROS EN EL AÑO 2040 CON $T_s=3.63s$, (D) ESPECTROS EN EL AÑO 2050 CON $T_s=3.45s$, (E) ESPECTROS EN EL AÑO 2060 CON $T_s=3.28s$ Y (F) ESPECTROS EN EL AÑO 2070 CON $T_s=3.11s$ 88

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COORDENADAS UTM DE LOS TRABAJOS DE EXPLORACIÓN.....	28
TABLA 2. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SITIO (19.4049735,-99.0990472).....	30
TABLA 3. PARÁMETROS QUE FORMAN EL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1 EN EL AÑO 2020 CON Ts=4s.....	34
TABLA 4. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO EL HUNDIMIENTO REGIONAL EN LA CDMX .	40
TABLA 5. PARÁMETROS QUE FORMAN EL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts EN LOS PRÓXIMOS 50 AÑOS.....	44
TABLA 6. EVOLUCIÓN DEL Ts EN LOS CINCO SUBMODELOS DE ANÁLISIS CONSIDERANDO UN INCREMENTO PORCENTUAL DE Vs PARA EL AÑO 2070	46
TABLA 7. PARÁMETROS QUE FORMAN EL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DEL Ts Y Vs ..	51
TABLA 8. COMPARACIÓN DE LOS FACTORES QUE FORMAN LOS ESPECTROS DE DISEÑO CON Q=1 PARA LOS MODELOS DE ANÁLISIS 1 Y 2.....	54
TABLA 9. PARÁMETROS DE LOS ESPECTROS DE DISEÑO DE LOS MODELOS 1 Y 2 EN EL AÑO 2070 Y EN EL AÑO 2020	56
TABLA 10. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1, SASID 2017.....	58
TABLA 11. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1, SASID 2020.....	59
TABLA 12. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTOS POR EL SASID 2017 Y SASID 2020 PARA EL SITIO DE ESTUDIO	61
TABLA 13. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTOS POR EL SASID 2017, SASID 2020 Y EL CALCULADO EN 2020	62
TABLA 14. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1 PROPUESTOS POR EL SASID 2017, SASID 2020 Y EL CALCULADO EN 2070 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DE Ts (MODELO 1).....	63
TABLA 15. PARÁMETROS QUE FORMAN AL ESPECTRO DE DISEÑO CON Q=1 PROPUESTOS POR EL SASID 2017, SASID 2020 Y EL CALCULADO EN 2070 CONSIDERANDO LA EVOLUCIÓN DE Vs Y Ts (MODELO 2).....	65
TABLA 16. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE Vs DEL 2% MODELO 2.A.....	73
TABLA 17. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE Vs DEL 4% MODELO 2.B.....	75
TABLA 18. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE Vs DEL 6% MODELO 2.C.....	77
TABLA 19. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE Vs DEL 8% MODELO 2.D.....	78
TABLA 20. EVOLUCIÓN DEL Ts EN UN PERIODO DE 50 AÑOS CONSIDERANDO UN INCREMENTO DE Vs DEL 10% MODELO 2.E.....	80

RESUMEN

En este estudio se presenta el análisis del espectro de diseño en un sitio específico de la Ciudad de México obtenido de la base de datos del SASID propuesta por las NTC-DS-2017. Análogamente, se obtiene el espectro de diseño calculado mediante ecuaciones propuestas, el cual se compara con el espectro de diseño obtenido del SASID.

Se analizan dos modelos de análisis de la evolución de las propiedades dinámicas del subsuelo en un periodo de tiempo de 50 años, para un sitio de la CDMX, considerando el efecto del hundimiento regional, fenómeno bajo el que se encuentra la ciudad como resultado de la sobreexplotación de los mantos acuíferos del subsuelo.

Finalmente se analizan, los espectros de diseño de los próximos 50 años en ambos modelos de cálculo, considerando el cambio en las propiedades dinámicas de los depósitos compresibles considerando el hundimiento regional y se comparan con los espectros de diseño propuestos por el SASID.

ABSTRACT

This study presents the analysis of the design spectra in a specific site in Mexico City obtained from the SASID database proposed by the NTC-DS-2017. Similarly, the design spectrum calculated by means of proposed equations is obtained, which is compared with the design spectrum obtained from the SASID.

Two models of analysis of the evolution of the dynamic properties of the subsoil are analyzed in a period of time of 50 years, for a CDMX site, considering the effect of regional subsidence, a phenomenon that the city is under as a result of the overexploitation of groundwater aquifers.

Finally, the design spectra of the next 50 years are analyzed in both calculation models, considering the change in the dynamic properties of the compressible deposits considering the regional subsidence and they are compared with the design spectra proposed by the SASID.

OBJETIVO

En este estudio se analizan los espectros de diseño obtenidos mediante el programa SASID y el espectro de diseño calculado en un sitio específico de la Ciudad de México, considerando los efectos del hundimiento regional del subsuelo de la ciudad en un tiempo determinado.

ALCANCES

Se plantea la comparación de los espectros de diseño, analizando el espectro obtenido en la base de datos SASID para un sitio específico de la Ciudad de México y la variación del espectro de diseño en el tiempo considerando el hundimiento regional.

JUSTIFICACIÓN

El creciente hundimiento regional al que está sujeto la Ciudad de México en consecuencia de la sobreexplotación de los mantos acuíferos, ha dado como resultado la consolidación y reducción gradual del espesor de los depósitos lacustres del subsuelo de la ciudad, misma que repercute en la respuesta sísmica ante la ocurrencia de algún evento sísmico. Se han realizado diversos estudios con el fin de analizar la respuesta sísmica de los suelos de la Ciudad de México. Sin embargo, dichos estudios consideran la respuesta sísmica en la época de interés, es por ello, que en este estudio se analiza la repuesta sísmica en la Ciudad de México desde la época actual hasta un tiempo estimado de 50 años con el fin de evaluar cómo repercute el hundimiento regional en la respuesta sísmica de la ciudad.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El hundimiento regional que ocurre en el subsuelo de la Ciudad de México, es inducido principalmente por el bombeo de agua subterránea con fines de abastecimiento a la población, el cual ha generado el abatimiento de la presión de agua propiciando el fenómeno de consolidación y la reducción gradual del espesor de los depósitos de origen lacustre que constituyen a la ciudad. El incremento de los esfuerzos efectivos, provocado por este fenómeno, genera un cambio en las propiedades del subsuelo, reflejándose en un aumento de la resistencia al esfuerzo cortante y por ende en una reducción de las deformaciones.

Este fenómeno simultáneamente produce cambios en los parámetros dominantes de las propiedades dinámicas de los suelos. La velocidad de propagación de ondas de corte (V_s), el amortiguamiento material (ξ), el periodo dominante de vibración del suelo (T_s), y el espesor del depósito (H), los cuales son parámetros que modifican la respuesta sísmica del suelo.

Se sabe que el espesor de un depósito de suelo es un parámetro geométrico determinante en su respuesta dinámica. Por lo que la disminución del espesor del depósito producto del fenómeno de consolidación, refleja directamente una respuesta dinámica distinta, pues se traduce en un cambio en su estructura produciéndose un

incremento de su rigidez (G), generando una variación en la velocidad de propagación de ondas de corte.

La disminución del espesor implica que si la rigidez crece en función del tiempo, la magnitud de la velocidad de propagación de ondas de corte también se incrementa. A su vez, la variación del amortiguamiento del material en función del tiempo es sólo dependiente de la modificación de la estructura que el suelo sufra durante el proceso de consolidación. Sin embargo, se considera un incremento del amortiguamiento en función del tiempo mínimo. Por su parte, el cambio en el periodo dominante de vibración se encuentra en función del espesor del depósito y de la velocidad de propagación de ondas de corte, entonces al disminuir el espesor del depósito e incrementar la velocidad de propagación de ondas de corte se traduce en una disminución del periodo dominante de vibración del suelo.

Es importante destacar que los cambios generados en las propiedades dinámicas de los suelos producto de la consolidación, producen alteraciones en la respuesta sísmica de los depósitos, repercutiendo directamente en el comportamiento sísmico de las estructuras de la ciudad. En sitios con $T_s > 2$ s, la disminución del periodo de vibración del suelo (*i.e.*, acercándose a los 2 segundos) perjudica la respuesta sísmica del suelo ante la ocurrencia de algún evento sísmico con mecanismo de subducción, eventos sísmicos a los cuales la Ciudad de México es altamente vulnerable, ya que son característicos por propiciar que el movimiento tenga un alto contenido de frecuencias bajas, alrededor de 0.5 Hz, propiciando las mayores intensidades sísmicas en suelos con periodo dominante de vibración de 2 s, afectando potencialmente a las estructuras ubicadas en suelos con estas características.

Finalmente, en este trabajo se hace un análisis de la variación de los espectros de diseño sísmico considerando el efecto del hundimiento regional en función del tiempo, asociada al cambio de los parámetros dinámicos del suelo en un periodo de 50 años. Se analizan dos modelos donde: 1) se calcularon los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante del suelo (T_s) por efectos de la reducción gradual del espesor del depósito compresible H del sitio de estudio y 2) se calcularon los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante del suelo (T_s) por efectos de la reducción gradual del espesor del depósito compresible (H) y además el incremento de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s).

Capítulo 2

ESPECTROS DE DISEÑO

2.1 Obtención de los espectros de respuesta

Los depósitos lacustres de la Ciudad de México, son depósitos de suelo altamente compresibles que responden de acuerdo con sus propiedades dinámicas ante la ocurrencia de algún evento sísmico. Para conocer la aceleración que experimentan las estructuras de la ciudad ante la ocurrencia de algún evento sísmico, es necesario obtener los espectros de respuesta sísmica.

Un espectro de respuesta sísmica es una curva de máximas respuestas (*i.e.*, desplazamientos, velocidades, aceleraciones) de osciladores de un grado de libertad (ver Figura 3), (*i.e.*, modelos representativos de estructuras en su modo fundamental) sometidos a la misma excitación y para el mismo nivel de amortiguamiento (Libertad, 2018).

El espectro de respuesta correspondiente a un sistema estructural es un medio práctico para caracterizar los movimientos del terreno y sus efectos sobre las estructuras. El espectro de respuesta proporciona un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de un grado de libertad (*S1GDL*). También proporciona un enfoque práctico para la aplicación del conocimiento de la dinámica estructural al diseño de estructuras y al desarrollo de los requisitos de fuerza lateral en los códigos de construcción.

En la Figura 1 se muestra como ejemplo la idealización de un modelo estructural, que sometido a una excitación sufre un desplazamiento controlado por el amortiguamiento crítico (c), y la rigidez del sistema (K), a un oscilador de un grado de libertad cuya respuesta se encuentra controlada por su masa (m), su rigidez (k), y su fracción de amortiguamiento (ξ), ante la ocurrencia de alguna excitación en su base. En el *S1GDL* interactúan las fuerzas de inercia (F_I), de amortiguamiento (F_A), y de rigidez lateral (F_R). La F_I es proporcional a la masa del sistema y a la aceleración que experimenta, la F_A trata de reestablecer el equilibrio del oscilador en vibración, y la F_R es la fuerza que se genera en la columna por su rigidez lateral al tratar de ser desplazada con respecto al terreno.

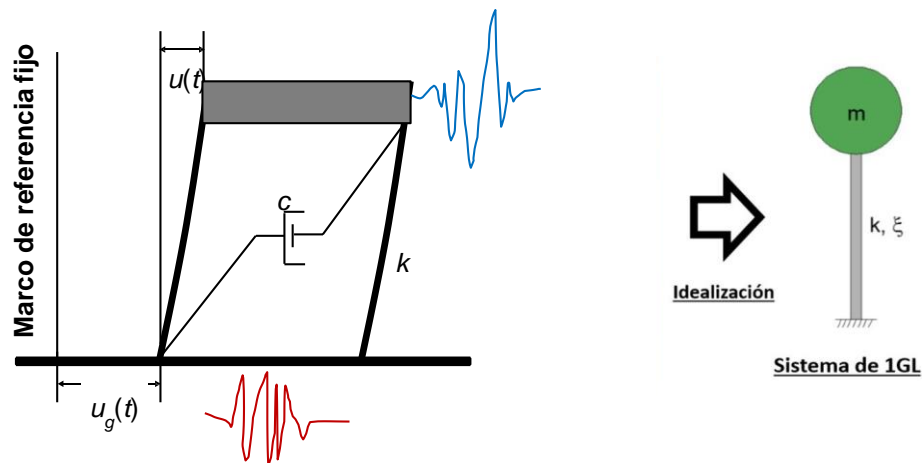


Figura 1. Modelo de un grado de libertad sometido a una excitación sísmica

La elaboración de un espectro de respuesta requiere de la ejecución de numerosos cálculos, dado que es necesario resolver la ecuación de equilibrio dinámico para determinar la historia (*i.e.*, variación en el tiempo) de aceleraciones para una gran cantidad de osciladores con diferentes periodos de vibración (T_e).

Para construir un espectro de respuesta se siguen los siguientes pasos:

1. Se establece un intervalo de muestreo
2. Se selecciona un periodo dominante del suelo y una fracción de amortiguamiento del S1GL
3. Se realiza el proceso de la información por medio de métodos numéricos (*e.g.*, con el método de las ocho constantes, método de Newmark, etc.) y se obtiene la respuesta de aceleración $\ddot{u}(t)$ debido a una aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$
4. Se determina, el valor máximo de la respuesta

5. Las ordenas son valores de aceleración espectral (S_a)

Con lo anterior se puede resumir que un espectro de respuesta es una forma de caracterizar la fuerza sísmica, el cual transforma la aceleración en dominio del tiempo a la máxima respuesta de un $S1GDL$ en dominio del periodo fundamental de vibración para un porcentaje de amortiguamiento predefinido. En la Figura 2 se muestra la obtención del espectro de respuesta de manera gráfica, nótese que dada una excitación del terreno un espectro de respuesta representa las máximas aceleraciones que experimentan todos los posibles $S1GDL$ con diferentes periodos fundamentales de vibración.

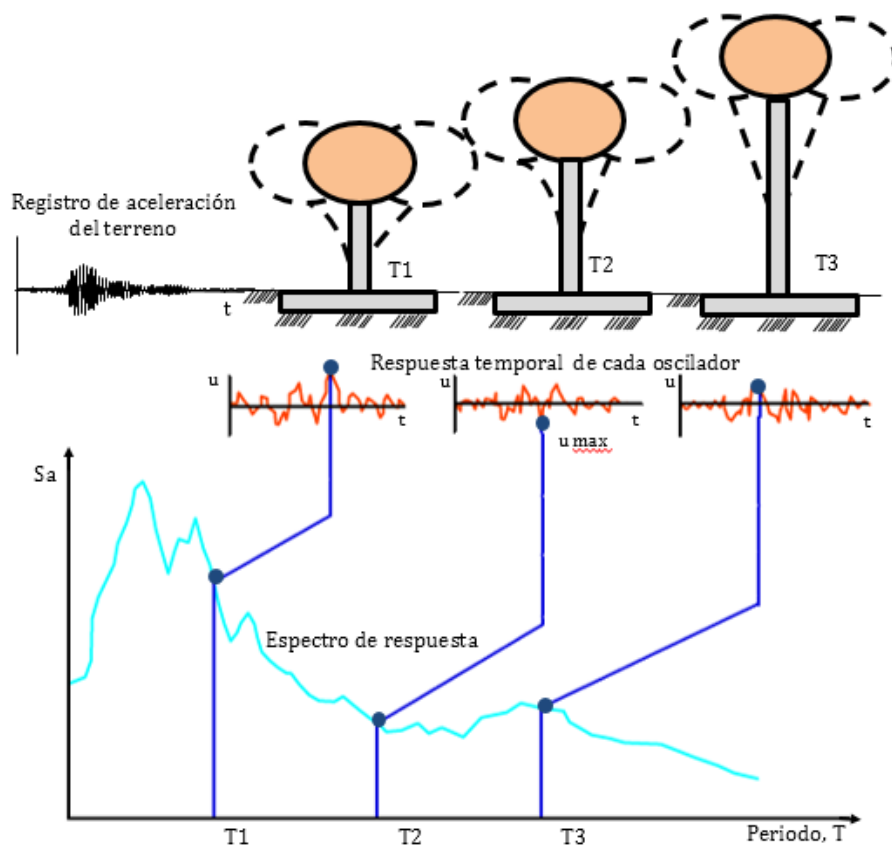


Figura 2. Gráfico que muestra la obtención del espectro de respuesta

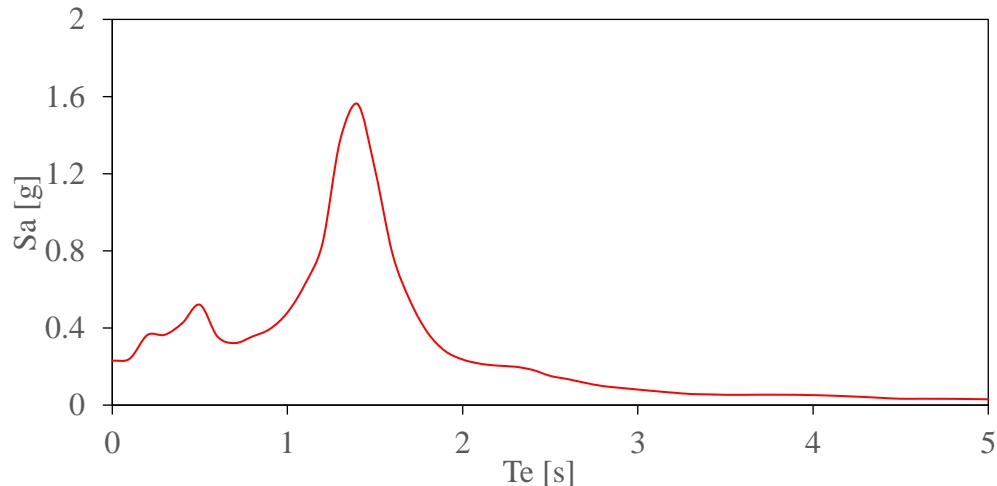


Figura 3. Modelo del espectro de respuesta ante un registro de aceleración del terreno

2.2 Obtención de los espectros de diseño

Realizar el análisis del diseño sísmico de las estructuras, requiere parámetros que se definen por medio de la caracterización de la respuesta sísmica ante una excitación en el terreno, tanto de los suelos que caracterizan al sitio de interés como de las estructuras que se construirán sobre estos suelos. Estos parámetros se definen con el propósito de evitar mecanismos que perjudiquen el óptimo desempeño de las estructuras ante la ocurrencia de algún evento sísmico.

En la elaboración del diseño sísmico de las estructuras, se busca conocer como primer parámetro, el periodo fundamental de vibración de la estructura, T_e , con el fin de reducir la probabilidad de efectos de resonancia de las estructuras con el suelo. Esto es, evitar la construcción de estructuras con T_e similares al periodo dominante del suelo, T_s , en dicha localización.

Siguiendo ese tenor en el transcurso de los años, la ingeniería se ha dedicado a caracterizar la respuesta sísmica de los suelos de la Ciudad de México con el fin de reducir el peligro sísmico en la ciudad. Desde antiguas normativas hasta la actualidad, se ha buscado la mejora del diseño sísmico, adicionando coeficientes y factores que incrementan las acciones y reducen la capacidad de repuesta con el fin de tener un diseño más conservador y con ello una probabilidad baja de falla.

Como es sabido, la Ciudad de México es un sitio con suelos sumamente susceptibles ante la ocurrencia de eventos sísmicos en fuentes sísmicas cercanas a la zona, y dada la importancia de las estructuras en la ciudad, se recurrió además de la adición de parámetros y coeficientes, a la zonificación sísmica de los suelos de la ciudad,

considerando la aceleración de partícula y la amplificación de las ondas. Es importante destacar que en los suelos de la Ciudad de México existe el efecto de amplificación de ondas sujeto a las condiciones de suelos con baja resistencia y alta deformabilidad.

Los eventos sísmicos más fuertes que han azotado a la Ciudad de México han sido, el sismo de 1985 Mw8.1 y el sismo de 2017 Mw7.1. El más reciente, el sismo del 19S de 2017, con mecanismo intraplaca de profundidad intermedia, manifestó un mayor contenido de altas frecuencias (alrededor de 1 Hz), generando las mayores intensidades sísmicas en sitios con periodo dominante del suelo, T_s , promedio de 1.3 s en la Ciudad de México. Estos sismos han puesto en evidencia la brutal amplificación y el incremento sustancial en la duración de los movimientos en el área lacustre, comparados con los registrados en terreno firme o roca de la ciudad. Por ejemplo, la amplitud de las ondas sísmicas con periodos dominantes del suelo cercanos a 2 s en la Zona de Lago puede llegar a ser 50 veces mayor que en un sitio de suelo firme de la Ciudad de México. Sin embargo, las ondas sísmicas en el suelo firme de la ciudad, sufren también, efectos de amplificación con respecto a otros lugares fuera de la Ciudad de México (*e.g.*, las ondas sísmicas en Ciudad Universitaria llegan ser 10 veces más grandes que la de un sitio de terreno firme fuera de la ciudad tal como la de la ciudad de Cuernavaca), por lo que la amplitud en la Zona de Lago puede ser de 300 a 500 veces mayor (Cruz *et al.*, 2017).

De este modo se han manifestado los efectos de amplificación dinámica en depósitos lacustres. Sin embargo, esta amplificación se debe al entrampamiento de ondas por el contraste entre las características dinámicas de los depósitos superficiales, cuyo espesor no sobrepasa los 150 m y de la roca basal (Singh *et al.*, 2018). Se han utilizado diversas técnicas con el fin de mediar la amplificación en zonas de lago y transición con respecto a la zona de lomas. Una de las técnicas utilizadas, ha sido el uso de los cocientes espectrales y funciones de transferencia, a partir de estos se estima el periodo dominante del sitio así como las máximas amplitudes de esos cocientes. Esta técnica ha sido implementada para obtener mapas de isoperiodos dominantes de la Ciudad de México (Reinoso y Lermo, 1991) (ver Figura 4).

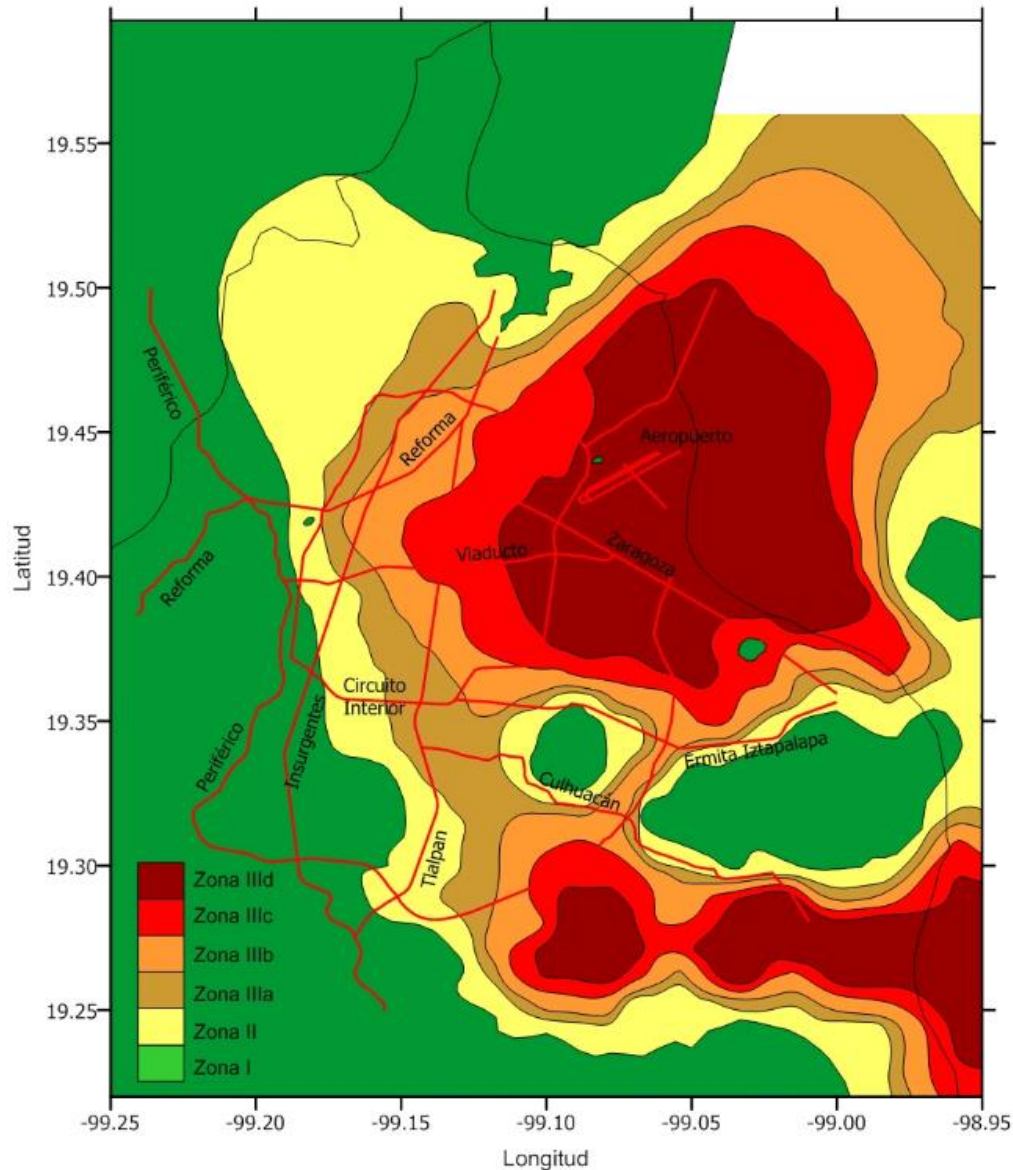


Figura 4. Zonificación Sísmica de la Ciudad de México (NTC-DS, 2004)

De acuerdo con la zonificación que se propuso en el reglamento de construcción del Distrito Federal en su versión 2004 dentro de sus Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS, 2004), se indica que la zonificación consta de tres zonas principales, Zona de Lomas (Zona I), Zona de Transición (Zona II) y Zona de Lago (Zona III) y para esta última se consideran cuatro subzonas (IIIa, IIIb, IIIc y IIId ver Figura 4). De acuerdo con esta versión de las NTC-2004, conociendo el periodo dominante en el suelo se permite hacer una reducción del coeficiente sísmico, y tomar en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura.

Con la Figura 4 es posible apreciar las zonas con mayor peligro sísmico y que presentan aceleraciones del terreno, velocidades del suelo y aceleraciones espectrales

desfavorables para el diseño sísmico de la infraestructura civil (*e.g.*, viviendas, puentes, etc.). De esta forma las alcaldías en la Ciudad de México con mayor peligro sísmico son: Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco.

Por su parte, en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo en su versión 2017, se ha especificado la herramienta SASID, una base de datos donde se presenta el espectro elástico para un sitio específico de la edificación (*i.e.*, no existen ya más zonas sísmicas), así como el afectado por los factores de reducción por comportamiento sísmico (Q'), y por sobre-resistencia (R), (*i.e.*, espectro de diseño) partiendo de la localización geográfica, el grupo al que pertenece la estructura del factor de comportamiento sísmico (Q), el factor de hiperestaticidad (k_1), y el factor de irregularidad de la estructura (NTC-DS, 2017).

En el reglamento en sus NTC-DS-2004 se propone el cálculo del espectro de diseño mediante fórmulas empíricas en función del periodo dominante del suelo (T_s). El T_s se obtiene del mapa de isoperiodos propuesto en esta normativa de acuerdo a las coordenadas geográficas de la localización de la estructura. Entonces, en función del T_s se obtienen los parámetros de aceleración máxima del terreno (a_0), la aceleración máxima que experimentan las estructuras (c), el periodo característico menor (T_a), y el periodo característico mayor (T_b), así como el cociente entre desplazamientos máximos del suelo y de la estructura (k).

Con base en lo anterior, en este estudio se analizan los espectros de diseño obtenidos mediante el programa SASID y el espectro de diseño obtenido en un sitio específico de la Ciudad de México con el fin de obtener los contrastes entre los métodos propuestos por las NTC-DS en su versiones 2017 y 2020 contra el espectro de diseño calculado con las expresiones propuestas por las NTC-DS-2004.

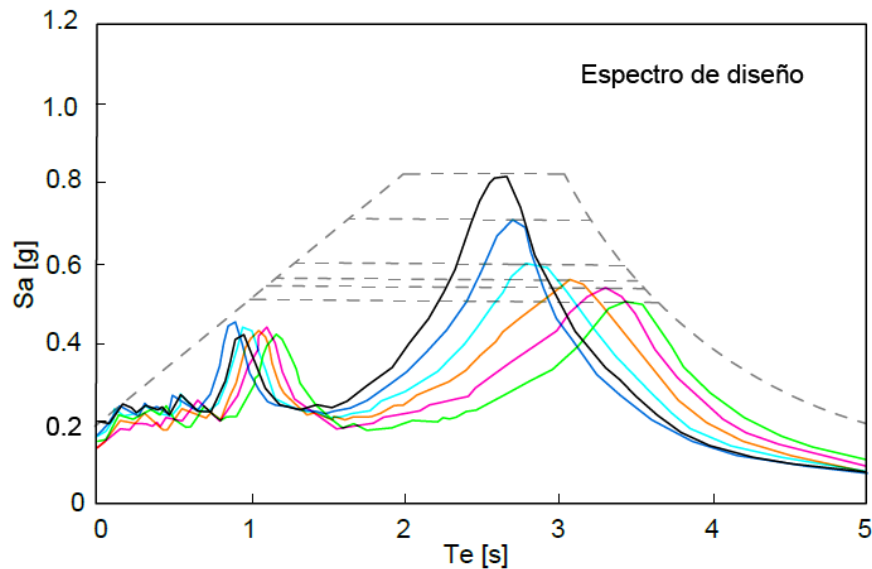


Figura 5. Espectro de diseño sísmico (Libertad, 2018)

La infraestructura civil (*e.g.*, viviendas, puentes, etc.) no puede diseñarse para resistir un evento sísmico en particular en un sitio dado, puesto que el próximo evento probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta, descritos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismo-resistente. Por esta razón, se elaboran espectros de diseño, con bases probabilísticas.

Un espectro de diseño es la curva envolvente de los espectros de respuesta, es decir, un espectro de diseño cubre los distintos espectros de respuesta registrados en un sitio para todas las fuentes sísmicas (ver Figura 5)

En esta sección se describen los parámetros utilizados para el cálculo de espectros utilizados para el diseño de las estructuras, como antecedente se tiene que en el análisis del diseño sísmico de las estructuras se realiza ante colapso y servicio de manera que se deben analizar las distorsiones de las estructuras a través de los desplazamientos con base en las aceleraciones obtenidas de los espectros de diseño.

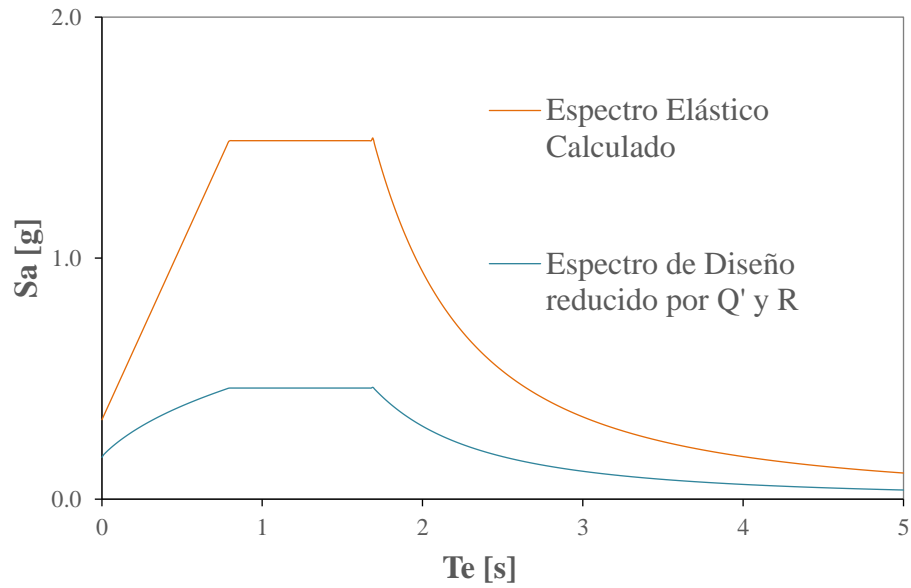


Figura 6. Espectro elástico y espectro de diseño

Los parámetros que definen la forma de los espectros de diseño se muestran en la Figura 7 y sus ordenadas S_a (*i.e.*, valores de aceleración espectral) se obtienen al aplicar las ecuaciones presentadas en esta sección.

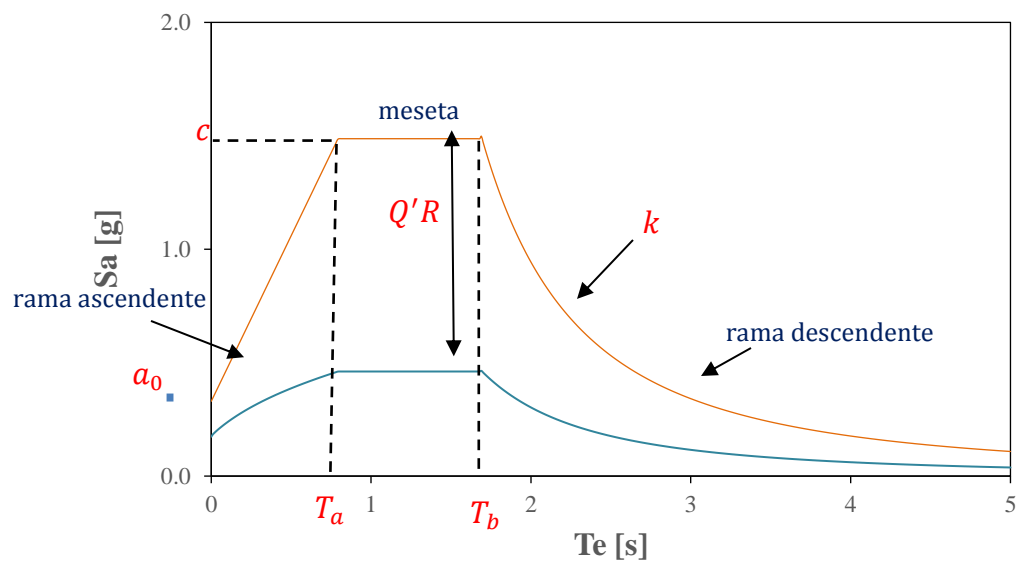


Figura 7. Componentes del Espectro de diseño

$$S_a = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a} & \text{si } T < T_a \\ \beta c & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ \beta c p \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 & \text{si } T > T_b \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

$$p = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 \quad (2)$$

Y β es un factor de reducción por amortiguamiento suplementario, que es igual a uno cuando no se considera la interacción suelo-estructura.

En el Apéndice A de las anteriores NTC-DS-2004 se propone construir espectros de diseño transparentes para un periodo de retorno $T_r = 125$ años, a partir del periodo dominante de vibración del suelo. Con este parámetro, el coeficiente de aceleración del terreno, a_0 , el coeficiente sísmico c , el coeficiente k y los periodos característicos T_a y T_b del espectro de aceleraciones, se obtienen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$a_0 = \begin{cases} 0.12 + 0.23(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 \leq T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 0.35 & \text{si } T_s > 1.5 \text{ s} \end{cases} \quad (3)$$

$$c = \begin{cases} 0.32 + 1.28(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.5 \text{ s} \\ 1.60 & \text{si } 1.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.60 - 0.80(T_s - 2.5) & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 0.80 & \text{si } T_s < 3.5 \text{ s} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_a = \begin{cases} 0.2 + 0.65(T_s - 0.5) & \text{si } 0.5 < T_s \leq 2.5 \text{ s} \\ 1.5 & \text{si } 2.5 < T_s \leq 3.25 \text{ s} \\ 4.75 - T_s & \text{si } 3.25 < T_s \leq 3.5 \text{ s} \\ 0.85 & \text{si } T_s < 3.5 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_b = \begin{cases} 1.35 & \text{si } T_s \leq 1.125 \text{ s} \\ 1.2T_s & \text{si } 1.125 < T_s \leq 3.50 \text{ s} \\ 4.2 & \text{si } T_s > 3.50 \text{ s} \end{cases} \quad (6)$$

$$K = \begin{cases} 2 - T_s & \text{si } 0.5 < T_s \leq 1.65 \text{ s} \\ 0.35 & \text{si } T_s > 1.65 \text{ s} \end{cases} \quad (7)$$

Donde:

a_0 : Corresponde al inicio del espectro y representa la aceleración de campo libre, es decir, en el terreno sin ninguna estructura.

c : Corresponde a la meseta de la curva y representa la aceleración máxima que alcanzan las estructuras con periodo de vibración comprendidos entre T_a y T_b .

T_a : Corresponde al periodo estructural (eje de las abscisas) donde comienza la meseta.

T_b : Corresponde al periodo estructural (eje de las abscisas) donde termina la meseta.

K : Es el parámetro que controla la caída de la rama descendente del espectro.

El espectro de diseño considera tres parámetros importantes que se reflejan en la modificación de las acciones (*i.e.*, incrementan o disminuyen las ordenadas espectrales), dentro de estos parámetros se consideran: 1) el factor de importancia (F_I), 2) el factor de sobre-resistencia (R), y 3) el factor por comportamiento sísmico (Q').

El factor de importancia incrementa las acciones para las estructuras dependiendo del grupo en el que se cataloguen (ver Figura 8).

Para las estructuras del Grupo A se consideran edificaciones cuya falla estructural podría tener consecuencias particularmente graves. Estas estructuras se subdividen en dos subgrupos:

- a) Subgrupo A1 (*e.g.*, hospitales, aeropuertos, terminales y estaciones de transporte, instalaciones militares, centros de operación de servicios de emergencia, subestaciones eléctricas y nucleares, etc.)
- b) Subgrupo A2 (estadios, salas de reuniones, templos y auditorios, escuelas).

Para las estructuras del Grupo B se consideran edificaciones comunes destinadas a viviendas, oficinas, locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el Grupo A.

Las ordenadas espectrales anteriores se multiplicarán por un factor de importancia como se muestra a continuación:

- $F_I = 1.5$ Edificaciones que pertenezcan al subgrupo A1
- $F_I = 1.3$ Edificaciones que pertenezcan al subgrupo A2
- $F_I = 1.0$ Edificaciones que pertenezcan al grupo B

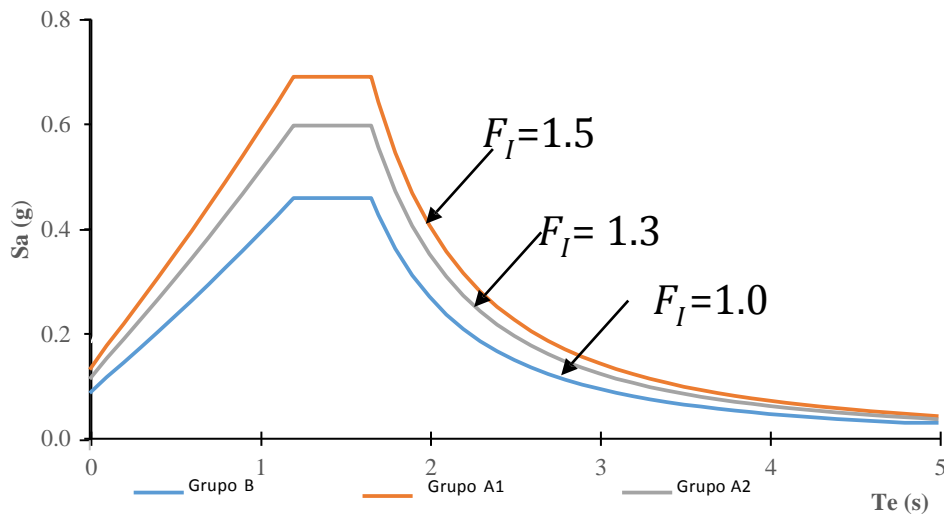


Figura 8. Espectro de diseño variando el Factor de importancia

El factor de reducción por sobre-resistencia reduce las acciones e involucra a dos factores, k_1 y k_2 (ver Figura 9); el factor k_1 es un parámetro de corrección por hiperestaticidad dependiendo del número de crujías del sistema en dirección de análisis y en la dirección normal al eje de análisis y el k_2 es un factor de incremento para estructuras pequeñas y rígidas. R se obtiene con la siguiente expresión:

$$R = k_1 R_0 + k_2 \quad (8)$$

Donde R_0 es un factor básico de sobre-resistencia del sistema estructural, que se tomará igual a: a) 2.0 para estructuras de mampostería, y para sistemas estructurales de concreto, acero o compuestos que cumplen con los requisitos para adoptar un factor de comportamiento (Q) de 3 o mayor; o b) 1.75 para sistemas estructurales de concreto, acero o compuestos a los que se asigna Q menor que 3.

k_1 es igual a: a) 0.8 para sistemas estructurales de concreto, acero o compuestos que tengan menos de tres crujeías resistentes a sismo en la dirección de análisis y dos o menos crujeías resistentes a sismo en la dirección normal a la de análisis; b) 1.0 para estructuras de mampostería, y para sistemas estructurales de concreto, acero o compuestos que tengan tres o más crujeías resistentes a sismo en las dos direcciones de análisis; y c) 1.25 para los sistemas estructurales duales (NTC-DS, 2017). Y k_2 se obtiene con la siguiente expresión:

$$k_2 = 0.5 \left[1 - \left(T/T_a \right)^{1/2} \right] > 0 \quad (9)$$

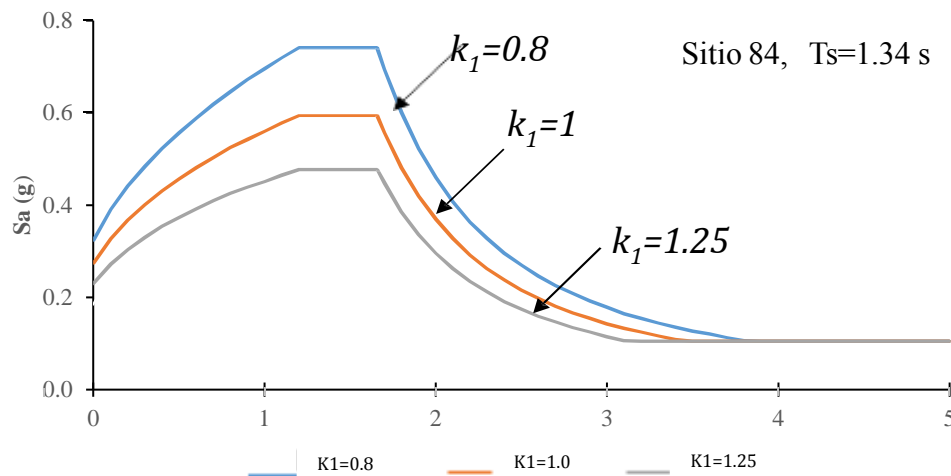


Figura 9. Espectro de diseño variando el factor k_1

Las ordenadas espectrales anteriores del espectro elástico se dividen entre el factor de reducción por comportamiento sísmico Q' , reduciendo las acciones (ver Figura 10); donde Q es el factor de comportamiento sísmico que se encuentra asociado a la ductilidad de la estructuración (*e.g.*, $Q=1-2$ para estructuración con ductilidad baja, $Q=3$ para estructuración con ductilidad media y $Q=4$ para estructuración con ductilidad alta).

$$Q' = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta}{k} \frac{T}{T_a}} & \text{si } T < T_a \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta}{k}} & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta p}{k}} & \text{si } T > T_b \end{cases} \quad (10)$$

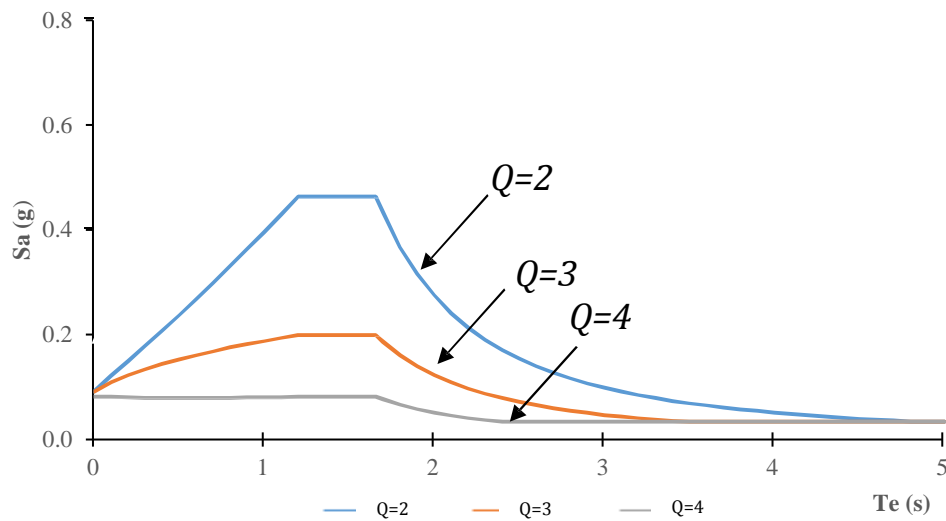


Figura 10. Espectro de diseño variando el factor de reducción por comportamiento sísmico

Para el diseño de estructuras irregulares, el valor de Q' se corregirá multiplicándolo por :

- $F_{IRRE} = 0.8$ Estructura sea irregular
- $F_{IRRE} = 0.7$ Estructura muy irregular
- En ningún caso el factor Q' será menor de 1.0

Capítulo 3

ESPECTROS CON EL PROGRAMA SASID DE LAS NTC-DS-2017

El análisis de la respuesta sísmica de las estructuras de la Ciudad de México se realiza a partir de la interpretación de los espectros de diseño para algún sitio en particular. Como se mencionó en el capítulo anterior el diseño de la infraestructura civil se analiza ante colapso y servicio. Siguiendo ese tenor, se debe obtener el espectro de diseño elástico o transparente (*i.e.*, espectro con $Q = 1$ y $R=1$) y el espectro de diseño reducido (*i.e.*, espectro elástico reducido por Q' , con $Q>1$, y $R\neq 1$). Entonces, el análisis sísmico se basa en el cálculo de las distorsiones de las estructuras a través de los desplazamientos calculados mediante las aceleraciones espectrales obtenidas de los dos distintos espectros.

Con base en las consideraciones anteriores, es necesario obtener el espectro elástico y el espectro de diseño. Actualmente, las NTC-DS-2017 proponen la base de datos denominada Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, donde es posible conseguir ambos espectros a partir de la localización geográfica de la estructura de interés. Esta base de datos, ofrece practicidad y simplicidad en la obtención de los espectros de diseño, a diferencia del método propuesto por las NTC-DS-2004. En la normativa NTC-DS-2004 se establece el cálculo de distintos parámetros y factores a partir de tablas y ecuaciones empíricas con el fin de obtener los espectros de diseño. En la base de datos SASID versión 2017 se adjuntaron todos los parámetros y factores requeridos para el

análisis del espectro de diseño, para que mediante la localización geográfica del sitio y la elección de ciertas características estructurales se obtengan los espectros de diseño correspondientes.

A continuación se describen los elementos que componen esta versión, así como su interpretación. La base de datos SASID 2017 consta de cinco elementos principales: a) selección de coordenadas, b) mapa, c) factores sísmicos para el espectro, d) propiedades del espectro generado y e) gráfica y datos (ver Figura 11).

- a. *Selección de coordenadas*: se tiene tres formas distintas para poder seleccionar una coordenada dentro del mapa: Punto, Coordenada o Dirección.
- b. *Mapa*: El mapa tiene dos funciones principales. En primer lugar permite seleccionar una coordenada utilizando el ratón, y en segundo lugar observar la ubicación de la coordenada seleccionada.
- c. *Factores sísmicos para el espectro*: Los espectros de diseño obtenidos no sólo dependen de la coordenada seleccionada, también dependen de los factores sísmicos. Los factores sísmicos se pueden indicar en los submenús desplegables donde se indican a) factor de importancia, b) factor de irregularidad, c) factor de comportamiento sísmico y d) factor de hiperestaticidad.
El factor de sobre-resistencia (R), está en función del factor de comportamiento sísmico y el de hiperestaticidad, por lo que dicho factor no puede ser elegido directamente por el usuario.
- d. *Propiedades del espectro generado*: El software visualiza el espectro elástico y el espectro de diseño con las consideraciones de los factores sísmicos y las coordenadas señaladas. Así mismo se pueden desplegar los datos tabulados para ambos espectros al seleccionar mostrar datos.
- e. *Gráfica y datos*: Los valores mostrados son sólo informativos. Estos corresponden, de arriba a abajo de la tabla, a: latitud y longitud de la coordenada seleccionada; periodo del suelo; aceleración máxima del espectro de diseño. Y el espectro de peligro uniforme, utilizado para obtener los valores característicos, se puede visualizar en la gráfica seleccionando la casilla, mostrar EPU.

Los espectros calculados se pueden exportar en distintos formatos. Todas las opciones para exportar, permitirán exportar la coordenada seleccionada, los datos del espectro, los factores utilizados y las propiedades sísmicas. De manera predeterminada el espectro exportado es el de diseño, sin embargo se puede obtener el elástico o el de peligro uniforme. Para ello se debe seleccionar el botón (mostrar/ocultar datos), mostrándose la tabla de datos del espectro; debajo del botón indicado aparece un menú desplegable que le permite indicar los datos de cuál espectro se desea visualizar. Dichos datos visualizados también son los que se exportan. Los formatos en los que se puede

exportar son los siguientes: a) archivo PDF, b) archivo de texto separado por tabulaciones (.txt) c) archivo separado por comas (.csv).

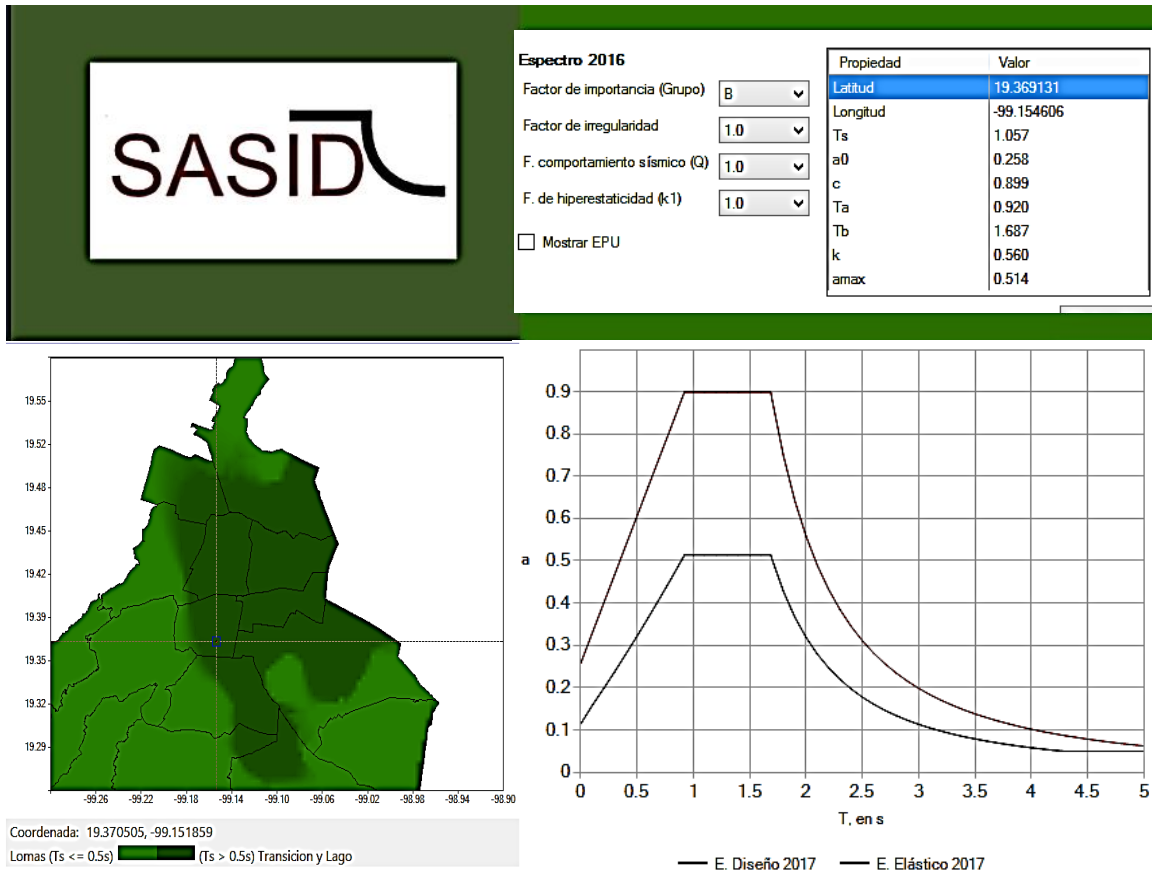


Figura 11. Espectros de diseño y elástico del SASID

En Junio del 2020 entró en vigor una actualización del Reglamento de Construcción de la Ciudad de Mexico, donde en sus Normas Tecnicas Complementarias, diseño por sismo se propone una actualización del software SASID. En esta actualización, se sustituye la descarga y ejecución del archivo (.exe) para su instalación, en su lugar, las normas guían a una dirección de internet en la que se accede al SASID (<https://bit.ly/3xWvpaS>). En esta página web se encuentra la base de datos para obtener el espectro elástico para el sitio de estudio, así como el afectado por los factores de reducción por comportamiento sísmico (Q') y por sobre-resistencia (R), que se usan para revisar el estado límite de prevención de colapso y de servicio, respectivamente.

Esta base de datos, consta de cuatro elementos principales: a) selección de coordenadas, b) mapa, c) factores sísmicos para el espectro, d) gráfica y e) documento generado, en el que se proporcionan los espectros calculados y los parámetros del mismo.

En esta actualización, no se establece un factor de comportamiento sísmico fijo como en la versión de 2017, a diferencia, se calculan los espectros de diseño para los distintos valores del Q , (*e.g.*, $Q = 1$, $Q = 1.5$, $Q = 2$, $Q = 3$ y $Q = 4$).

Así mismo, en esta actualización se obtiene una carpeta (.zip) la cual contiene un documento en formato (PDF) con el espectro generado, factores sísmicos para los espectros, el mapa, los espectros de diseño y el espectro de peligro uniforme y tablas de datos (ver Figura 12); así como dos documentos en formato (.txt) de los espectros calculados.

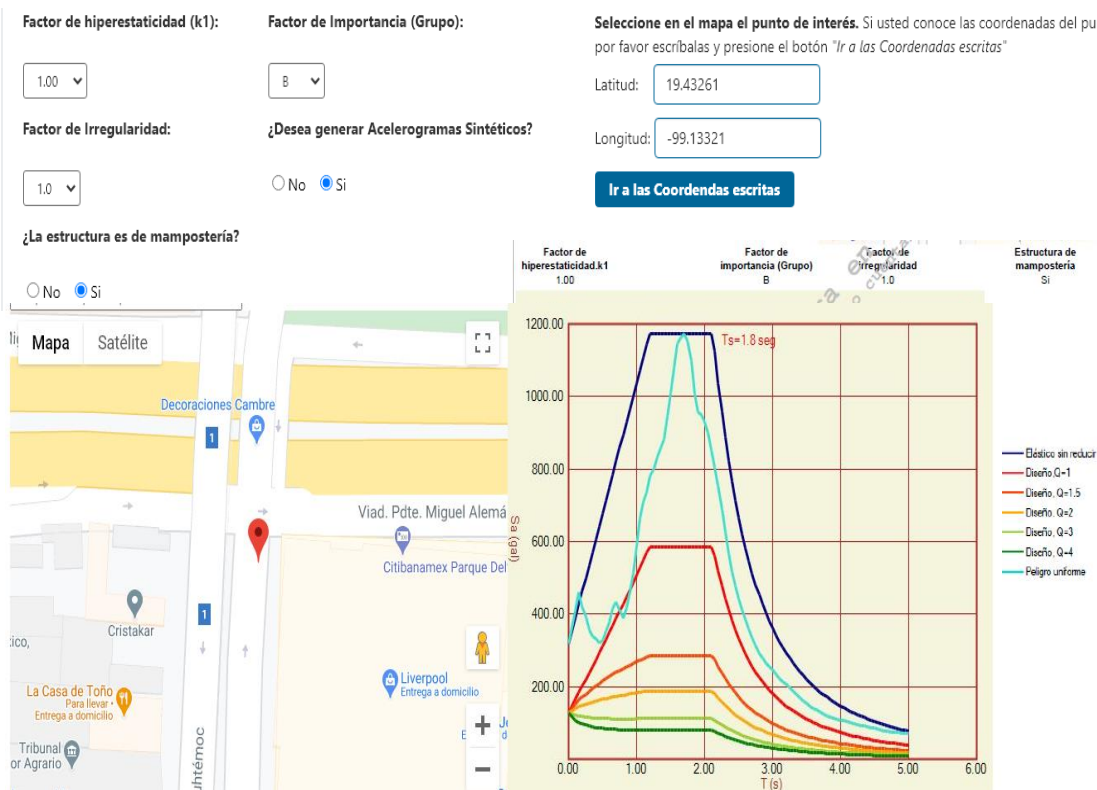


Figura 12. Actualización de la base de datos del SASID

Sin embargo, aún esta actualización se encuentra en modo de pruebas por lo que todo el material y productos ofrecidos por el sistema, tienen carácter de evaluación, por lo que actualmente no cuentan con validez oficial o técnico.

Capítulo 4

PROPIEDADES DINÁMICAS PARA UN SITIO EN LA CDMX

El movimiento en los depósitos lacustres de la Ciudad de México genera amplificaciones dinámicas producto de los efectos locales asociados a las características de las unidades estratigráficas compuestas por materiales blandos, o sueltos. Como se mencionó en el capítulo anterior, la amplitud de las ondas sísmicas con periodos dominantes del suelo cercanos a 2 s en la Zona de Lago puede llegar a ser 50 veces mayor que en un sitio de suelo firme de la Ciudad de México. Sin embargo, las ondas sísmicas en el suelo firme de la ciudad, sufren también efectos amplificación con respecto a otros lugares fuera de la Ciudad de México (*e.g.*, las ondas sísmicas en Ciudad Universitaria llegan ser 10 veces más grandes que la de un sitio de terreno firme fuera de la ciudad tal como la de la ciudad de Cuernavaca), por lo que la amplitud en la Zona de Lago puede ser de 300 a 500 veces mayor.

Las ondas inducen un efecto de difracción múltiple al encontrarse con las fronteras entre estratos, generan interferencias destructivas y constructivas que se traducen en atenuaciones y amplificaciones, respectivamente. Para determinar la respuesta dinámica del terreno y establecer los efectos de amplificación, es fundamental conocer sus propiedades dinámicas, tales como:

1. Velocidad de propagación de ondas compresionales (V_p)
2. Velocidad de propagación de ondas de corte (V_s)
3. Módulos elastodinámicos (E y G)

Las ondas sísmicas se propagan a una velocidad que depende de las características del medio que atraviesen. Las ondas internas se propagan desde el origen de la perturbación hasta la superficie del medio y se dividen en ondas primarias o longitudinales (V_p) y en ondas secundarias o de corte (V_s).

Las ondas primarias son longitudinales, es decir, que generan desplazamientos compresionales en la misma dirección en la que se propaga la onda. Las ondas secundarias o de corte son transversales, es decir, provocan desplazamientos en la dirección perpendicular a la propagación de la onda. Las ondas primarias son más rápidas que las secundarias. La velocidad de onda en el suelo se mide comúnmente en m/s . Los depósitos de suelo compresibles del subsuelo de la Ciudad de México se caracterizan por tener velocidades de onda, V_s , particularmente bajas. Se han llegado a medir valores incluso inferiores a $V_s = 30 m/s$ en suelos altamente compresibles.

A partir del conocimiento de los valores de velocidad de propagación de ondas, y en complemento con los valores de los pesos volumétricos de los materiales que caracterizan al depósito de suelo estudiado, se establecen las siguientes propiedades dinámicas: 1) Relación de Poisson (ν), 2) Módulo dinámico de rigidez (G) y 3) Módulo dinámico de elasticidad (E). El paso de las ondas sísmicas produce esfuerzos y deformaciones en el medio en el que se propagan. La relación entre estos parámetros se define a través de los módulos elastodinámicos E y G , los que se asocian con las ondas de compresión y de cortante, respectivamente. Se pueden obtener mediante las siguientes expresiones:

$$G = V_s^2 \rho \quad (11)$$

$$E = 2G(1 - \nu) \quad (12)$$

Adicionalmente, a partir de las velocidades de propagación de ondas, es posible obtener la relación de Poisson (ν) a partir de la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (13)$$

A estas propiedades dinámicas se suman las de tipo geométrico, principalmente, el espesor compresible del depósito (H) por el que viajan las ondas. En función del espesor del depósito (H) y la velocidad con que viajan las ondas de cortante (V_s), se determina el periodo dominante de vibración del suelo (T_s). La expresión que asocia estos parámetros queda definida por:

$$T_s = \frac{4H}{V_s} \quad (14)$$

A su vez, el amortiguamiento del material es otra de las propiedades dinámicas de los suelos que influye en su comportamiento y está relacionado con la capacidad de disipar energía. Entre más alta es la relación de amortiguamiento, mayor es su capacidad de disipar energía. Las amplificaciones dinámicas que presentan los suelos de la ciudad se han caracterizado a través del periodo dominante de vibración del suelo. Por ello, las fronteras entre las zonas sísmicas establecidas en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal coinciden con curvas de igual periodo dominante de vibración del suelo (T_s).

Se considera que la velocidad de propagación de onda de corte y el amortiguamiento del suelo son propiedades que cambian poco con el paso del tiempo, mientras que el espesor del depósito compresible y el periodo dominante de vibración asociado, controlan los mayores cambios en la respuesta sísmica de los depósitos del subsuelo de la Ciudad de México.

4.1 Velocidad de propagación de ondas de corte

Como producto del hundimiento regional y la consecuente disminución del espesor del suelo compresible, se produce un cambio en la estructura del depósito que se traduce en un incremento de su rigidez. Esto a su vez genera una alteración en la velocidad de propagación de ondas en el suelo. Resulta particularmente importante observar estos cambios en la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) para estimar la respuesta dinámica del depósito. Se considera que si la rigidez (G) crece en función del tiempo, la magnitud de la velocidad de propagación de ondas de corte también se incrementa. Se destaca que el aumento de la velocidad se ve atenuado por el ligero crecimiento esperado de la densidad del suelo (ρ).

Con objeto de identificar cómo evoluciona el espectro de diseño en un periodo de 50 años se caracterizó dinámicamente a los materiales que componen al depósito de suelo en el sitio de interés, ejecutándose dos sondeos de exploración directa e indirecta en el

sitio de estudio: 1) Un ensaye de Down Hole (*DH*) y 2) Un punto de monitoreo de Vibración Ambiental (*VA*).

Por medio del ensaye de Down Hole se establecieron las velocidades de propagación de ondas de corte (V_s) de las unidades estratigráficas que componen al depósito de suelo. Los resultados obtenidos del *DH* en los materiales del subsuelo que son susceptibles de generar la mayor amplificación dinámica del sitio se presentan numéricamente en la Tabla 2. En esta tabla se presentan los valores de la velocidad de ondas longitudinales (V_p) y los de la velocidad de ondas transversales (V_s) (ver Figura 16) así como, los valores de la relación de Poisson (ν), el módulo dinámico de rigidez (G) y el módulo dinámico de elasticidad (E).

4.2 Espesor de los depósitos compresibles

El espesor compresible de un depósito de suelo es un parámetro geométrico determinante en la respuesta dinámica. El cambio del espesor del depósito se refleja directamente en una respuesta dinámica distinta. El espesor de un depósito compresible se reduce por el proceso de consolidación bajo una carga sostenida. Sin embargo, este proceso se puede generar o acelerar cuando la consolidación es inducida por la extracción de agua a través los materiales permeables profundos.

En la Figura 13 se muestra el mapa con curvas de igual espesor de la Ciudad de México que aparece en las anteriores NTC-DS-2004 del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.

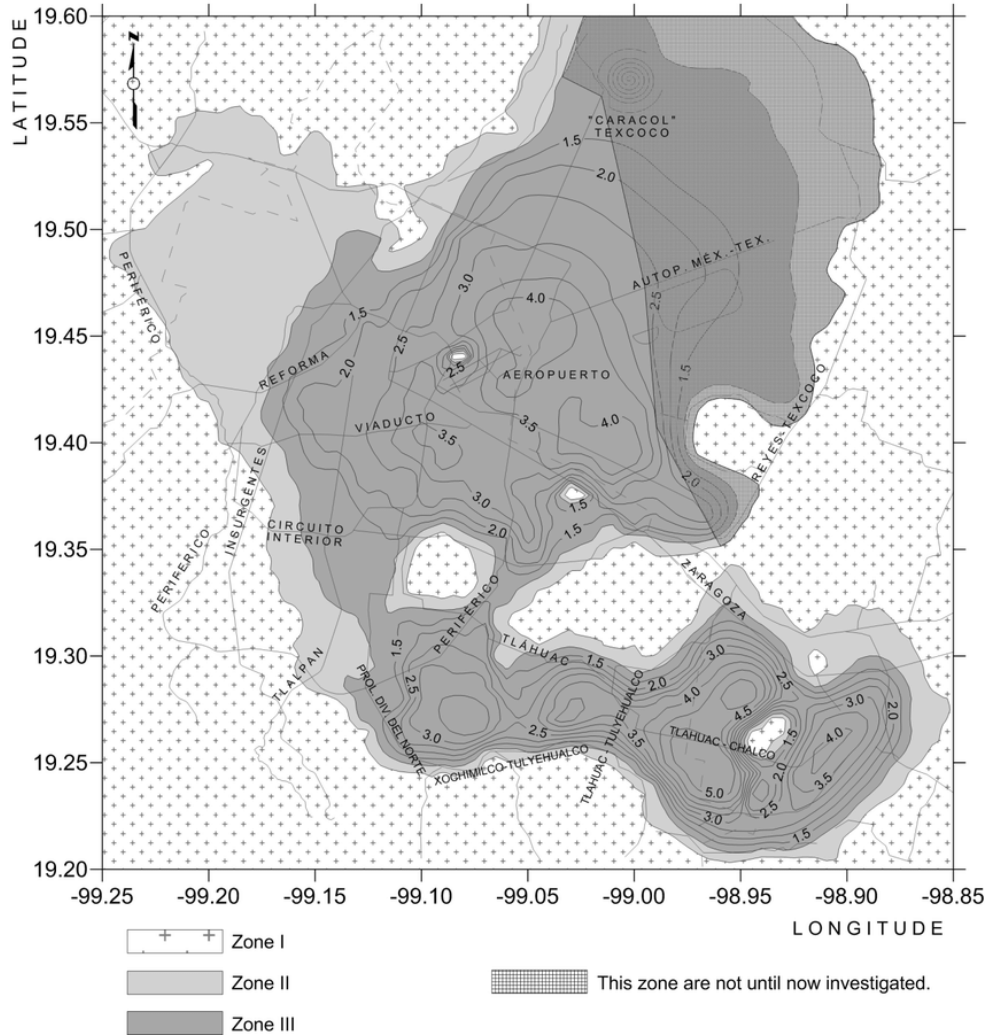


Figura 13. Mapa con curvas de igual espesor para la Ciudad de México (NTC-DS, 2004)

El fenómeno de hundimiento regional ha generado a través del tiempo la disminución gradual del espesor del suelo compresible. Este efecto se presenta en el siguiente capítulo determinándose a partir de un proceso iterativo que inicia con el espesor original (H), y una velocidad promedio de hundimiento regional (V_H) establecida en el sitio de interés a partir de un banco de nivel cercano a la zona. En la misma sección se presenta el comportamiento evolutivo del periodo dominante de vibración del suelo (T_s) del sitio en los próximos 50 años.

4.3 Periodo dominante de vibración del suelo

Cualquier cuerpo sometido a una vibración requiere de tiempo para completar un ciclo, o una longitud de onda, es decir, que tras el paso de la onda y el movimiento que esta impone, el cuerpo regresa a la misma posición de la que partió. Ese tiempo se conoce

como periodo de vibración (T_s) y comúnmente se mide en segundos (s). Se sabe que el periodo dominante de vibración del suelo se asocia con el espesor del depósito y con la velocidad de propagación de ondas de corte, a través de la Ecuación 14. Con esta relación se establece que al disminuir el espesor compresible del depósito (H) y aumentar la velocidad de propagación de ondas (V_s) con el tiempo, se genera una disminución en el periodo dominante de vibración del suelo (T_s). En la Figura 14 se muestra el mapa de isoperiodos del subsuelo de la Ciudad de México.

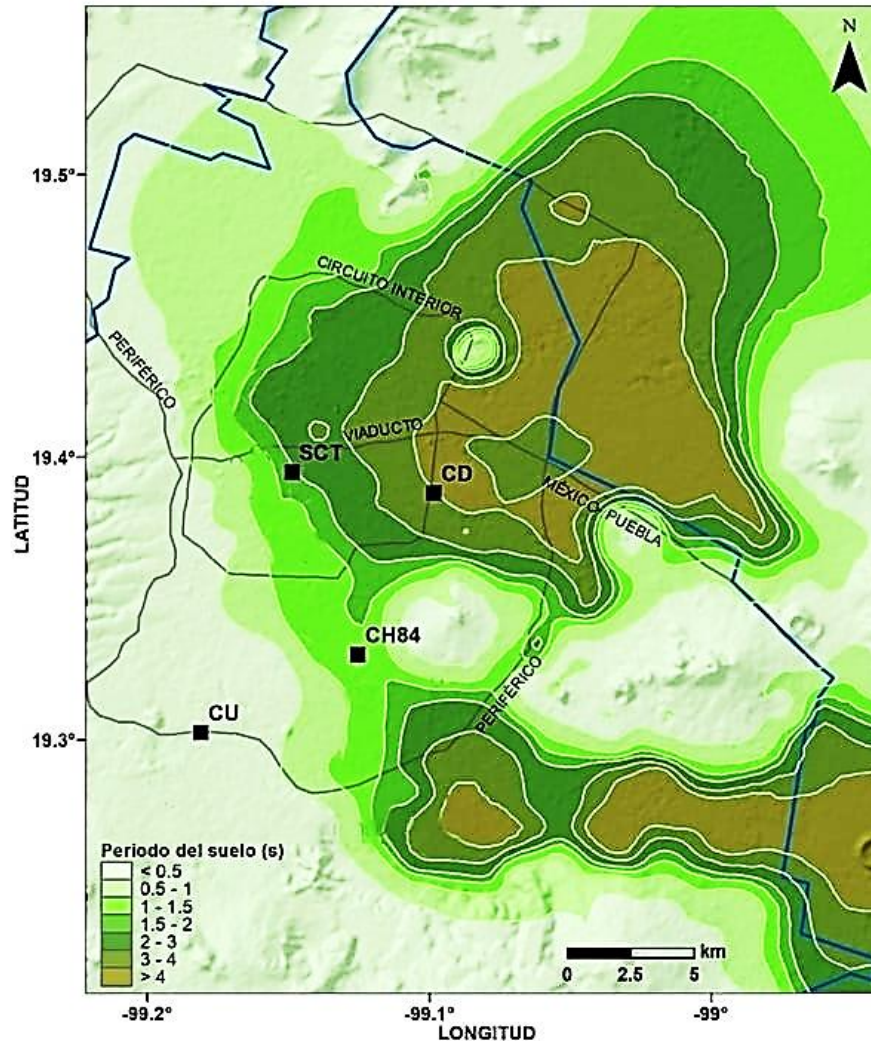


Figura 14. Mapa de isoperiodos del subsuelo de la Ciudad de México

Para construir el modelo geodinámico del sitio se emplearon las propiedades dinámicas obtenidas del Down Hole y el monitoreo de la Vibración Ambiental. De acuerdo con la información proporcionada, se analizaron los registros capturados durante la campaña de Vibración Ambiental (VA) para establecer el intervalo en que se ubica el periodo dominante de vibración en el sitio de estudio.

Y con el fin de justificar el resultado obtenido de los cocientes espectrales, se realizó el cálculo del periodo dominante de vibrar del suelo (T_s) mediante las velocidades de propagación de onda (V_s) registradas del Down Hole. Siguiendo el criterio de las NTC-DS-2020 (Ecuación 15), presentado en la siguiente sección.

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i} \right) \left(\sum_{i=1}^N \gamma_i d_i (x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2) \right)} \quad (15)$$

4.4 Amortiguamiento del material

El amortiguamiento material del suelo contribuye a establecer el nivel de amplificación dinámica que genera un depósito al ser sometido a una excitación. Se sabe que esta propiedad dinámica depende fuertemente del índice de plasticidad del suelo y del nivel de deformación angular a que esté expuesto (Dobry y Vucetic, 1987). Sin embargo, para los fines de esta investigación, la variación del amortiguamiento material en función del tiempo es sólo dependiente de la modificación que la estructura del suelo sufra durante la consolidación. Ello producirá que con el tiempo, el amortiguamiento del suelo tienda a aumentar.

Se considera que las fronteras del estado plástico de consistencia del suelo permanecen prácticamente constantes en función del tiempo. Por tanto, al conservarse el intervalo del índice plástico las modificaciones en el amortiguamiento material deben ser mínimas. Se ha establecido que el incremento del amortiguamiento en función del tiempo es mínimo, incluso muy por debajo del 1% anual. Con base en lo anterior la evolución del amortiguamiento a través del tiempo, para fines de este estudio no es considerada.

4.5 Determinación de las propiedades dinámicas para un sitio de la CDMX

En este estudio se realiza el análisis de la variación de los espectros de diseño sísmico para estructuras del Grupo B, considerando el efecto del hundimiento regional en función del tiempo, asociada al cambio de los parámetros dinámicos del suelo, para un sitio ubicado al oriente de la Ciudad de México, con coordenadas geográficas (19.4049735, -99.0990472).

El terreno donde se encuentra el sitio de análisis se localiza dentro de la Zona de Lago de la Ciudad de México, caracterizado por presentar depósitos predominantemente arcillosos con más de 60 m de espesor, con baja resistencia al esfuerzo cortante, alta deformabilidad, periodo dominante de vibración muy largo y efectos considerables de amplificación dinámica.

Con base en estas condiciones se suscita la necesidad de estudiar la respuesta sísmica del terreno con objeto de determinar los espectros de diseño recomendados para la revisión sísmica de las estructuras en este sitio. Con ello, se busca definir con detalle el nivel de aceleración espectral al que se encontrará expuesta la infraestructura civil ante la ocurrencia de sismos severos en el futuro. Aunado al cálculo del espectro de diseño para este sitio, se analiza la evolución de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) y el cambio del periodo dominante de vibración del suelo (T_s) generados por el hundimiento regional que se presenta en los depósitos lacustres del subsuelo de la Ciudad de México, los cuales inducen la variación en la respuesta dinámica del suelo.

Como punto de partida se obtienen las propiedades dinámicas del sitio a partir de los registros del Down Hole y el monitoreo de la Vibración Ambiental realizados en las coordenadas UTM presentadas en la Tabla 1, con el fin de obtener el periodo dominante de vibración del suelo (T_s) y realizar el cálculo de los espectros de diseño para el sitio.

Tabla 1. Coordenadas UTM de los trabajos de exploración

Exploración	Coordenadas UTM	
	Este (m)	Norte (m)
DH	489,656.70	2,145,603.00
VA	489,656.70	2,145,603.00

A partir de los espectros de Fourier calculados de los registros de la VA, se obtuvo la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (técnica de Nakamura, $REHV$ o H/V , para determinar las frecuencias dominantes de

vibración del terreno. En la Figura 15 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la técnica H/V para los sitios donde se realizó el monitoreo de la VA.

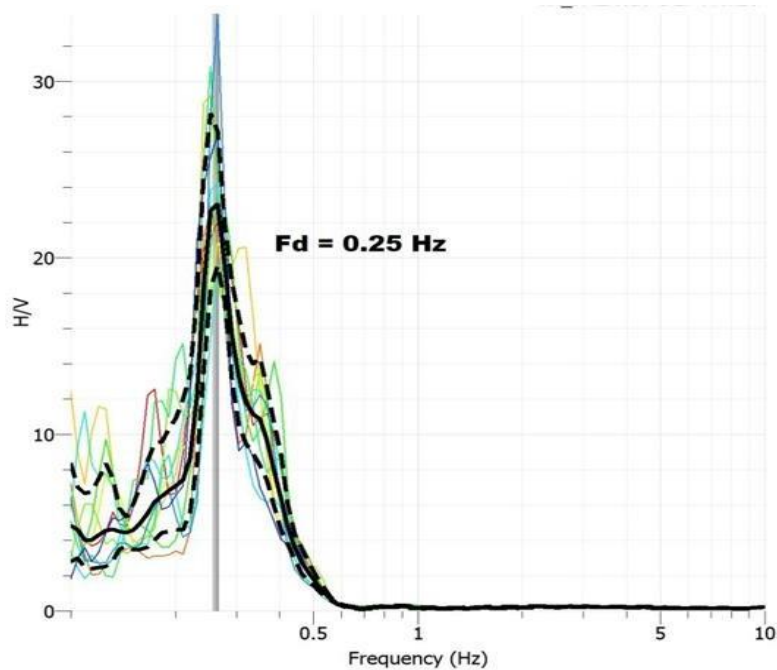


Figura 15. Cocientes espectrales obtenidos de los registros de Vibración Ambiental

Con base en los cocientes calculados y presentados en la Figura 15 se ha determinado que la frecuencia característica del sitio se ubica en 0.25 Hz, asociada con un periodo dominante de vibración del terreno de $T_s = 4.0$ s.

Mediante los trabajos exploratorios del Down Hole se obtuvieron los registros de las velocidades de propagación del onda de corte (V_s) y velocidad de propagación de ondas longitudinales (V_p) en cada metro a una profundidad de $H = 72m$. Siguiendo las Ecuaciones 11, 12 y 13, previamente presentadas, se realizaron los cálculos para la obtención de los parámetros de ν , G y E (ver Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades dinámicas del sitio (19.4049735,-99.0990472)

Profundidad (m)	Inclinación		Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ (ton/m ³)	Relación de Poisson	G (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
	E (m)	N (m)						
1	-0.017	-0.011	785	247	1.48	0.45	918	2653
2	-0.038	-0.005	812	119	1.48	0.49	214	636
3	-0.058	0.007	903	107	1.48	0.49	171	509
4	-0.076	0.02	1307	106	1.29	0.50	148	442
5	-0.095	0.028	1431	73	1.29	0.50	70	209
6	-0.112	0.033	1466	74	1.29	0.50	71	214
7	-0.131	0.03	1499	54	1.29	0.50	39	115
8	-0.152	0.027	1403	23	1.29	0.50	7	21
9	-0.175	0.023	1543	64	1.29	0.50	54	163
10	-0.196	0.013	1466	60	1.17	0.50	42	127
11	-0.215	-0.003	1478	103	1.17	0.50	126	376
12	-0.232	-0.02	1525	99	1.10	0.50	110	331
13	-0.251	-0.036	1481	28	1.10	0.50	9	26
14	-0.271	-0.046	1563	26	1.10	0.50	8	23
15	-0.297	-0.054	1425	25	1.10	0.50	7	21
16	-0.331	-0.061	1433	22	1.10	0.50	5	16
17	-0.373	-0.066	1597	20	1.10	0.50	5	14
18	-0.417	-0.071	1446	31	1.10	0.50	11	32
19	-0.46	-0.076	1472	73	1.10	0.50	59	177
20	-0.49	-0.088	1592	81	1.10	0.50	73	220
21	-0.509	-0.1	1480	43	1.12	0.50	21	64
22	-0.52	-0.11	1462	32	1.12	0.50	11	34
23	-0.528	-0.119	1465	75	1.12	0.50	63	190
24	-0.539	-0.125	1489	27	1.12	0.50	9	26
25	-0.556	-0.129	1469	27	1.12	0.50	8	24
26	-0.577	-0.138	1471	79	1.12	0.50	72	215
27	-0.603	-0.148	1495	71	1.12	0.50	58	173
28	-0.631	-0.16	1474	42	1.12	0.50	20	59
29	-0.662	-0.174	1476	42	1.12	0.50	20	59
30	-0.698	-0.185	1499	47	1.16	0.50	26	79
31	-0.734	-0.198	1478	52	1.16	0.50	31	94
32	-0.772	-0.216	1479	49	1.16	0.50	29	86
33	-0.815	-0.234	1502	56	1.16	0.50	37	110
34	-0.864	-0.252	1480	46	1.16	0.50	25	74
35	-0.912	-0.271	1481	47	1.16	0.50	26	79
36	-0.961	-0.288	1504	62	1.16	0.50	45	134
37	-1.012	-0.301	1482	47	1.16	0.50	27	80
38	-1.065	-0.316	1483	32	1.22	0.50	13	38
39	-1.118	-0.334	1506	199	1.22	0.49	491	1466
40	-1.171	-0.358	1628	238	1.22	0.49	703	2093

Tabla 2. Continuación

Profundidad (m)	Inclinación		Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ (ton/m ³)	Relación de Poisson	G (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
	E (m)	N (m)						
41	-1.223	-0.385	1656	160	1.22	0.50	318	952
42	-1.271	-0.42	1629	133	1.22	0.50	218	654
43	-1.322	-0.458	1508	133	1.22	0.50	219	655
44	-1.367	-0.494	1486	108	1.22	0.50	145	433
45	-1.404	-0.526	1486	107	1.24	0.50	144	431
46	-1.438	-0.555	1509	178	1.24	0.49	399	1191
47	-1.473	-0.583	1487	133	1.24	0.50	225	674
48	-1.506	-0.603	1487	52	1.24	0.50	34	102
49	-1.538	-0.615	1509	77	1.32	0.50	80	240
50	-1.57	-0.63	1487	108	1.32	0.50	158	473
51	-1.605	-0.652	1487	118	1.32	0.50	187	561
52	-1.643	-0.678	1660	252	1.32	0.49	849	2529
53	-1.687	-0.708	1488	171	1.45	0.49	433	1294
54	-1.737	-0.743	1510	252	1.45	0.49	940	2793
55	-1.785	-0.777	1634	252	1.45	0.49	942	2804
56	-1.83	-0.806	1511	202	1.45	0.49	602	1796
57	-1.876	-0.827	1634	253	1.45	0.49	946	2816
58	-1.917	-0.843	1661	253	1.45	0.49	948	2822
59	-1.963	-0.86	1690	202	1.45	0.49	605	1806
60	-2.009	-0.881	1662	254	1.45	0.49	951	2831
61	-2.055	-0.902	1720	250	1.47	0.49	937	957
62	-2.101	-0.923	1750	258	1.47	0.49	997	1020
63	-2.147	-0.944	1785	265	1.47	0.49	1052	1076
64	-2.193	-0.965	1815	271	1.47	0.49	1100	1126
65	-2.239	-0.986	1840	278	1.47	0.49	1158	1185
66	-2.285	-1.007	1860	283	1.49	0.49	1216	1245
67	-2.331	-1.028	1870	290	1.49	0.49	1277	1309
68	-2.377	-1.049	1875	296	1.49	0.49	1331	1365
69	-2.423	-1.07	1860	302	1.50	0.49	1395	1432
70	-2.469	-1.091	1840	308	1.50	0.49	1451	1492
71	-2.469	-1.091	1820	314	1.50	0.48	1508	1554
72	-2.469	-1.091	1800	320	1.50	0.48	1566	1617

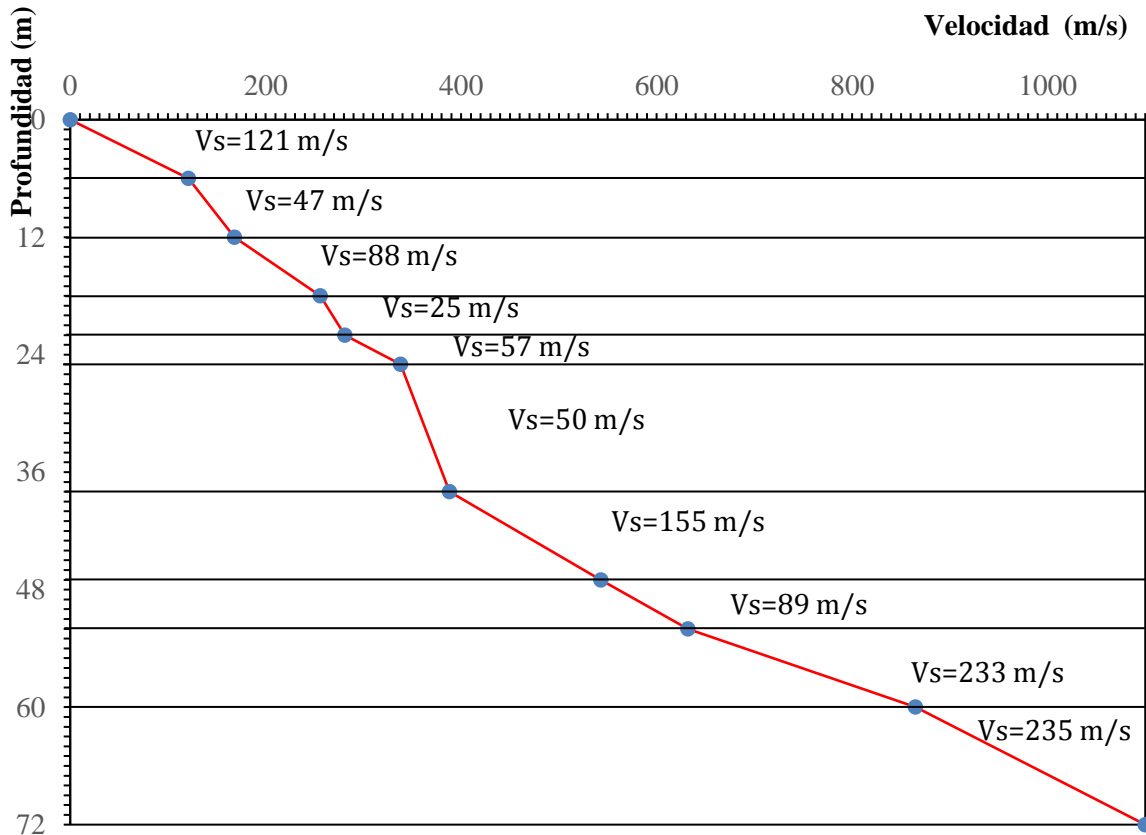


Figura 16. Registros de V_s obtenidos del Down Hole

A partir del criterio de las NTC-DS-2020 se realizó el cálculo del periodo dominante de vibración del suelo siguiendo la Ecuación 15, previamente presentada. Donde involucra tanto el espesor del estrato (d_i) y el peso volumétrico del material (γ_i), como el módulo de rigidez del material (G), el cual se encuentra en función de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s), como se justificó anteriormente. La funcionalidad de este método, es que a diferencia de otros (*e.g.*, el método de las velocidades y lentitudes) considera la posición de los estratos en el cálculo del periodo dominante de vibración. De acuerdo con este planteamiento, se determinó analíticamente que el periodo dominante de vibración del suelo $T_s = 4.0$ s. Por lo que queda aceptado y justificado el valor obtenido con los valores registrados de la VA.

Asentado el valor del periodo dominante de vibración del suelo $T_s = 4.0$ s, obtenido mediante los registros de Vibración Ambiental y calculado analíticamente a partir de las velocidades de propagación de onda registradas con la exploración por Down Hole en el sitio (19.4049735, -99.0990472). En el siguiente capítulo se presenta el cálculo de los espectros de diseño en función del periodo dominante de vibración del suelo $T_s = 4.0$ s.

Capítulo 5

DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO

En términos generales, los espectros de diseño sísmico establecidos en los manuales y reglamentos ofrecen una configuración robusta por incluir, para las diferentes zonas geo-sísmicas, un amplio intervalo de sitios con respuestas dinámicas diversas. Con base en los resultados obtenidos, los espectros de diseño sísmico representativos del sitio se consideran a aquellos que cubren a los espectros de respuesta promedio.

A continuación se presentan los espectros de diseño calculados para el sitio de interés, con coordenadas geográficas (19.4049735, -99.0990472) para estructuras del Grupo B, así como los parámetros que lo forman calculados con las Ecuaciones 1-10. Estos parámetros (*i.e.*, a_0 , c , T_a , T_b y k) presentados en la Tabla 3, se calculan en función del periodo dominante de vibración del suelo $T_s = 4.0$ s. Se presentan los espectros de diseño considerando cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$. La forman que adoptan estos espectros de diseño se muestran en la Figura 17.

Es importante destacar que los espectros calculados en esta sección corresponden al año 2020, pues es el año en que se realizaron los trabajos exploratorios y la época en que se calculó el periodo dominante de vibración del suelo.

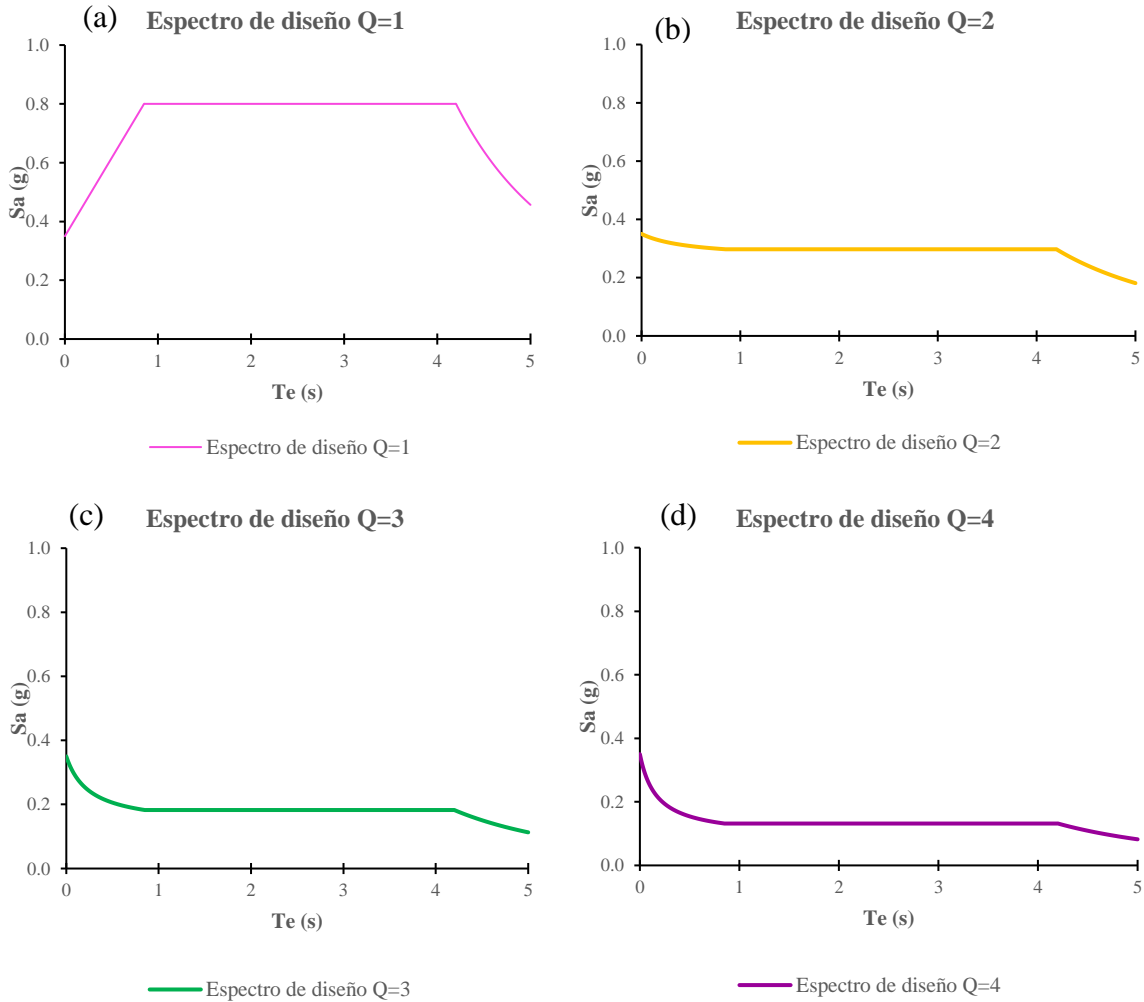


Figura 17. Espectros calculados para un $T_s = 4$ s, (a) Espectro de diseño reducido con $Q=1$, (b) Espectro de diseño reducido con $Q=2$, (c) Espectro de diseño reducido con $Q=3$ y (d) Espectro de diseño reducido con $Q=4$

Tabla 3. Parámetros que forman el espectro de diseño con $Q=1$ en el año 2020 con $T_s=4s$

Año	T_s (s)	a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	K	β
2020	4 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1

Nótese que en este sitio que presenta un periodo de vibración largo ($T_s = 4.0$ s) dadas las condiciones de los depósitos lacustres. Se observa que el espectro de diseño con $Q=1$, inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35$ g, la aceleración espectral máxima que pueden experimentar las estructuras en este sitio se presenta con $c =$

0.8 g , mientras que los espectros de diseño con $Q > 1$, alcanzan valores de casi $c = 0.4 g$ para estructuras con baja ductilidad, y cercanos a $c = 0.2 g$ para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es muy pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 0.85$ y $T_b = 4.2$. En la Figura 18 se presenta la comparación entre el espectro de diseño para el sitio de estudio.

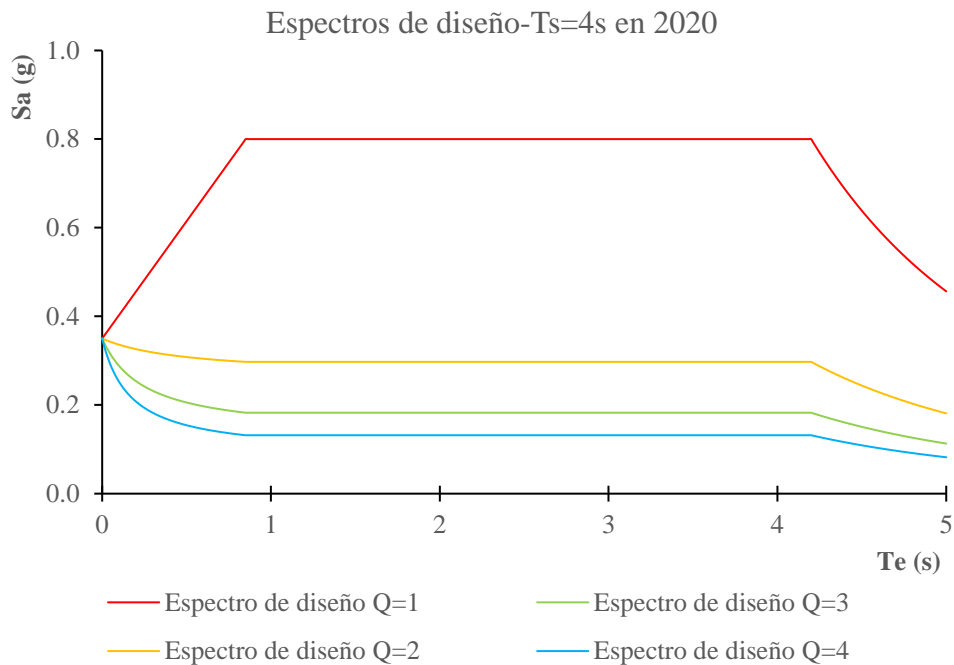


Figura 18. Comparación del espectro de diseño reducido con $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ para un $T_s=4$ s

Capítulo 6

DETERMINACIÓN DE ESPECTRO DE DISEÑO A 50 AÑOS

Con objeto de estudiar los cambios en el espesor de los depósitos lacustres de la cuenca del valle de México, se han analizado los hundimientos observados en la superficie. Aquellos sitios con depósitos compresibles mayores presentan velocidades de hundimiento altas, mientras que las menores velocidades están asociadas a sitios con menor espesor compresible. Bajo esta observación se asume que la tasa con que se reduce el espesor del suelo compresible decrece en función del tiempo.

Considerando lo anterior el fenómeno del hundimiento regional afecta en el diseño de la infraestructura civil si no se realiza un diseño adecuado considerando el hundimiento regional en el análisis de asentamientos a largo plazo, interacción suelo estructura y en el comportamiento sísmico de la estructuras, ante la ocurrencia de algún evento sísmico.

6.1 SEHEDIS

El análisis de la respuesta dinámica del subsuelo de la Ciudad de México requiere considerar el hundimiento regional de la ciudad como se mencionó en secciones previas. Se estima que en algunas zonas de la ciudad existe una velocidad de hundimiento $V_H \geq 10 \text{ cm/año}$. Fenómeno que interviene en la respuesta dinámica de los depósitos lacustres del subsuelo de la Ciudad de México. Al considerar que el

fenómeno del hundimiento regional modifica la estructura de los depósitos lacustres y como consecuencia se produce un incremento en la rigidez de los depósitos. Siguiendo este tenor, se incrementa en el subsuelo la capacidad de soportar cargas por originarse estratos más competentes. Sin embargo, es importante analizar cuál es la respuesta sísmica si se considera el hundimiento regional y analizarla si no se considera el hundimiento regional.

El Sistema de Evolución del Hundimiento y Espectros de Diseño Sísmico (*SEHEDIS*) es una herramienta que proporciona información sobre el hundimiento regional al que ha estado sometida la Ciudad de México en los últimos 35 años y los efectos que este fenómeno causará en la futura respuesta sísmica del terreno (ver Figura 19). El *SEHEDIS* muestra para cada banco de nivel ubicado en la Ciudad de México la siguiente información:

- El hundimiento medido.
- El hundimiento estimado hasta el año 2070 con la función que describe el comportamiento esperado.
- La velocidad de hundimiento promedio y la última velocidad de hundimiento medida. El cambio estimado del periodo dominante de vibración del suelo hasta el año 2070.
- La evolución de los espectros de diseño sísmico a cada 10 años hasta el 2070 y
- Los parámetros para la construcción de los espectros de diseño.

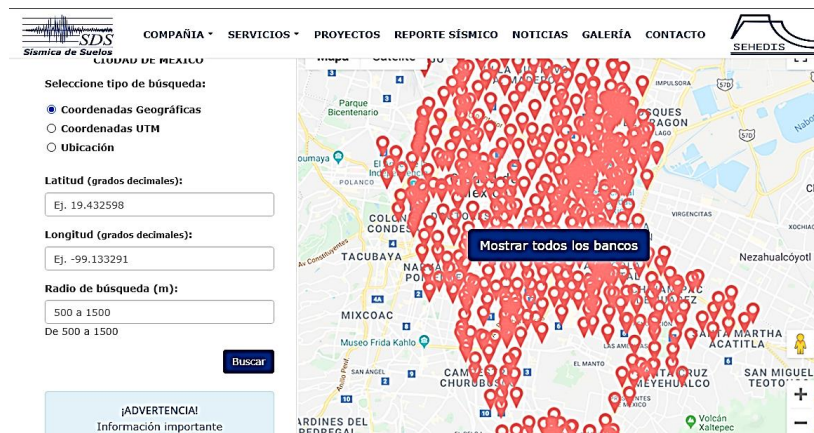


Figura 19. Vista general del SEHEDIS (imagen obtenida de: <https://bit.ly/2Nz8MId>)

6.2 Evolución del espectro de diseño a 50 años

Para determinar cómo se ve afectado el espectro de diseño a través del tiempo es importante considerar la evolución del periodo dominante de vibración del suelo. El cambio del T_s en función de la velocidad de hundimiento (V_H) se calcula utilizando la plataforma SEHEDIS para obtener las velocidades de hundimiento promedio en el sitio de estudio. En esta sección se analiza la evolución del T_s siguiendo el método que considera el hundimiento regional considerando las siguientes expresiones:

$$\Delta H = V_H \cdot t \quad (16)$$

$$H_{N \text{ años}} = H_{inicial} - \Delta H \quad (17)$$

$$T_{s_{N \text{ años}}} = \frac{4H_{N \text{ años}}}{V_s} \quad (18)$$

En la Figura 20 se muestra el banco de nivel cercano con un radio de búsqueda de 500 m localizado por el SEHEDIS. El banco de nivel cercano se localizó en un radio de 115 m al sitio de estudio (19.4049735, -99.0990472). El banco 138-B(S02E03)04, donde se especifican los parámetros que forman los espectros de diseño entre los años desde 2016 hasta 2070, así como las velocidades de hundimiento promedio y última registradas en ese banco, como se muestra a continuación.

Parámetros de los espectros de diseño

138- B(S02E03)04						
Año	T_s	a_0	c	T_a	T_b	k
2016	3.81	0.35	0.80	0.94	4.20	0.35
2020	3.76	0.35	0.80	0.99	4.20	0.35
2030	3.65	0.35	0.80	1.10	4.20	0.35
2040	3.54	0.35	0.80	1.21	4.20	0.35
2050	3.44	0.35	0.85	1.31	4.13	0.35
2060	3.36	0.35	0.92	1.39	4.03	0.35
2070	3.28	0.35	0.98	1.47	3.93	0.35
Velocidad de hundimiento promedio			(1985-2016)	20.7		(cm/año)
Velocidad de hundimiento última			(2007-2016)	19.5		(cm/año)

Figura 20. Parámetros establecidos en el banco de nivel cercano 138-B(S02E03)04 en un radio de 115 m (imagen obtenida de: <https://bit.ly/2PaUnT2>)

Con base en las especificaciones de la Figura 20 se obtuvo una velocidad de hundimiento promedio de $V_H = 20.7 \text{ cm/año}$. Considerando esta velocidad de hundimiento se realizó el análisis de la evolución periodo dominante de vibración del suelo T_s considerando el hundimiento regional de la Ciudad de México. Es importante destacar que en este método se consideró un tiempo de hundimiento de 50 años a partir del año 2020 (*i.e.*, año en que se realizaron los trabajos de exploración) hasta el año 2070.

Con objeto de identificar cómo evoluciona el espectro de diseño en un periodo de 50 años se establecen dos modelos: 1) el periodo dominante de vibrar del suelo (T_s) cambia en función del tiempo como producto del efecto de hundimiento regional, 2) el periodo dominante de vibrar del suelo (T_s) evoluciona de acuerdo a un cambio porcentual en la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) como producto del efecto de hundimiento regional

6.2.1 Modelo 1: Evolución del T_s en un periodo de 50 años

En esta sección se calculan los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante de vibrar del suelo en un periodo de 50 años, en función de la velocidad de hundimiento promedio para el sitio de estudio, $V_H = 20.7 \text{ cm/año}$ por efectos del fenómeno de hundimiento regional de los depósitos lacustres de la Ciudad de México. Al suscitarse este fenómeno se genera una disminución gradual en el espesor de los estratos, propiciando un incremento en la rigidez del material que lo constituye. En este proceso, como se mencionó previamente se afecta el T_s , al disminuir el espesor del estrato compresible (H).

En este modelo se analiza la forma en que cambia el periodo dominante del suelo del sitio de estudio durante un periodo de observación de 50 años. Por su parte, el espesor del depósito reducido se determinó a partir de un proceso iterativo que inicia con el espesor original y una velocidad promedio de hundimiento regional.

En la Tabla 4 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 y el comportamiento del periodo dominante de vibración del suelo en los próximos años. Para el análisis de la evolución del periodo dominante de vibración del suelo en el sitio de estudio se consideró una $V_{Hpromedio} = 20.7 \text{ cm/año}$ cómo se puede ver a continuación.

Es importante destacar que, para el sitio de estudio con periodo dominante del suelo de $T_s = 4 \text{ s}$ se consideró un espesor original del depósito de $H = 72 \text{ m}$, en 2020, y una velocidad de propagación de $V_s = 72 \text{ m/s}$.

Tabla 4. Evolución del Ts en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional en la CDMX

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	T_s (s)
2020	2021	1	0.21	71.79	3.98
2021	2022	2	0.41	71.59	3.97
2022	2023	3	0.62	71.38	3.96
2023	2024	4	0.83	71.17	3.94
2024	2025	5	1.04	70.97	3.93
2025	2026	6	1.24	70.76	3.92
2026	2027	7	1.45	70.55	3.91
2027	2028	8	1.66	70.34	3.90
2028	2029	9	1.86	70.14	3.89
2029	2030	10	2.07	69.93	3.88
2030	2031	11	2.28	69.72	3.86
2031	2032	12	2.48	69.52	3.85
2032	2033	13	2.69	69.31	3.84
2033	2034	14	2.90	69.10	3.83
2034	2035	15	3.11	68.90	3.82
2035	2036	16	3.31	68.69	3.81
2036	2037	17	3.52	68.48	3.79
2037	2038	18	3.73	68.27	3.78
2038	2039	19	3.93	68.07	3.77
2039	2040	20	4.14	67.86	3.76
2040	2041	21	4.35	67.65	3.75
2041	2042	22	4.55	67.45	3.74
2042	2043	23	4.76	67.24	3.73
2043	2044	24	4.97	67.03	3.71
2044	2045	25	5.18	66.83	3.70
2045	2046	26	5.38	66.62	3.69
2046	2047	27	5.59	66.41	3.68
2047	2048	28	5.80	66.20	3.67
2048	2049	29	6.00	66.00	3.66
2049	2050	30	6.21	65.79	3.65
2050	2051	31	6.42	65.58	3.63
2051	2052	32	6.62	65.38	3.62
2052	2053	33	6.83	65.17	3.61
2053	2054	34	7.04	64.96	3.60
2054	2055	35	7.25	64.76	3.59
2055	2056	36	7.45	64.55	3.58
2056	2057	37	7.66	64.34	3.57
2057	2058	38	7.87	64.13	3.55
2058	2059	39	8.07	63.93	3.54
2059	2060	40	8.28	63.72	3.53
2060	2061	41	8.49	63.51	3.52
2061	2062	42	8.69	63.31	3.51
2062	2063	43	8.90	63.10	3.50
2063	2064	44	9.11	62.89	3.49
2064	2065	45	9.32	62.69	3.47
2065	2066	46	9.52	62.48	3.46
2066	2067	47	9.73	62.27	3.45
2067	2068	48	9.94	62.06	3.44
2068	2069	49	10.14	61.86	3.43
2069	2070	50	10.35	61.65	3.42

En la Figura 21 se observan también reducciones importantes en el espesor de los depósitos de terreno. Nótese, que en el año 2020 se presentaba un espesor $H = 72\text{ m}$. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se presenta un $H = 69.9\text{ m}$, para 2040 se presenta un $H = 67.9\text{ m}$, para 2050 se presenta un $H = 65.8\text{ m}$, para 2060 se presenta un $H = 63.7\text{ m}$, y para 2070 se presenta un $H = 61.7\text{ m}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el H se disminuye en un 14%, reduciéndose en 10.35 m .

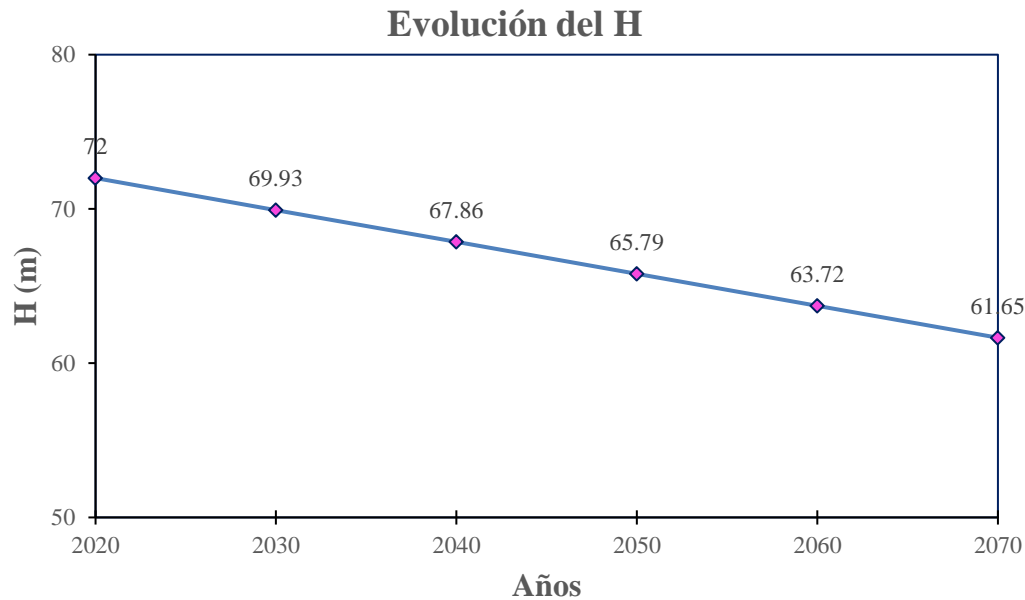


Figura 21. Evolución del H en los próximos 50 años

En la Figura 22 se observan reducciones importantes en el periodo de vibración del terreno. Nótese, que en el año 2020 el suelo se caracterizaba por un $T_s = 4\text{ s}$. Analizando la reducción cada 10 años, podemos observar que para el año 2030 se reducirá a $T_s = 3.88\text{ s}$, para 2040 a $T_s = 3.76\text{ s}$, para 2050 a $T_s = 3.65\text{ s}$, para 2060 a $T_s = 3.53\text{ s}$, y para 2070 a $T_s = 3.42\text{ s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 14% disminuyéndose en 0.58 s .

Se refleja un cambio notable en la respuesta dinámica del depósito que puede afectar significativamente a las estructuras ahí construidas. Los 50 años en que ocurren estos cambios, están generalmente incluidos dentro de la vida útil de las estructuras convencionales. Se destaca que ante un evento sísmico futuro, la reducción con el tiempo del periodo dominante de vibración puede generar el efecto de resonancia a estructuras con periodo fundamental inferior al original del terreno. Situación omitida actualmente en los criterios de diseño estructural.

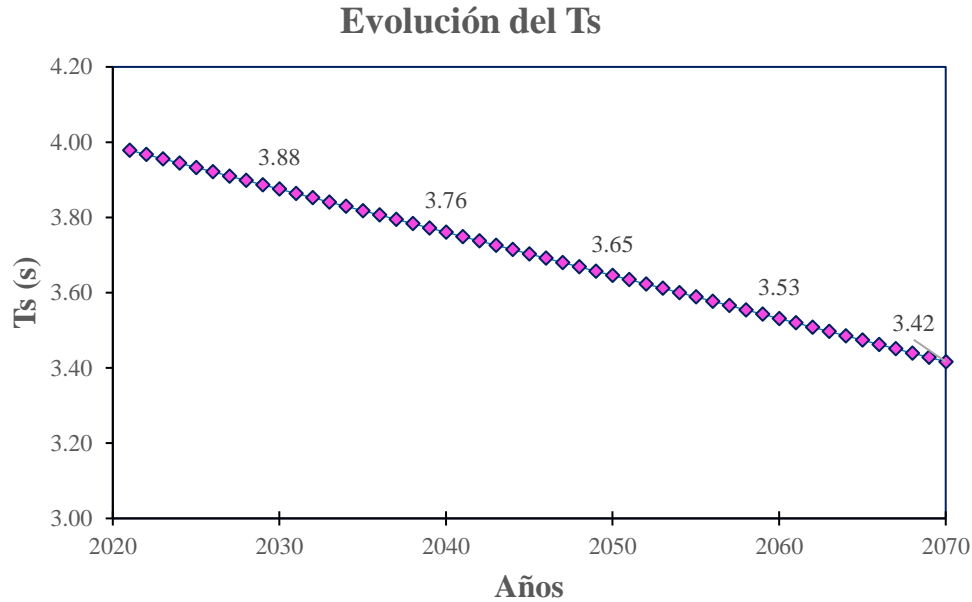


Figura 22. Evolución del T_s en un periodo de 50 años

6.2.1.1 Cálculo del espectro de diseño considerando la evolución del T_s en un periodo de 50 años

Considerando ahora la modificación de las propiedades dinámicas y geométricas en un periodo de tiempo de 50 años. En esta sección se presentan los espectros de diseño para el sitio de estudio en un intervalo de cada 10 años; así como los parámetros que los forman, calculados con las Ecuaciones 1-10. Estos parámetros (*i.e.*, a_0 , c , T_a , T_b y k) se presentan en la Tabla 5, los cuales se calculan en función del periodo dominante de vibración del suelo para cada intervalo de tiempo (*i.e.*, 10 años). Se presentan espectros de diseño considerando cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$. La forma que adoptan estos espectros de diseño se muestran en la Figura 23. Es importante destacar que los espectros calculados en esta sección corresponden a los años desde 2020 hasta 2070, considerando la evolución del periodo dominante del suelo generado por el hundimiento regional de la ciudad.

En la Figura 23 se presentan seis espectros de diseño como se describe a continuación:

- a) Espectros de diseño en el año 2020 con: $T_s = 4 \text{ s}$ y $H = 72 \text{ m}$
- b) Espectros de diseño en el año 2030 con: $T_s = 3.88 \text{ s}$ y $H = 69.9 \text{ m}$
- c) Espectros de diseño en el año 2040 con: $T_s = 3.76 \text{ s}$ y $H = 67.9 \text{ m}$
- d) Espectros de diseño en el año 2050 con: $T_s = 3.65 \text{ s}$ y $H = 65.8 \text{ m}$
- e) Espectros de diseño en el año 2060 con: $T_s = 3.53 \text{ s}$ y $H = 63.7 \text{ m}$
- f) Espectros de diseño en el año 2070 con: $T_s = 3.42 \text{ s}$ y $H = 61.6 \text{ m}$

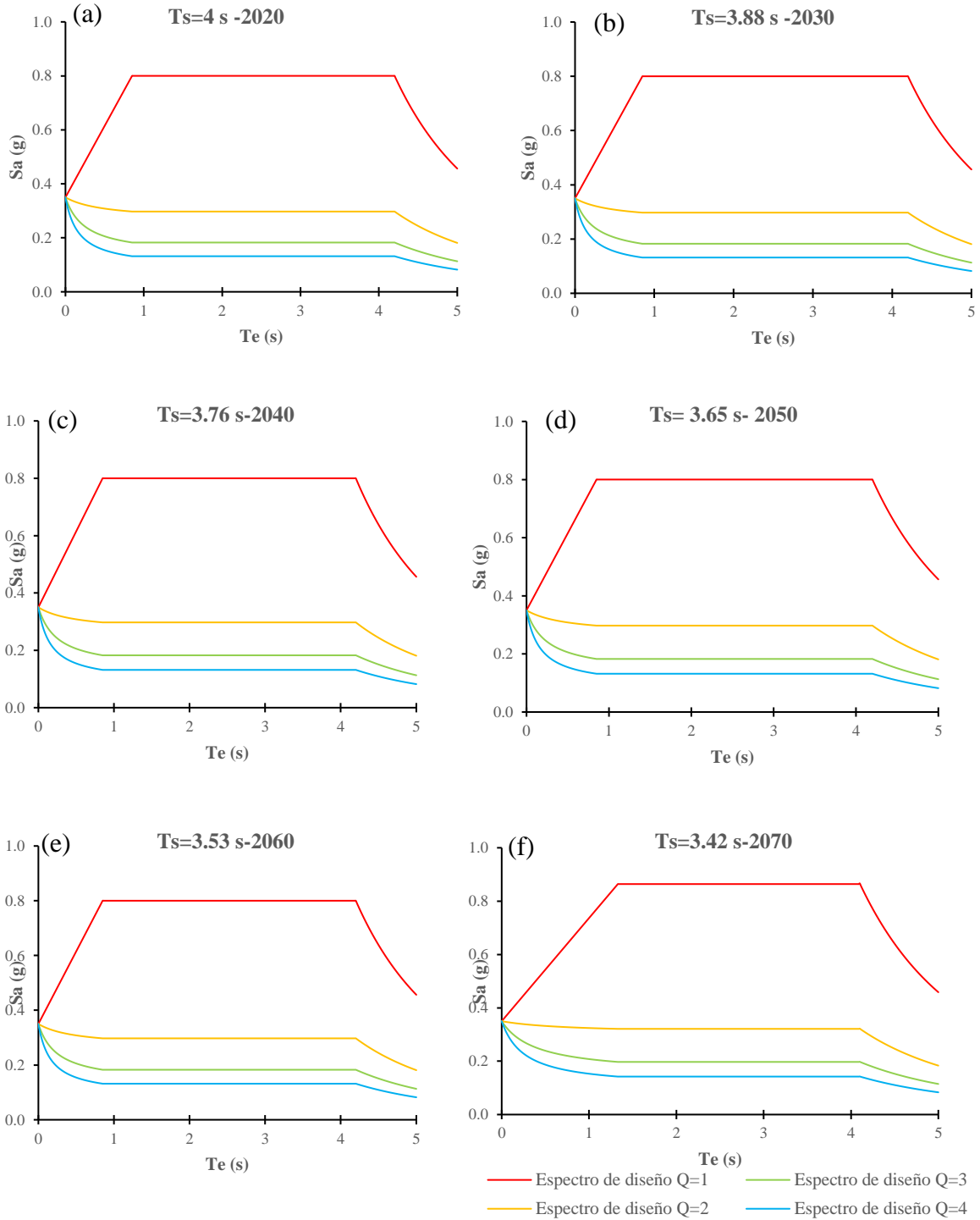


Figura 23. Cálculo de los espectros de diseño con Q=1, Q=2, Q=3 y Q=4 considerando la evolución del T_s en un periodo de 50 años (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4\text{ s}$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.88\text{ s}$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.76\text{ s}$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.65\text{ s}$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.53\text{ s}$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.42\text{ s}$

Tabla 5. Parámetros que forman el espectro de diseño con $Q=1$ considerando la evolución del T_s en los próximos 50 años

Año	T_s (s)	a_0 (g)	C (g)	T_a (s)	T_b (s)	K	B
2020	4 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2030	3.88 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2040	3.76 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2050	3.65 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2060	3.53 s	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2070	3.42 s	0.35	0.86	1.33	4.1	0.35	1

Con los parámetros que forman los espectros se observa que el espectro de diseño con $Q = 1$, en 2020 con $T_s = 4s$ inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35 g$, la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 0.8 g$, mientras que los espectros de diseño con valores de $Q > 1$, alcanzan valores de casi $c = 0.3 g$ para estructuras con baja ductilidad, y cercanos a $c = 0.1 g$ para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es muy pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 0.85 s$ y $T_b = 4.2 s$ (ver Tabla 5).

En contra parte, para el año 2070 considerando la evolución del periodo dominante de vibración del suelo, con $T_s = 3.42 s$. El espectro de diseño con $Q = 1$ inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35 g$, la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 0.86 g$, mientras que los espectros de diseño con valores de $Q > 1$, alcanzan valores de $c = 0.3 g$ para estructuras con baja ductilidad, cercanos a $c = 0.1 g$ para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es ligeramente menos pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 1.33 s$ y $T_b = 4.1 s$ (ver Tabla 5).

Como resumen de lo anterior, para el año 2070 con respecto al año 2020, se presenta en el espectro de diseño con $Q = 1$, un incremento en la aceleración espectral máxima de $\Delta c = 7\%$ y los límites de la meseta se acortan en un 17%, producto de la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo. Además se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.48 s$ (ver Figura 24).

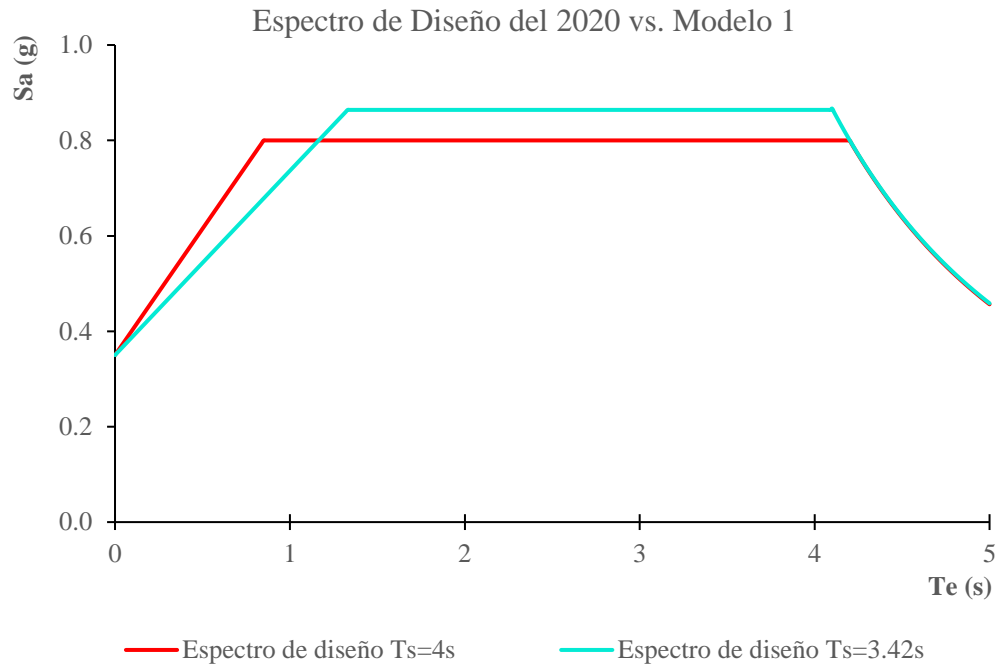


Figura 24. Comparación del espectro de diseño considerando la evolución del T_s en el año 2020 y 2070

Del análisis de los espectros en la Figura 24 se observa un claro corrimiento de las ordenadas espectrales. Ello se atribuye a la reducción del periodo dominante de vibración del suelo. En este caso puede considerarse que el efecto del hundimiento regional y los cambios en las propiedades dinámicas del suelo son desfavorables en la respuesta del suelo al ofrecer, aceleraciones superiores a las definidas 50 años atrás.

6.2.2 Modelo 2: Evolución de V_s y T_s en un periodo de 50 años

En esta sección se calculan los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante de vibrar del suelo (T_s) en un periodo de 50 años como producto de un cambio porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) y la reducción gradual del estrato compresible (H). Considerando el fenómeno de hundimiento regional en el sitio de estudio en función de la velocidad de hundimiento promedio para el sitio de estudio, $V_H = 20.7 \text{ cm/año}$.

A diferencia del Modelo 1, en este modelo se analiza la forma en que cambia el periodo dominante del suelo del sitio de estudio, considerando la reducción del espesor del estrato y además el incremento porcentual en la velocidad de propagación de ondas de corte, durante un periodo de observación de 50 años. Por su parte, la reducción del depósito se determinó a partir de un proceso iterativo que inicia con el espesor original

una velocidad promedio de hundimiento regional. Para este modelo de análisis la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) se determinó para un incremento porcentual de: a) 2%, b) 4% , c) 6%, d) 8% y e) 10%.

En el Anexo A se presenta el proceso de observación de 50 años para los cinco submodelos de análisis (*i.e.*, Modelo 2.a, 2.b, 2.c, 2.d, y 2.e) de la evolución del periodo dominante de vibrar del suelo considerando el incremento porcentual de velocidad de onda de corte correspondiente. Como resultado de este análisis en esta sección se presenta el cambio del periodo dominante en el año 2070 de cada submodelo.

En la Tabla 6 se presenta el cambio de T_s para el año 2070 considerando cada incremento porcentual de la velocidad de propagación de onda de corte. En las Figuras 25 y 26 se observa el comportamiento de la velocidad de propagación de ondas y del periodo dominante de vibración del suelo para los cinco submodelos del Modelo 2, respectivamente.

Recordando que, para el sitio de estudio con periodo dominante del suelo de $T_s = 4$ s se consideró un espesor original del depósito de $H = 72$ m y una velocidad de propagación de $V_s = 72$ m/s en el año 2020.

Tabla 6. Evolución del T_s en los cinco submodelos de análisis considerando un incremento porcentual de V_s para el año 2070

Modelo (2070)	Hf (m)	ΔV_s %	V_s (m/s)	T_s (s)
2.a	61.65	2	73.44	3.36
2.b	61.65	4	74.88	3.29
2.c	61.65	6	76.32	3.23
2.d	61.65	8	77.76	3.17
2.e	61.65	10	79.20	3.11

En la Tabla 6 y Figura 25 se observan el análisis de la evolución del T_s con base en el incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte en los Modelos 2.a, 2.b, 2.c, 2.d y 2.e. Analizando este incremento porcentual, podemos observar que para en el Modelo 2.a se aumenta la velocidad a $V_s = 73.4 \text{ m/s}$, para el Modelo 2.b a $V_s = 74.9 \text{ m/s}$, para el Modelo 2.c a $V_s = 76.3 \text{ m/s}$, para el Modelo 2.d a $V_s = 77.8 \text{ m/s}$, y para el Modelo 2.e a $V_s = 79.2 \text{ m/s}$, considerando un incremento de V_s del 2%, 4%, 6%, 8% y 10%, para cada modelo respectivamente.

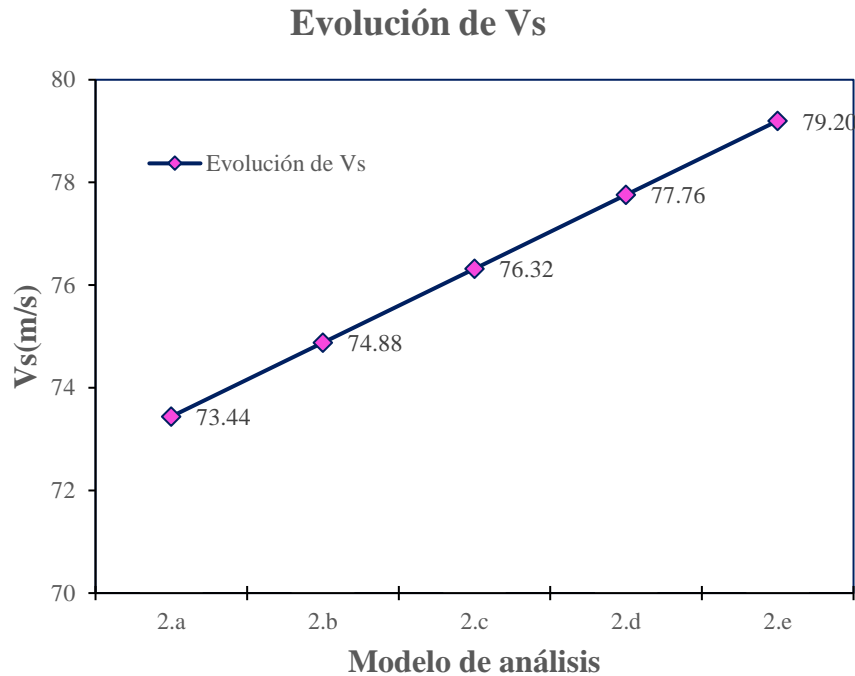


Figura 25. Incremento de la V_s para cada modelo de análisis en el año 2070

Por su parte, en la Figura 26 tomando en cuenta el incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte, se observan reducciones en el periodo dominante de vibración del suelo mayores a las reducciones en el Modelo 1, para el año 2070. Nótese, que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4 \text{ s}$. Analizando la reducción para cada submodelo, podemos observar que en el Modelo 2.a se reduce a $T_s = 3.36 \text{ s}$, para el Modelo 2.b a $T_s = 3.29 \text{ s}$, para el Modelo 2.c a $T_s = 3.23 \text{ s}$, para el Modelo 2.d a $T_s = 3.17 \text{ s}$, y para el Modelo 2.e a $T_s = 3.11 \text{ s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 en el modelo más crítico de análisis (*i.e.*, Modelo 2.e) el T_s se disminuye en un 22% reduciéndose en 0.89 s.

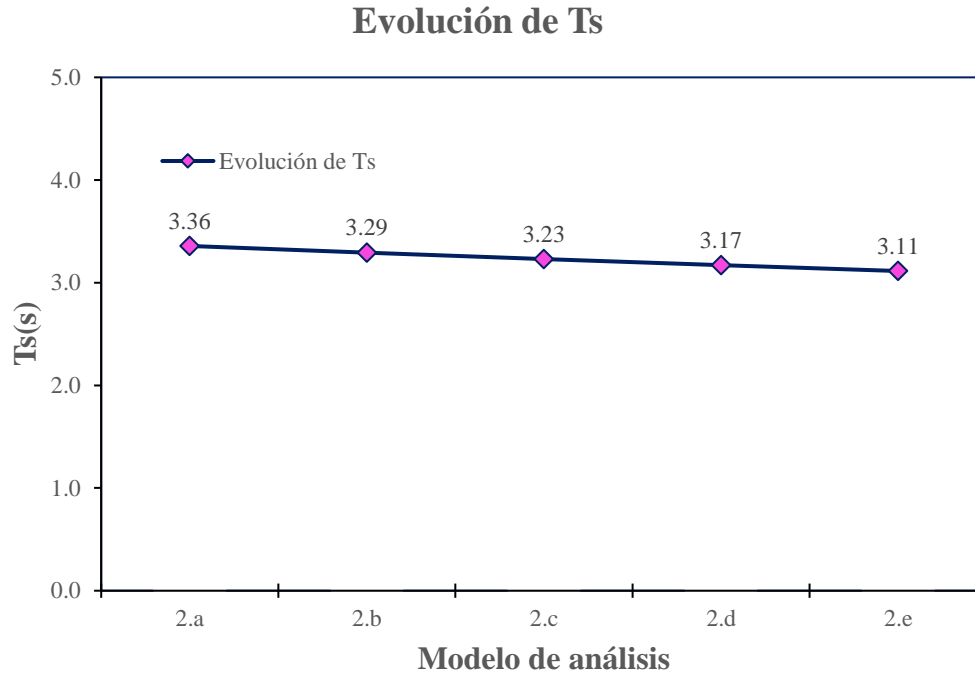


Figura 26. Reducción del T_s para cada modelo de análisis en el año 2070

A razón del análisis anterior se nota que al considerar el incremento en la velocidad de propagación de onda además de la disminución del espesor del estrato propicia una mayor reducción en el periodo dominante de vibración del suelo en el sitio de estudio. Al considerar únicamente la reducción de espesor en la evolución del periodo se obtuvo en 2070 un $T_s = 3.42$ s (*i.e.*, Modelo 1), mientras que en el segundo análisis, en el modelo más crítico (*i.e.*, Modelo 2.e), se obtuvo en 2070 un $T_s = 3.11$ s. Llegando a una diferencia entre periodos de vibrar del suelo de $\Delta T_s = 9\%$, lo que significa que el T_s del Modelo 2.e con respecto del Modelo 1 es menor en $\Delta T_s = 0.31$ s.

6.2.2.1 Cálculo del espectro de diseño considerando la evolución de Vs y Ts en un periodo de 50 años

Contemplando ahora la modificación de las propiedades dinámicas y geométricas en un periodo de tiempo de 50 años. En esta sección se presentan los espectros de diseño para el sitio de estudio en el año 2070 contemplando un incremento en la velocidad de propagación de ondas de corte del 2%, 4%, 6%, 8% y 10% para ese año; así como los parámetros que los forman, calculados con las Ecuaciones 1-10. Estos parámetros del espectro de diseño con $Q=1$ (*i.e.*, a_0 , c , T_a , T_b y k) se presentan en la Tabla 7. En el Anexo A se presenta el cálculo de los espectros de diseño en función del periodo dominante de vibración del suelo para cada intervalo de tiempo (*i.e.*, 10 años) considerando en este modelo a su vez cinco submodelos (*i.e.*, Modelo 2.a, 2.b, 2.c, 2.d, y 2.e) que analizan un incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte. A continuación se muestran los espectros de diseño considerando los cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$. Como resultado de este análisis en esta sección se presentan los espectros de diseño en el año 2070 de cada submodelo (ver Figura 27).

Los espectros calculados en esta sección corresponden al año 2070, tomando en consideración el fenómeno de hundimiento regional en el sitio de estudio que propicia una reducción en el espesor de los estratos, así como un incremento en la velocidad de propagación de ondas y por ende una reducción del periodo dominante del suelo.

En la Figura 27 se muestran seis espectros de diseño que corresponden a los cinco modelos de análisis en el año 2070 y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- a) Espectros de diseño del año 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- b) Espectros de diseño del Modelo 2.a con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 73.4 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.36 \text{ s}$
- c) Espectros de diseño del Modelo 2.b con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 74.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.29 \text{ s}$
- d) Espectros de diseño del Modelo 2.c con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 76.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.23 \text{ s}$
- e) Espectros de diseño del Modelo 2.d con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 77.8 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.17 \text{ s}$
- f) Espectros de diseño del Modelo 2.e con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 79.2 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.11 \text{ s}$

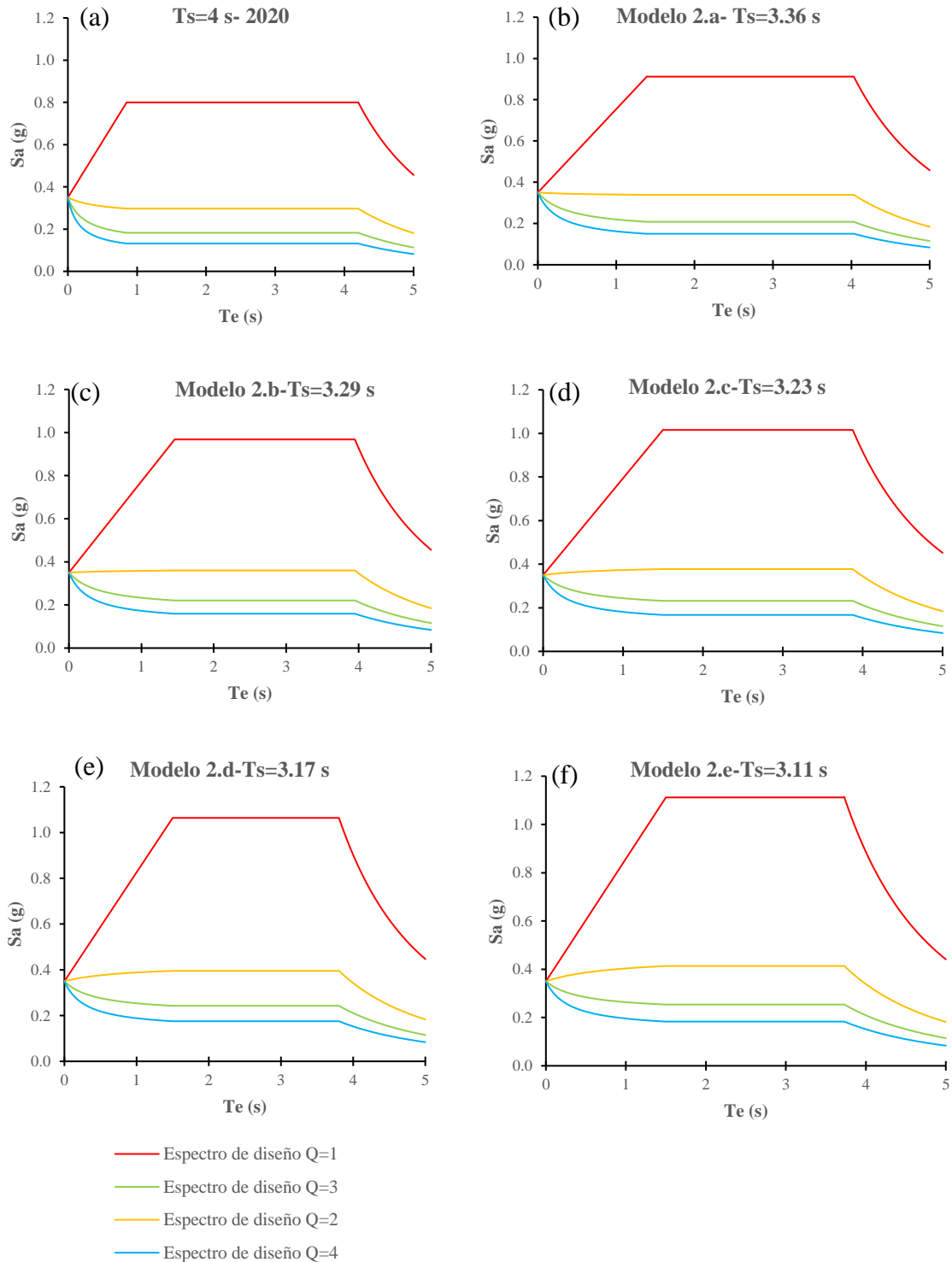


Figura 27. Cálculo de los espectros de diseño con $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ considerando la evolución del T_s y el incremento de V_s para los cinco modelos de análisis (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4$ s, (b) Espectros del Modelo 2.a con $T_s=3.36$ s, (c) Espectros del Modelo 2.b con $T_s=3.29$ s, (d) Espectros del Modelo 2.c con $T_s=3.23$ s, (e) Espectros del Modelo 2.d con $T_s=3.17$ s y (f) Espectros del Modelo 2.e con $T_s=3.11$ s

Tabla 7. Parámetros que forman el espectro de diseño con $Q=1$ considerando la evolución del T_s y V_s

Modelo	T_s (s)	a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	K	B
2020	4	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
2.a	3.36	0.35	0.91	1.39	4.03	0.35	1
2.b	3.29	0.35	0.97	1.46	3.95	0.35	1
2.c	3.23	0.35	1.02	1.50	3.88	0.35	1
2.d	3.17	0.35	1.06	1.50	3.80	0.35	1
2.e	3.11	0.35	1.11	1.50	3.73	0.35	1

Con los parámetros que forman los espectros de diseño se observa que el espectro con $Q = 1$ de diseño en 2020, con $T_s = 4$ s, inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35$ g y la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 0.8$ g. Mientras que los espectros de diseño con valores de $Q > 1$, alcanzan valores de casi $c = 0.3$ g para estructuras con baja ductilidad, y cercanos a $c = 0.2$ g para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es muy pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 0.85$ s y $T_b = 4.2$ s. Nótese que en los 5 submodelos de análisis en el espectro de diseño con $Q=1$ para el año 2070, inician con una misma aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35$ g y la aceleración espectral máxima (c) tiende a incrementarse en función del incremento porcentual en la velocidad de propagación de ondas de corte (*i.e.*, se experimentan mayores aceleraciones con este modelo de análisis a las que se calcularon para el año 2020). Y finalmente, la meseta de los espectros tiende a acortarse en función del incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte.

En resumen, a medida que crece el cambio porcentual de la velocidad de propagación de onda de corte es posible observar un aumento de las ordenadas espectrales y un acortamiento del espectro en la zona de la meseta. En la Tabla 7 y Figura 28 se observan las características que forman a los espectros de diseño con $Q=1$ de los cinco ejemplos de análisis para este modelo. Nótese que el modelo más crítico es aquel con mayor incremento porcentual de velocidad de propagación de ondas de corte (*i.e.*, Modelo 2.e con un incremento de V_s del 10% para 2070).

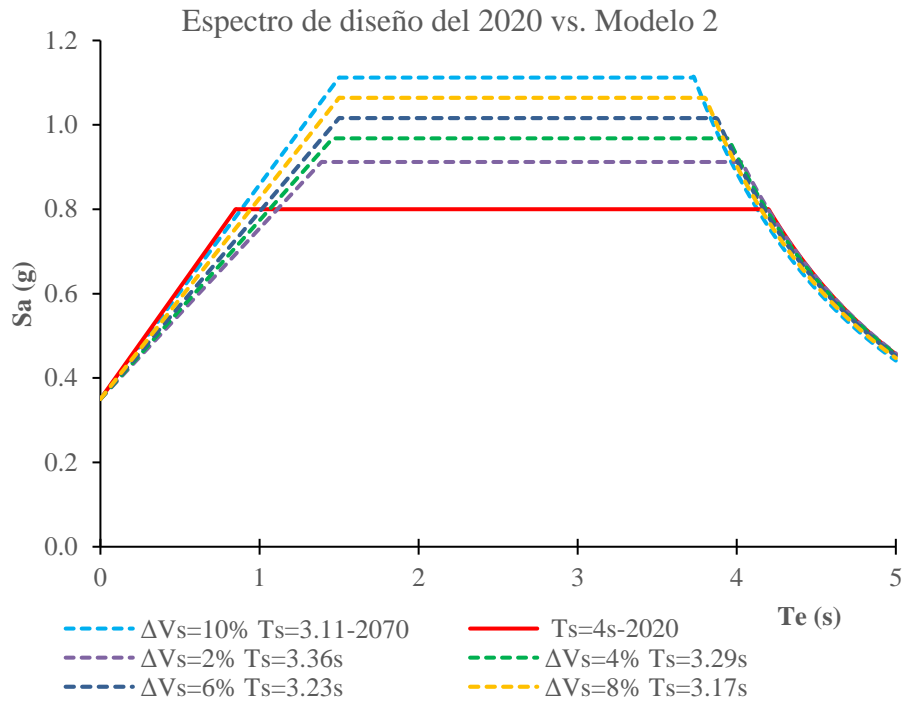


Figura 28. Espectros de diseño con $Q=1$ del año 2020 (curva roja) y año 2070 para cada incremento porcentual de la V_s

Considerando el Modelo 2.e como el modelo más crítico en este análisis en el año 2070, con $T_s = 3.11$ s. El espectro de diseño con $Q = 1$ inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.35$ g y la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 1.11$ g. A su vez, la meseta del espectro es notablemente menos pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 1.5$ s y $T_b = 3.73$ s (ver Tabla 7).

Como resumen de lo anterior, para el año 2070 con respecto al año 2020 se presenta en el espectro de diseño un incremento notable en la aceleración espectral máxima de $\Delta c = 28\%$ y los límites de la meseta se acortan en un 33%, producto de la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo. Además se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.65$ s (ver Figura 29).

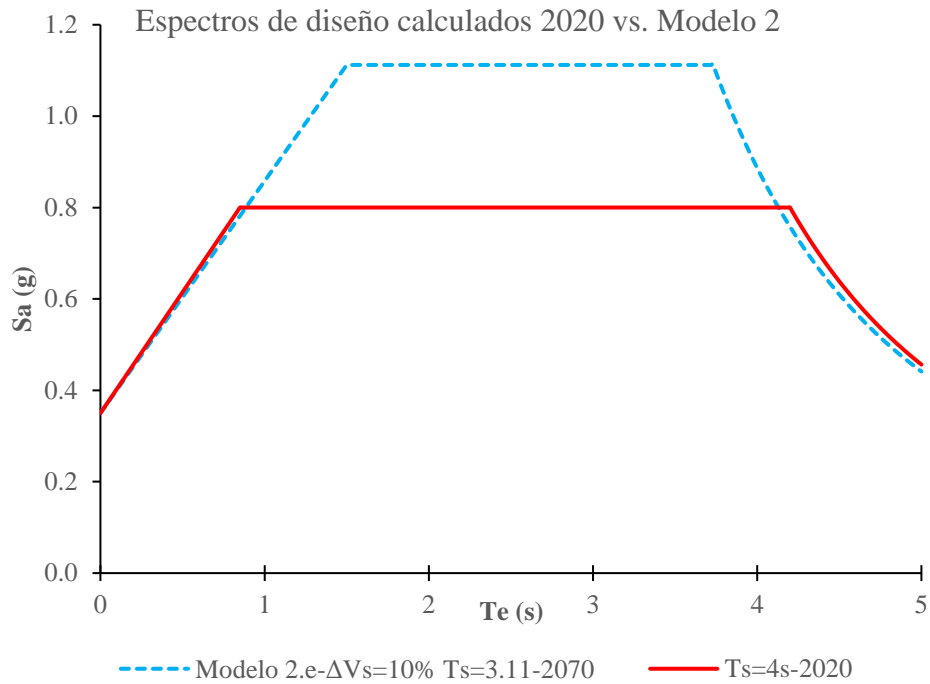


Figura 29. Comparación del espectro de diseño considerando la evolución del T_s y el incremento porcentual de V_s en el año 2070 contra el espectro de diseño del 2020

Del análisis de los espectros en la Figura 29 se observa un claro corrimiento de las ordenadas espectrales. Ello se atribuye al incremento en la magnitud de la velocidad de propagación de onda de corte y la reducción en el espesor del depósito que propician la reducción del periodo dominante de vibración del suelo para el año 2070. En este caso puede considerarse que el efecto del hundimiento regional y los cambios en las propiedades dinámicas del suelo son desfavorables en la respuesta del suelo al ofrecer, aceleraciones notablemente superiores a las definidas 50 años atrás.

Tabla 8. Comparación de los factores que forman los espectros de diseño con $Q=1$ para los modelos de análisis 1 y 2

Año 2070	T_s (s)	a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	K	B
Modelo 1	3.42 s	0.35	0.86	1.33	4.1	0.35	1
Modelo 2.a	3.36	0.35	0.91	1.39	4.03	0.35	1
Modelo 2.b	3.29	0.35	0.97	1.46	3.95	0.35	1
Modelo 2.c	3.23	0.35	1.02	1.50	3.88	0.35	1
Modelo 2.d	3.17	0.35	1.06	1.50	3.80	0.35	1
Modelo 2.e	3.11	0.35	1.11	1.50	3.73	0.35	1

Como se mencionó previamente el efecto al considerar en el análisis el incremento en la velocidad de propagación de onda además de la reducción del espesor del estrato propicia una mayor reducción en el periodo dominante de vibración del suelo en el sitio de estudio. Pues en el Modelo 1, al tomar en cuenta únicamente la reducción de espesor en la evolución del periodo, se obtuvo para el año 2070 un $T_s = 3.42$ s, mientras que en el Modelo 2 a medida que incrementaba porcentualmente la velocidad de propagación de ondas de corte, para el año 2070 la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo era mayor. En este sentido, para el segundo análisis el modelo más crítico (*i.e.*, con el T_s menor) se obtuvo para el Modelo 2.e un $T_s = 3.11$ s.

Efectos que se notan en los espectros de diseño, pues como se observa en la Tabla 8, en el Modelo 1 la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 0.86$ g, mientras que en el Modelo 2.e $c = 1.11$ g. A su vez, la meseta del espectro del Modelo 2.e es menos pronunciada que la del Modelo 1, delimitada con los valores de $T_a = 1.5$ s y $T_b = 3.73$ s.

Como resumen de lo anterior, para el año 2070 comparando el Modelo 1 y los modelos del 2.a al 2.e, se presenta en el espectro de diseño un incremento notable en las aceleraciones espectrales máximas que experimentan las estructuras hasta en un $\Delta c = 22\%$ para los espectros de diseño del Modelo 2 (*i.e.*, el modelo que considera el cambio porcentual en la velocidad de propagación de ondas de corte) y los límites de la meseta se acortan hasta en un 33%, producto de la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo considerando los efectos de la velocidad de propagación de ondas de corte en el transcurso de los años. Además se presenta en el Modelo 2.e (*i.e.*, el modelo crítico) un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.17$ s (ver Figura 30).

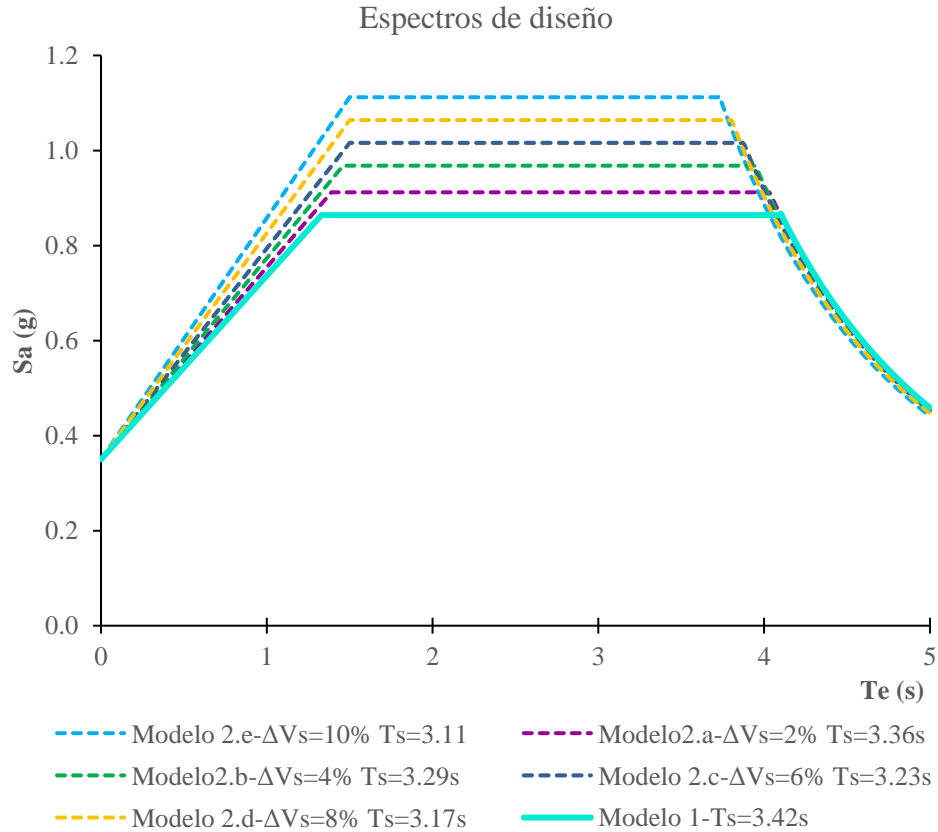


Figura 30. Comparación del espectro de diseño considerando la evolución del T_s vs la evolución de T_s y V_s en el año 2070

Finalmente, se presenta una comparación de los espectros de diseño obtenidos con los Modelos 1 y 2 en el año 2070 contra el espectro de diseño calculado en el año 2020, con los parámetros establecidos en la Tabla 9. Nótese la diferencia en el incremento de las ordenas espectrales, en el Modelo 1 la diferencia no es tan notoria como en el Modelo 2. Es importante resaltar este efecto ya que en el Modelo 1 para el año 2070 estructuras con periodos fundamentales de vibración mayores a 1.5 s experimentan aceleraciones mayores que las asociadas al año 2020. A su vez, este incremento de las aceleraciones espectrales es muy notable considerando el Modelo 2 para estructuras con periodos fundamentales entre 1.5 y 3.5.

Tabla 9. Parámetros de los espectros de diseño de los Modelos 1 y 2 en el año 2070 y en el año 2020

Análisis	Ts (s)	a ₀ (g)	c (g)	Ta (s)	Tb (s)	K	B
2020	4	0.35	0.8	0.85	4.2	0.35	1
Modelo 1	3.42 s	0.35	0.86	1.33	4.1	0.35	1
Modelo 2.a	3.36	0.35	0.91	1.39	4.03	0.35	1
Modelo 2.b	3.29	0.35	0.97	1.46	3.95	0.35	1
Modelo 2.c	3.23	0.35	1.02	1.50	3.88	0.35	1
Modelo 2.d	3.17	0.35	1.06	1.50	3.80	0.35	1
Modelo 2.e	3.11	0.35	1.11	1.50	3.73	0.35	1

En la Figura 31 se resume el análisis de este capítulo, pues se muestra como repercute en el espectro de diseño el fenómeno de hundimiento regional que experimenta la Ciudad de México. Como se observa, al considerar este fenómeno se reduce el periodo dominante del suelo, propiciando que los espectros presenten un incremento en las acciones (*i.e.*, ordenadas espectrales) las cuales son utilizadas en el diseño sísmico de la infraestructura civil y que como se ha justificado en este análisis es necesario considerar la evolución del periodo dominante del suelo en los próximos años.

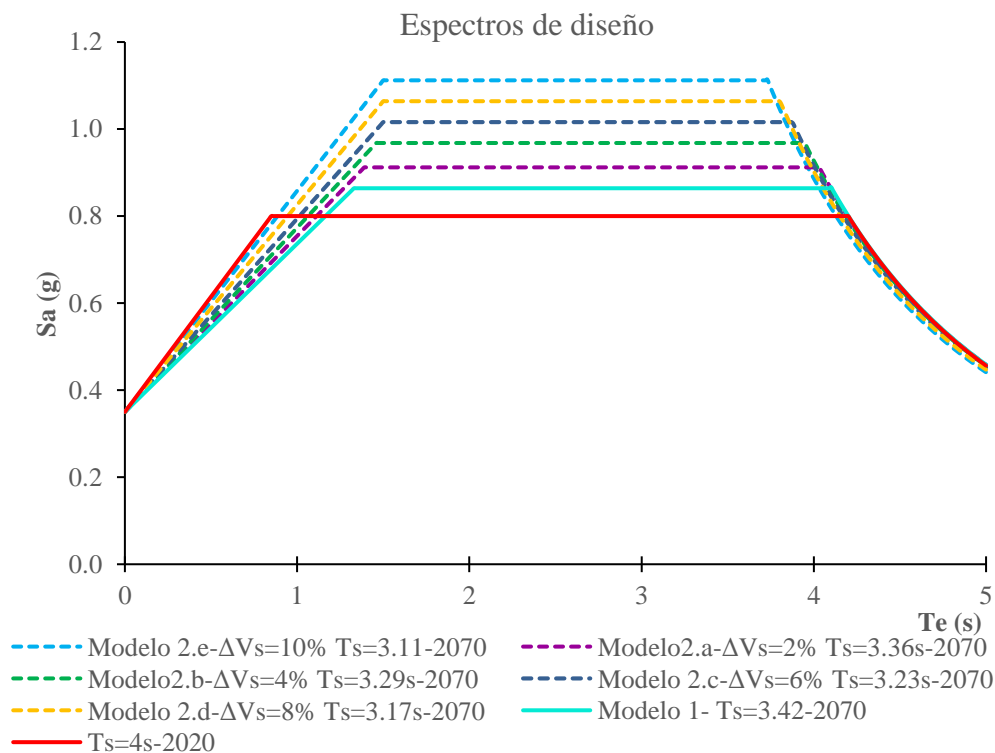


Figura 31. Comparación del espectro de diseño de los Modelos 1 y 2 en 2070 contra el espectro de diseño calculado para 2020

Capítulo 7

COMPARACIÓN CON EL PROGRAMA SASID DE LAS NTC-DS-2017

El diseño sísmico de la infraestructura civil requiere estudios que garanticen su óptimo desempeño a lo largo de la vida útil para el cual se diseña. Siguiendo este tenor, en este estudio se busca establecer el método óptimo para caracterizar e interpretar el comportamiento sísmico de la estructuras en el transcurso de los años a partir de la respuesta dinámica de los depósitos lacustres de la Ciudad de México.

A partir del análisis en el capítulo anterior, se hace evidente cómo influye el fenómeno de hundimiento regional de la ciudad en la respuesta dinámica de los depósitos, pues fue evidente la notable diferencia entre las ordenadas espectrales del espectro de diseño reciente (*i.e.*, en el año 2020) con respecto al espectro de diseño en los próximos 50 años. Contemplando este incremento en las ordenas espectrales, con toda rigurosidad, el fenómeno de hundimiento regional en la Ciudad de México tiene que ser considerado en el diseño sísmico de la infraestructura civil.

Con el propósito de vislumbrar la diferencia entre las actualizaciones recientes de la obtención del espectro de diseño y el cálculo analítico del mismo. En esta sección se presenta una comparación entre los espectros de diseño obtenidos por el software SASID en su versión 2017 y el espectro de diseño de su versión reciente, SASID 2020,

con respecto al espectro de diseño calculado en los capítulos anteriores con las ecuaciones empíricas. Así también, se presenta la comparación de los espectros de diseño obtenidos del SASID vs. el espectro de diseño modificado por cambio en las propiedades del suelo por efecto del hundimiento regional de la Ciudad de México en 50 años.

A continuación se presentan los espectros de diseño obtenidos del programa SASID en su versión 2017 para estructuras del Grupo B en el sitio de estudio con coordenadas (19.4049735, -99.0990472). Así como los parámetros que forman al espectro de diseño (*i.e.*, T_s , a_0 , c , T_a , T_b y k) se muestran en la Tabla 10 propuestos por la base de datos SASID 2017. En la Figura 32 se observan los espectros de diseño considerando los cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$ propuestos por la base de datos.

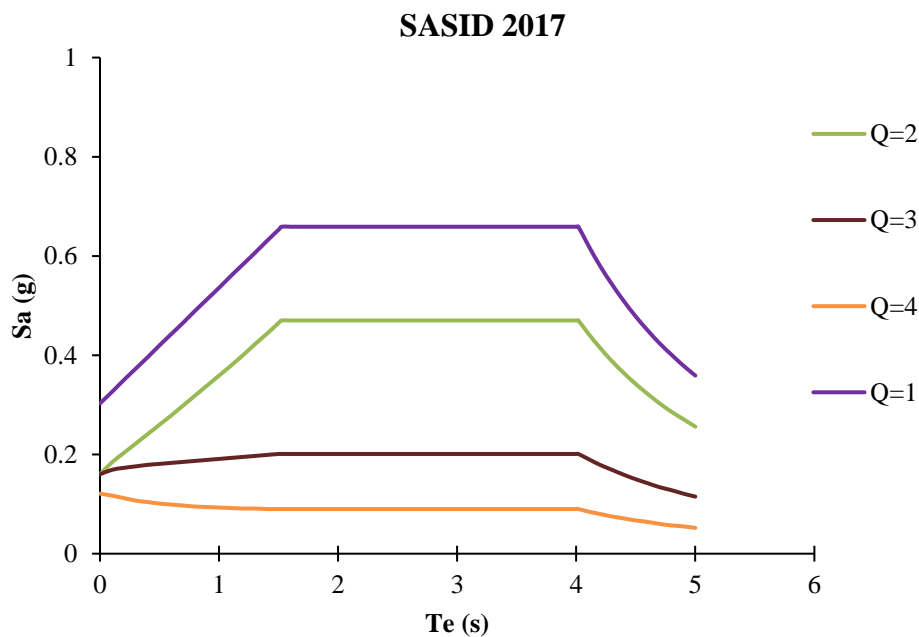


Figura 32. Espectros de diseño considerando los valores de $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ obtenidos del programa SASID 2017

Tabla 10. Parámetros que forman al espectro de diseño con $Q=1$, SASID 2017

Coordenadas		T_s (s)	a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	K	B
Latitud	Longitud							
19.404972	-99.09904	3.45	0.30	0.66	1.52	4.01	0.56	1

Con los parámetros que forman los espectros de diseño se observa que el espectro de diseño con $Q=1$ propuesto por el SASID2017 inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.303 g$, la aceleración espectral máxima en este sitio llega a presentarse de $c = 0.66 g$, mientras que los espectros de diseño con $Q>1$, alcanzan valores menores de $c = 0.4 g$ para estructuras con baja ductilidad, y cercanos a $c = 0.1 g$ para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 1.52 s$ y $T_b = 4.01 s$ (ver Tabla 10).

Por su parte, en la Figura 33 se presentan los espectros de diseño obtenidos del programa SASID en su versión 2020 para el sitio de estudio. Así como los parámetros que forman al espectro de diseño (*i.e.*, T_s , a_0 , c , T_a , T_b y k) se detallan en la Tabla 11 propuestos por la base de datos SASID 2020. Se presentan a continuación los espectros de diseño considerando los cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$, propuestos por la base de datos.

Tabla 11. Parámetros que forman al espectro de diseño con $Q=1$, SASID 2020

Coordenadas		Ts (s)	a ₀ (g)	c (g)	Ta (s)	Tb (s)	B
Latitud	Longitud						
19.404972	-99.09904	3.9	0.29	0.71	1.70	3.85	1

Observando los parámetros que forman los espectros de diseño se nota que el espectro de diseño propuesto por el SASID 2020 inicia con una aceleración máxima del terreno $a_0 = 0.29 g$, la aceleración espectral máxima llega a presentarse de $c = 0.71 g$, mientras que los espectros de diseño con $Q>1$, alcanzan valores menores de $c = 0.4 g$ para estructuras con baja ductilidad, y menores a $c = 0.1 g$ para estructuras de alta ductilidad. A su vez, la meseta del espectro es menos pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 1.7 s$ y $T_b = 3.85 s$ (ver Tabla 11).

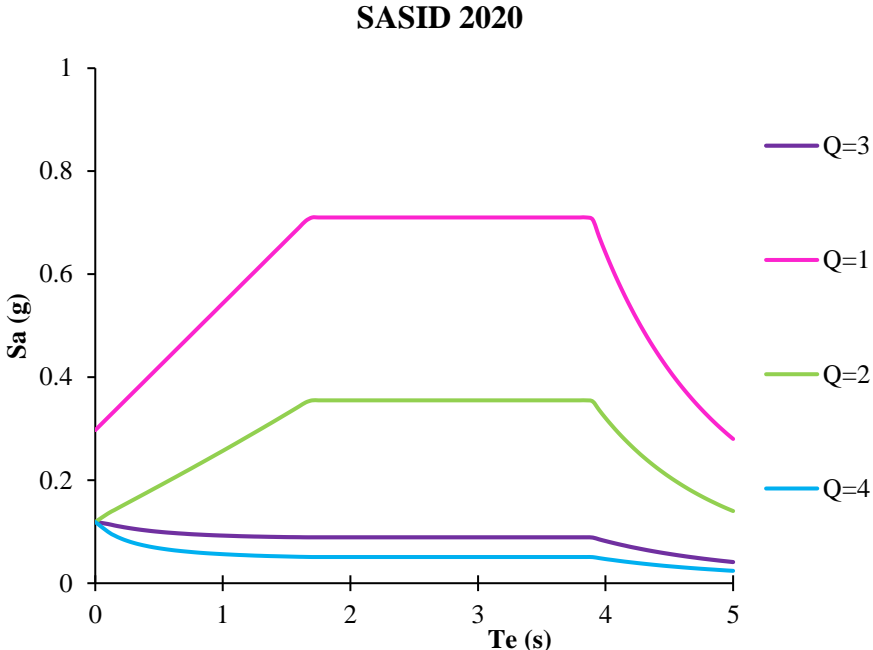


Figura 33. Espectros de diseño considerando los valores de Q=1, Q=2, Q=3 y Q=4 obtenidos del programa SASID 2020

Como es evidente, la propuesta de espectros de diseño de la actualización del SASID 2020 presenta diferencias en las ordenadas espectrales con respecto a los espectros de diseño propuestos por la versión 2017 (ver Tabla 12). Al realizar la comparación de estas bases de datos, las versiones del SASID sugieren en los espectros de diseño un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.01 g$, así como la aceleración espectral máxima que proponen varía en un $\Delta c = 0.05 g$, presentando mayores las ordenadas espectrales propuestas por el SASID 2020. A su vez, la meseta del espectro propuesto por el SASID 2017 es pronunciada y se encuentra delimitada entre los valores de $T_a = 1.52 s$ y $T_b = 4.01 s$. Presentándose mayor en un 14% (ver Figura 34).

Tabla 12. Parámetros que forman al espectro de diseño propuestos por el SASID 2017 Y SASID 2020 para el sitio de estudio

Base de datos	T_s (s)	a_0 (g)	c (g)	T_a (s)	T_b (s)	B
SASID 2020	3.9	0.29	0.71	1.70	3.85	1
SASID 2017	3.45	0.30	0.66	1.52	4.01	1

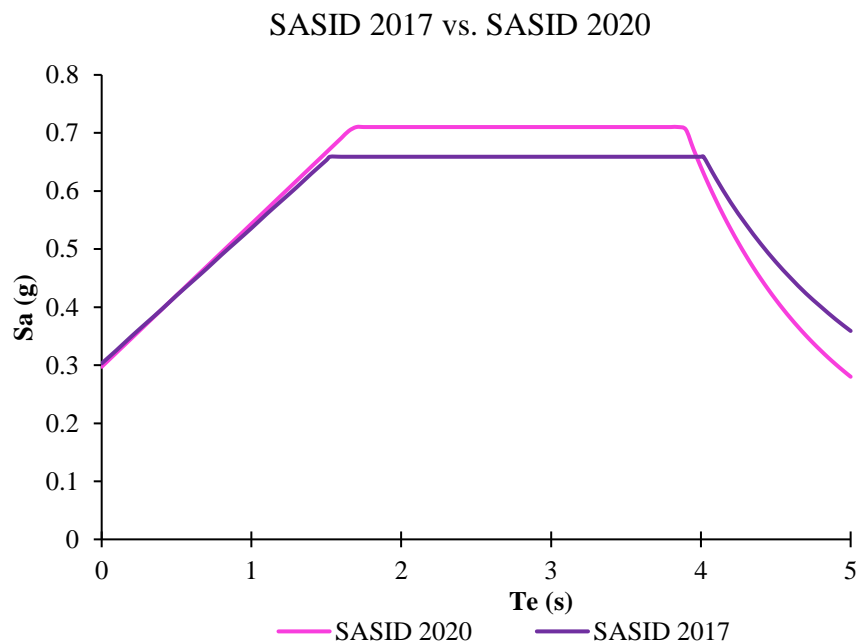


Figura 34. Comparación del espectro de diseño del SASID 2017 vs. el espectro de diseño del SASID 2020

Ahora bien, al comparar los espectros propuestos por las bases de datos SASID 2017 y SASID 2020 contra el espectro de diseño calculado en sitio con $T_s = 4 s$. Se nota que el espectro de diseño calculado en 2020 envuelve a los espectros propuestos por el SASID (*i.e.*, los espectros propuestos por el SASID sugieren ordenadas espectrales menores)

(ver Tabla 13). Al realizar la comparación de estas bases de datos, la versión del SASID 2020 sugiere para el espectro, un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 g$, con el calculado y la versión SASID 2017 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 g$, con el calculado. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 varía $\Delta c = 0.09 g$, con el calculado, mientras que la versión SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.14 g$, con el calculado. A su vez, la meseta del espectro calculado en 2020 es significativamente más pronunciada, cubriendo los valores de las ordenadas espectrales que sugieren las bases de datos por completo. Además se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.85 s$ para la propuesta de SASID 2020 y de $\Delta T_a = 0.67 s$ con la propuesta del SASID 2017 respecto al espectro calculado en 2020 (ver Figura 35).

Tabla 13. Parámetros que forman al espectro de diseño propuestos por el SASID 2017, SASID 2020 y el calculado en 2020

Método	Ts (s)	a ₀ (g)	C (g)	Ta (s)	Tb (s)	B
SASID 2020	3.9	0.29	0.71	1.70	3.85	1
SASID 2017	3.45	0.30	0.66	1.52	4.01	1
Calculado 2020	4	0.35	0.80	0.85	4.20	1

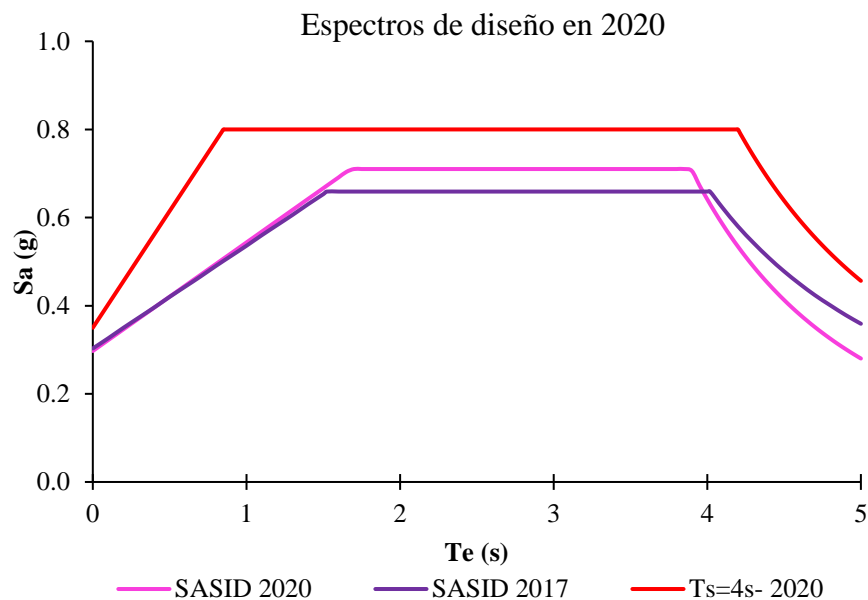


Figura 35. Comparación del espectro de diseño del SASID 2017 y el espectro de diseño del SASID 2020 vs. el espectro calculado para el sitio

Ahora bien, al comparar los espectros propuestos por las bases de datos SASID 2017 y SASID 2020 contra el espectro de diseño calculado en sitio en 2070 con $T_s = 3.42 \text{ s}$ (*i.e.*, espectro de diseño calculado en el Modelo 1), donde se considera la reducción del periodo dominante de vibración del suelo generado por el fenómeno de hundimiento regional de la Ciudad de México. Se nota que el espectro calculado para este año envuelve a los espectros propuestos por el SASID (*i.e.*, los espectros propuestos por el SASID sugieren ordenadas espectrales menores) (ver Tabla 14).

Al realizar la comparación de estas bases de datos, la versión del SASID 2020 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 \text{ g}$, con el calculado y la versión SASID 2017 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 \text{ g}$, con el calculado. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 varía $\Delta c = 0.15 \text{ g}$, con el calculado, mientras que la versión SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.2 \text{ g}$, con el calculado. A su vez, la meseta del espectro calculado en 2070 es significativamente más pronunciada, cubriendo los valores de las ordenadas espectrales que sugieren ambas bases de datos del SASID por completo (ver Figura 36).

Tabla 14. Parámetros que forman al espectro de diseño con $Q=1$ propuestos por el SASID 2017, SASID 2020 y el calculado en 2070 considerando la evolución de T_s (Modelo 1)

Método	T_s (s)	a_0 (g)	C (g)	T_a (s)	T_b (s)	B
SASID 2020	3.9	0.29	0.71	1.70	3.85	1
SASID 2017	3.45	0.30	0.66	1.52	4.01	1
Modelo 1-2070	3.42 s	0.35	0.86	1.33	4.10	1

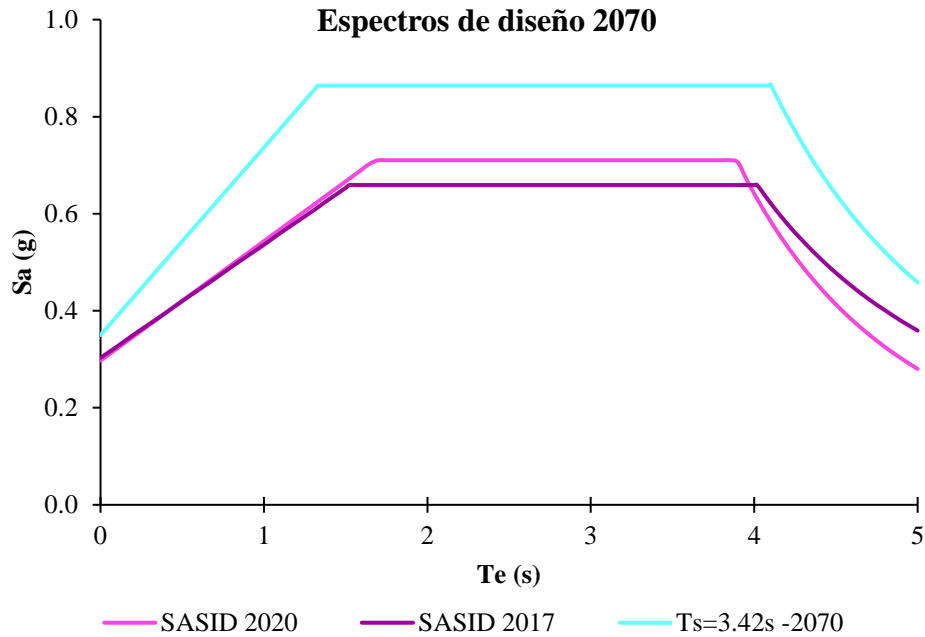


Figura 36. Comparación del espectro de diseño del SASID 2017 y el espectro de diseño del SASID 2020 vs. el espectro calculado para el sitio, considerando la evolución del Ts para el año 2070 (Modelo 1)

Finalmente comparando los espectros propuestos por las bases de datos SASID 2017 y SASID 2020 y los espectros de diseño calculados en el Modelo 2 para el año 2070, donde se considera la reducción en el espesor del depósito y el incremento porcentual en la velocidad de propagación de onda, propiciando la reducción del periodo dominante de vibración del suelo generado por el fenómeno de hundimiento regional de la Ciudad de México. Se nota que los espectro de diseño calculado en 2070 para cada submodelo del Modelo 2 (*i.e.*, Modelo 2.a, 2.b, 2.c, 2.d y 2.e) envuelven a los espectros propuestos por el SASID (*i.e.*, los espectros propuestos por el SASID sugieren ordenadas espectrales notablemente menores) (ver Tabla 15). Al realizar la comparación de estas bases de datos, las versiones del SASID 2020 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 g$, con el modelo crítico (*i.e.*, Modelo 2.e) y la versión SASID 2017 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 g$, con el modelo crítico. Diferencia que se mantiene constante con las comparaciones previamente presentadas. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 varía $\Delta c = 0.40 g$, con el modelo crítico, mientras que la versión SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.45 g$, con el calculado. A su vez, la meseta del espectro calculado en el modelo crítico, es ligeramente menos pronunciada, y además la forma del espectro total cubre los valores de las ordenadas espectrales que sugieren las bases de datos por completo (ver Figura 37).

Tabla 15. Parámetros que forman al espectro de diseño con $Q=1$ propuestos por el SASID 2017, SASID 2020 y el calculado en 2070 considerando la evolución de V_s y T_s (Modelo 2)

Método	T_s (s)	a_0 (g)	C (g)	T_a (s)	T_b (s)	B
SASID 2020	3.9	0.29	0.71	1.70	3.85	1
SASID 2017	3.45	0.30	0.66	1.52	4.01	1
Modelo 2.a-2070	3.36	0.35	0.91	1.39	4.03	1
Modelo 2.b-2070	3.29	0.35	0.97	1.46	3.95	1
Modelo 2.c-2070	3.23	0.35	1.02	1.50	3.88	1
Modelo 2.d-2070	3.17	0.35	1.06	1.50	3.80	1
Modelo 2.e-2070	3.11	0.35	1.11	1.50	3.73	1

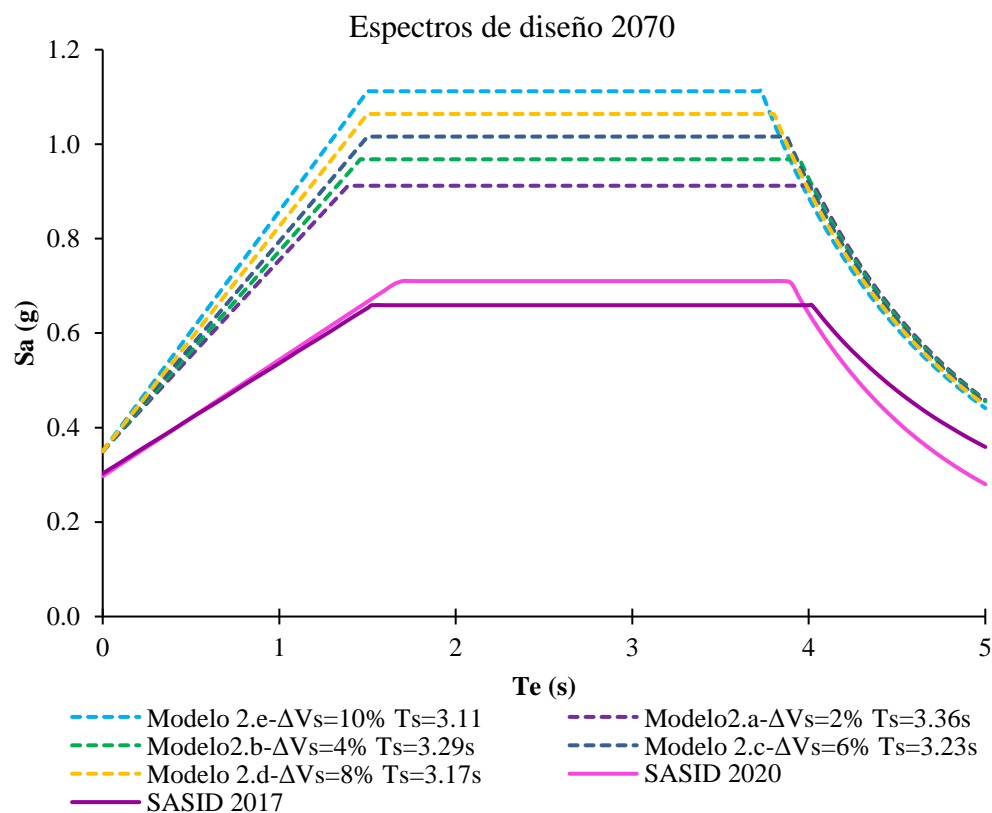


Figura 37. Comparación del espectro de diseño del SASID 2017 y el espectro de diseño del SASID 2020 vs. el espectro calculado para el sitio, considerando la evolución del T_s y V_s para el año 2070

Como se observa en las figuras anteriores, los valores de aceleración espectral contenidos en los espectros de diseño propuestos por las bases de datos del SASID 2017 y SASID 2020 quedan por debajo de los valores de aceleración espectral que realmente experimentan las estructuras, aun sin consideran los efectos de hundimiento regional en el sitio, un punto importante de destacar, ya que las estructuras diseñadas con estas bases de datos pueden estar sujetas a sollicitaciones sísmicas mayores que aquellas para las que fueron calculadas.

Capítulo 8

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este estudio se presentaron dos modelos de interpretación de los espectros de diseño calculados a cada 10 años desde 2020 hasta 2070 considerando el efecto de hundimiento regional de los depósitos lacustres de la Ciudad de México. Para el periodo de tiempo de 50 años. En el Modelo 1, se calcularon los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante del suelo (T_s) por efectos de la reducción gradual del espesor del depósito compresible (H) del sitio de estudio, mientras que en el Modelo 2 se calcularon cinco submodelos de los espectros de diseño considerando la evolución del T_s por efectos de la reducción gradual del H y además un incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s); para este modelo de análisis la V_s se determinó para un incremento porcentual de: a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8% y e) 10%.

Con base en los registros de trabajos exploratorios de Down Hole y de Vibración Ambiental, se estableció el periodo dominante de vibración del suelo en 2020 con $T_s = 4$ s. Posteriormente para evaluar el cambio del T_s de 2020 hasta 2070 se consideró la velocidad de hundimiento promedio registrada en un banco de nivel 138-B(SO2E03)04, cercano al sitio de estudio, como $V_H = 20.7$ cm/año.

El Modelo 1, se calcularon los espectros de diseño con las siguientes consideraciones:

- a) Espectros de diseño en el año 2020 con: $T_s = 4 \text{ s}$ y $H = 72 \text{ m}$
- b) Espectros de diseño en el año 2030 con: $T_s = 3.88 \text{ s}$ y $H = 69.9 \text{ m}$
- c) Espectros de diseño en el año 2040 con: $T_s = 3.76 \text{ s}$ y $H = 67.9 \text{ m}$
- d) Espectros de diseño en el año 2050 con: $T_s = 3.65 \text{ s}$ y $H = 65.8 \text{ m}$
- e) Espectros de diseño en el año 2060 con: $T_s = 3.53 \text{ s}$ y $H = 63.7 \text{ m}$
- f) Espectros de diseño en el año 2070 con: $T_s = 3.42 \text{ s}$ y $H = 61.6 \text{ m}$

Nótese que del año 2020 al año 2070 el espesor del depósito (H) disminuye en un 14%, reduciéndose hasta 10 m . Y en consecuencia, el T_s disminuye en un 14% reduciéndose 0.58 s . Por otro lado, el espectro de diseño calculado para este modelo, presenta en el año 2070, en comparación con el espectro de diseño calculado para 2020, un incremento en las aceleraciones espectrales máximas que experimentan las estructuras en un $\Delta c = 7\%$, mientras que los límites de la meseta se acortan en un 17%. Además, se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.48 \text{ s}$, producto de la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo.

Del Modelo 2, se calcularon los espectros de diseño con las siguientes consideraciones:

- a) Espectros de diseño del año 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- b) Espectros de diseño del Modelo 2.a con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 73.4 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.36 \text{ s}$
- c) Espectros de diseño del Modelo 2.b con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 74.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.29 \text{ s}$
- d) Espectros de diseño del Modelo 2.c con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 76.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.23 \text{ s}$
- e) Espectros de diseño del Modelo 2.d con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 77.8 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.17 \text{ s}$
- f) Espectros de diseño del Modelo 2.e con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 79.2 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.11 \text{ s}$

Se destaca que del año 2020 al año 2070, así como, el espesor del depósito H disminuye en un 14%, reduciéndose hasta 10 m . En el incremento porcentual de la velocidad de propagación de onda crítica (*i.e.*, $\Delta V_s = 10\%$) el T_s se disminuye hasta en un 22% reduciéndose en 0.89 s . En este análisis, a medida que crece el cambio porcentual de la velocidad de propagación de onda de corte se observó el incremento de las ordenadas espectrales y el acortamiento del espectro en la zona de la meseta. Además se observó, que el modelo más crítico es aquel con mayor incremento porcentual de velocidad de propagación de ondas de corte (*i.e.*, Modelo 2.e con un incremento de V_s del 10% para 2070) pues proporcionó los valores de aceleración espectral mayores. Siguiendo este tenor, el espectro de diseño del submodelo crítico calculado para este modelo (*i.e.*, Modelo 2.e), en comparación con el espectro de diseño calculado para 2020, un incremento notable en las aceleraciones espectrales máximas que experimentan las estructuras en un $\Delta c = 28\%$ y los límites de la meseta se acortan en un 33%. Así también, se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.65 \text{ s}$ producto del cambio en las velocidades de onda de corte y la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo.

Como discusión del análisis del Modelo 1 y 2, se concluye que al considerar únicamente la reducción de espesor en la evolución del periodo se obtuvo en 2070, un $T_s = 3.42 s$ (*i.e.*, Modelo 1), mientras que en el segundo análisis (*i.e.*, Modelo 2), se obtuvo en 2070, una reducción del periodo dominante de vibración del suelo de hasta $T_s = 3.11 s$ en el submodelo más crítico (*i.e.*, Modelo 2.e). Teniendo una diferencia entre periodos de vibrar del suelo de $\Delta T_s = 9\%$, lo que significa que el T_s del Modelo 2.e con respecto del Modelo 1 es menor en $\Delta T_s = 0.31 s$. Además, los espectros de diseño muestran en el Modelo 2 un incremento notable en las aceleraciones espectrales máximas que experimentan las estructuras en un $\Delta c = 22\%$, y los límites de la meseta se acortan en un 33%, y se presenta en el Modelo 2.e un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.17 s$, producto de la reducción del periodo dominante de vibrar del suelo considerando los efectos de la velocidad de propagación de ondas de corte en el transcurso de los años.

De la comparación de los espectros de diseño obtenidos de la base de datos SASID 2017 y SASID 2020 con respecto a los espectros de diseño calculados se discute lo siguiente:

- 1) El espectro de diseño del 2020 con $T_s = 4 s$.

El SASID 2020 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 g$, con el calculado y el SASID 2017 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 g$, con el calculado. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 para el espectro de diseño varía $\Delta c = 0.09 g$, con el calculado, mientras que la versión SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.14 g$, con el calculado. A su vez, la meseta del espectro calculado en 2020 es significativamente más larga, cubriendo los valores de las ordenadas espectrales que sugieren las bases de datos por completo. Así también, se presenta un corrimiento del periodo característico menor del $\Delta T_a = 0.85 s$ para la propuesta de SASID 2020 y de $\Delta T_a = 0.67 s$ con la propuesta del SASID 2017 respecto al espectro calculado.

- 2) El espectro de diseño del Modelo 1 con $T_s = 3.42 s$.

El SASID 2020 sugiere un valor de aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 g$, con el calculado y el SASID 2017 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 g$, con el calculado. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 para el espectro de diseño varía $\Delta c = 0.15 g$, con el calculado, mientras que la versión SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.2 g$, con el calculado. A su vez, la meseta del espectro calculado en 2070 es significativamente más larga, cubriendo los valores de las ordenadas espectrales que sugieren ambas bases de datos del SASID por completo.

3) El espectro de diseño más crítico del Modelo 2 con la reducción de $T_s = 3.11$ s.

El SASID 2020 sugiere un valor de la aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.06 g$, con el modelo crítico (*i.e.*, Modelo 2.e) y la versión SASID 2017 sugiere un valor de aceleración máxima del terreno que difiere en $\Delta a_0 = 0.05 g$, con el modelo crítico. Diferencia que se mantiene constante con las comparaciones previamente presentadas. La aceleración espectral máxima que propone SASID 2020 para el espectro de diseño varía $\Delta c = 0.40 g$, con el crítico, mientras que el SASID 2017 sugiere un valor que varía $\Delta c = 0.45 g$, con el crítico. A su vez, la meseta del espectro calculado en 2070 es ligeramente menos pronunciada, y además la forma del espectro total cubre los valores de las ordenadas espectrales que sugieren las bases de datos por completo.

Como discusión, los valores de aceleración espectral contenidos en los espectros de diseño propuestos por las bases de datos del SASID 2017 y SASID 2020 quedan por debajo de los valores de aceleración espectral que realmente experimentan las estructuras, aún sin considerar los efectos de la evolución de las propiedades dinámicas del suelo sujetas al hundimiento regional de la Ciudad de México, un punto importante de destacar ya que las estructuras diseñadas con estas bases de datos pueden estar sujetas a sollicitaciones sísmicas mayores que aquellas para las que fueron calculadas.

Capítulo 9

CONCLUSIONES

Se presentó la variación de los espectros de diseño sísmico considerando el efecto del hundimiento regional en función del tiempo, asociada al cambio de los parámetros dinámicos del suelo en un periodo de 50 años. Se analizaron dos modelos: 1) se calcularon los espectros de diseño considerando la evolución del periodo dominante del suelo (T_s) por efectos de la reducción gradual del espesor del depósito compresible (H) del sitio de estudio y 2) se calcularon los espectros de diseño considerando la evolución del T_s por efectos de la reducción gradual del H y además un incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s).

Considerar en el cálculo de los espectros de diseño los efectos de hundimiento regional en un periodo de 50 años, conlleva a una reducción gradual del espesor del depósito, un incremento de la velocidad de propagación de onda de corte y como resultado una disminución en el periodo dominante de vibrar del suelo de hasta un 22% en el sitio de estudio. Propiciando un incremento de las aceleraciones espectrales máximas que experimentan las estructuras hasta en más del 28%.

Al analizar los valores de aceleración espectral contenidos en los espectros de diseño propuestos por las bases de datos del SASID 2017 y SASID 2020, para el sitio de estudio, quedaron por debajo de los valores de aceleración espectral que realmente experimentan las estructuras, aun sin consideran los efectos de hundimiento regional en el sitio, un punto importante de destacar ya que las estructuras diseñadas con estas

bases de datos pueden estar sujetas a sollicitaciones sísmicas mayores que aquellas para las que fueron calculadas.

Finalmente el diseño sísmico de la infraestructura civil de la ciudad requiere estudios que garanticen su óptimo desempeño a lo largo de la vida útil para el cual se diseña. Siguiendo este tenor, es recomendable interpretar el comportamiento sísmico de las estructuras en el transcurso de los años a partir de la respuesta dinámica de los depósitos lacustres del subsuelo considerando el fenómeno de hundimiento regional al que se encuentra sujeto la Ciudad de México con toda rigurosidad. Pues ante un evento sísmico a futuro, la reducción con el tiempo del periodo dominante de vibración del suelo puede generar un efecto de resonancia en estructuras con periodo fundamental inferior al original del terreno; así mismo, al prescindir del cambio en las propiedades dinámicas y geométricas del subsuelo en el diseño sísmico de la infraestructura, al llegar ésta al límite de su vida útil puede estar sujeta a sollicitaciones que son evidentemente desfavorables en su respuesta, al ofrecer el subsuelo una respuesta con aceleraciones notablemente superiores a las definidas 50 años atrás, cómo se consiguió demostrar con este estudio; y que es una situación omitida actualmente en los criterios de diseño estructural, que además, incrementa potencialmente la vulnerabilidad de las estructuras que residen sobre los depósitos lacustres del subsuelo de la Ciudad de México.

BIBLIOGRAFÍA

Astiz, L., Kanamori, H. and Eissler, H., (1987). Source characteristics of earthquakes in the Michoacán seismic gap in Mexico, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **77(4)**, 1326 - 1346.

Cruz, V. M., Singh, S. K. & Ordaz, M. (2017). ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México? *Revista Digital Universitaria (RDU)*, **18(7)**.

Dobry, R., & Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits.

Libertad, Y. (2018). Evolución de la respuesta sísmica de la ciudad de México, Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

NTC-DS (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

NTC-DS (2017). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

NTC-DS (2020). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal.

Reinoso, E., & Lermo, J. (1991). Periodos del suelo del valle de México medidos en sismos y con vibración ambiental. In *Proc. IX National Conference on Earthquake Engineering* (pp. 2-149).

Singh, S. K., Reinoso, E., Arroyo, D., Ordaz, M., Cruz-Atienza, V., Pérez-Campos, X., ... & Hjörleifsdóttir, V. (2018). Deadly intraslab Mexico earthquake of 19 September 2017 (Mw7.1): Ground motion and damage pattern in Mexico City. *Seismological Research Letters*, **89(6)**, 2193-2203.

Anexo A

MODELO 2 DE ANÁLISIS

En esta sección se calculan los espectros de diseño considerando la evolución de la velocidad de propagación de ondas de corte (V_s) y el periodo dominante de vibrar del suelo (T_s) en un periodo de 50 años. Considerando el fenómeno de hundimiento regional en el sitio de estudio en función de la velocidad de hundimiento promedio para el sitio de estudio, $V_H = 20.7 \text{ cm/año}$.

En la Tabla 16 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 del Modelo 2.a, considerando un incremento porcentual del $\Delta V_s = 2\%$ de la velocidad de propagación de onda. Nótese la reducción del T_s en los próximos 50 años alcanzando un valor de hasta $T_s = 3.36 \text{ s}$ para 2070.

Tabla 16. Evolución del T_s en un periodo de 50 años considerando un incremento de V_s del 2% Modelo 2.a

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	V_s (m/s)	T_s (s)
2020	2030	10	2.07	69.93	72.29	3.87
2030	2040	20	4.14	67.86	72.58	3.74
2040	2050	30	6.21	65.79	72.86	3.61
2050	2060	40	8.28	63.72	73.15	3.48
2060	2070	50	10.35	61.65	73.44	3.36

En la Figura 38 se observan incrementos en velocidad de propagación de ondas de corte. Nótese que en este Modelo 2.a, en el año 2020 el suelo se caracterizaba con una $V_s = 72 \text{ m/s}$. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se incrementa a $V_s = 72.3 \text{ m/s}$, para 2040 a $V_s = 72.6 \text{ m/s}$, para 2050 a $V_s = 72.9 \text{ m/s}$, para 2060 a $V_s = 73.1 \text{ m/s}$, y para 2070 a $V_s = 73.4 \text{ m/s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el V_s aumentando en 1.4 m/s .

Modelo 2.a-Evolución del V_s

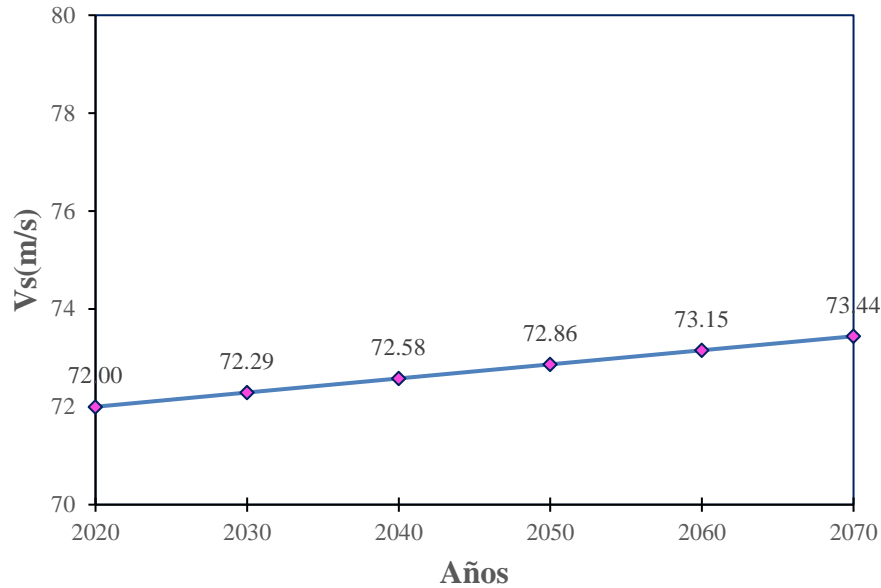


Figura 38. Evolución de la V_s del Modelo 2.a en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Figura 39 se observa para el Modelo 2.a que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4 \text{ s}$. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se reduce a $T_s = 3.87 \text{ s}$, para 2040 a $T_s = 3.74 \text{ s}$, para 2050 a $T_s = 3.61 \text{ s}$, para 2060 a $T_s = 3.48 \text{ s}$, y para 2070 a $T_s = 3.36 \text{ s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 16% reduciéndose en 0.64 s .

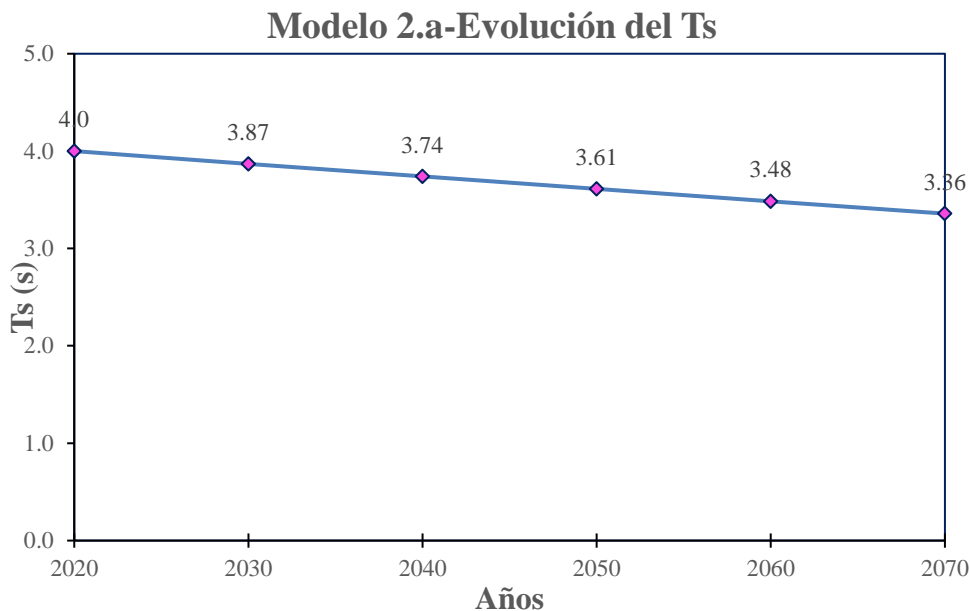


Figura 39. Evolución del Ts del Modelo 2.a en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Tabla 17 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 del Modelo 2.b, considerando un incremento porcentual del $\Delta V_s = 4\%$ de la velocidad de propagación de onda. Nótese la reducción del T_s en los próximos 50 años alcanzando un valor de hasta $T_s = 3.29$ s para 2070.

Tabla 17. Evolución del Ts en un periodo de 50 años considerando un incremento de Vs del 4% Modelo 2.b

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	V_s (m/s)	T_s (s)
2020	2030	10	2.07	69.93	72.58	3.85
2030	2040	20	4.14	67.86	73.15	3.71
2040	2050	30	6.21	65.79	73.73	3.57
2050	2060	40	8.28	63.72	74.30	3.43
2060	2070	50	10.35	61.65	74.88	3.29

En la Figura 40 se observan incrementos en velocidad de propagación de ondas de corte. Nótese que en este Modelo 2.b, en el año 2020 el suelo se caracterizaba con una $V_s = 72$ m/s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se incrementa a $V_s = 72.6$ m/s, para 2040 a $V_s = 73.1$ m/s, para 2050 a $V_s = 73.7$ m/s, para 2060 a $V_s = 74.3$ m/s, y para 2070 a $V_s = 74.9$ m/s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el V_s aumentando en 2.9 m/s.

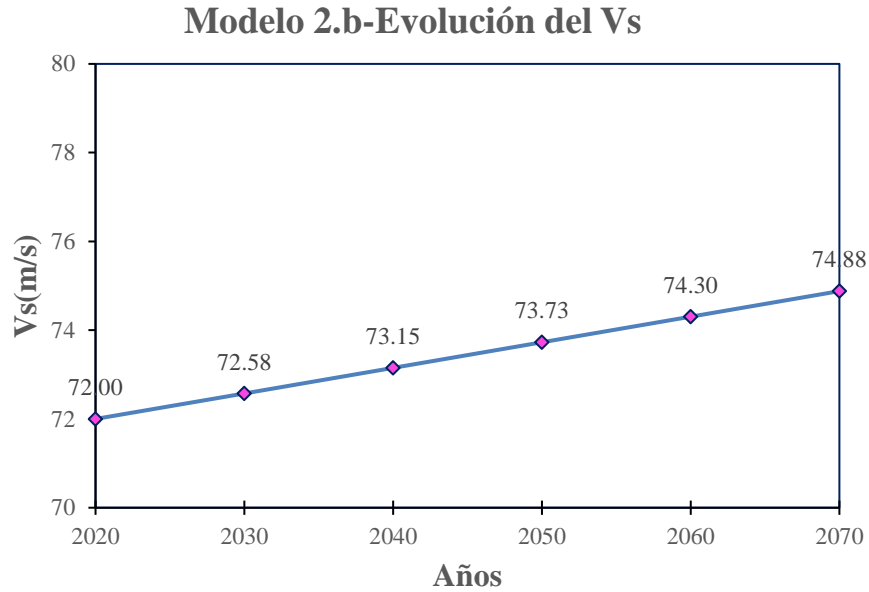


Figura 40. Evolución de la Vs en el Modelo 2.b en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Figura 41 se observa para el Modelo 2.b que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4$ s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se reduce a $T_s = 3.85$ s, para 2040 a $T_s = 3.71$ s, para 2050 a $T_s = 3.57$ s, para 2060 a $T_s = 3.43$ s, y para 2070 a $T_s = 3.29$ s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 17% reduciéndose en 0.71 s.

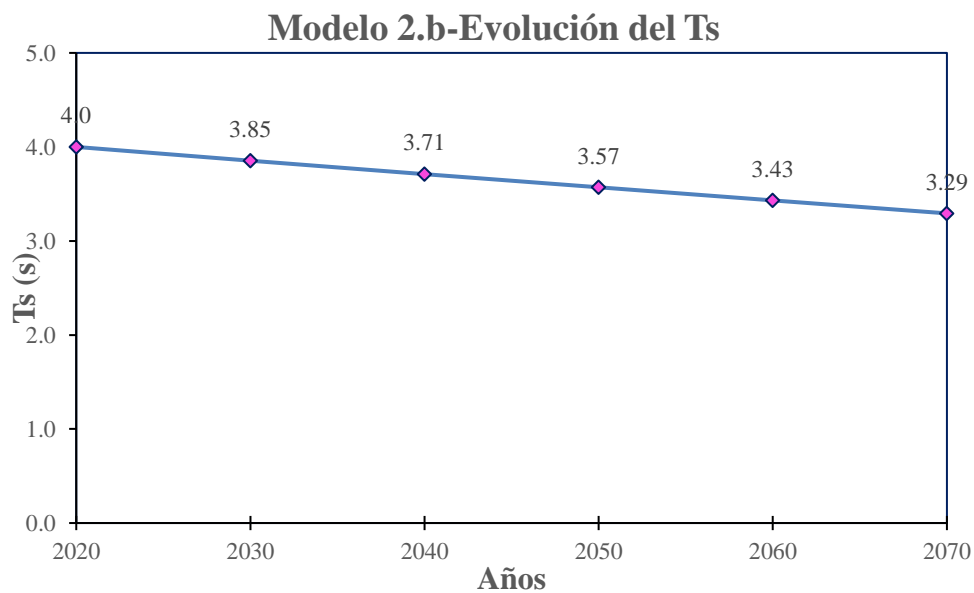


Figura 41. Evolución del Ts del Modelo 2.b en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Tabla 18 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 del Modelo 2.c, considerando un incremento porcentual del $\Delta V_s = 6\%$ de la velocidad de propagación de onda. Nótese la reducción del T_s en los próximos 50 años alcanzando un valor de hasta $T_s = 3.23$ s para 2070.

Tabla 18. Evolución del T_s en un periodo de 50 años considerando un incremento de V_s del 6% Modelo 2.c

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	V_s (m/s)	T_s (s)
2020	2030	10	2.07	69.93	72.86	3.84
2030	2040	20	4.14	67.86	73.73	3.68
2040	2050	30	6.21	65.79	74.59	3.53
2050	2060	40	8.28	63.72	75.46	3.38
2060	2070	50	10.35	61.65	76.32	3.23

En la Figura 42 se observan incrementos en velocidad de propagación de ondas de corte. Nótese que en este Modelo 2.c, en el año 2020 el suelo se caracterizaba con una $V_s = 72$ m/s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se incrementa a $V_s = 72.9$ m/s, para 2040 a $V_s = 73.7$ m/s, para 2050 a $V_s = 74.6$ m/s, para 2060 a $V_s = 75.5$ m/s, y para 2070 a $V_s = 76.3$ m/s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el V_s aumentando en 4.3 m/s.

Modelo 2.c-Evolución del V_s

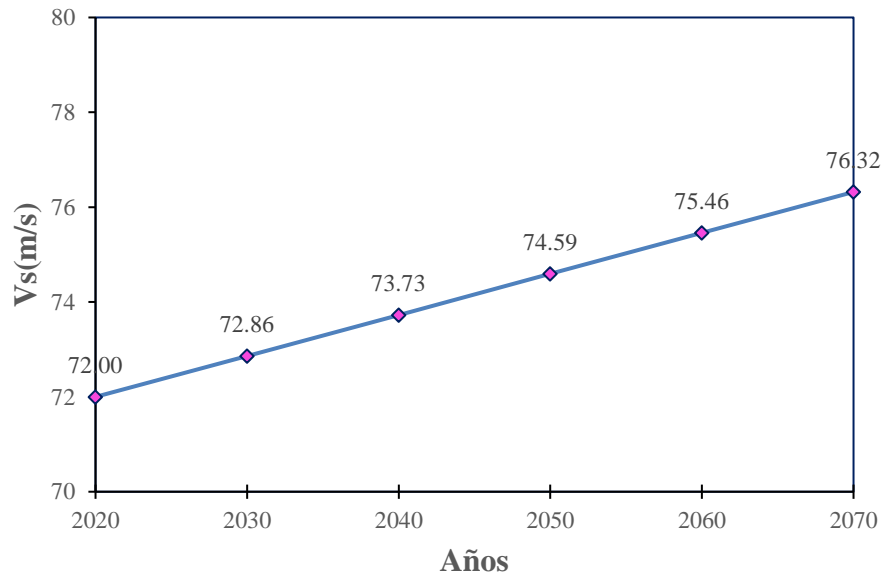


Figura 42. Evolución de la V_s del Modelo 2.c en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Figura 43 se observa para el Modelo 2.c que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4$ s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se reduce a $T_s = 3.84$ s, para 2040 a $T_s = 3.68$ s, para 2050 a $T_s = 3.53$ s, para 2060 a $T_s = 3.38$ s, y para 2070 a $T_s = 3.23$ s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 19% reduciéndose en 0.77 s.

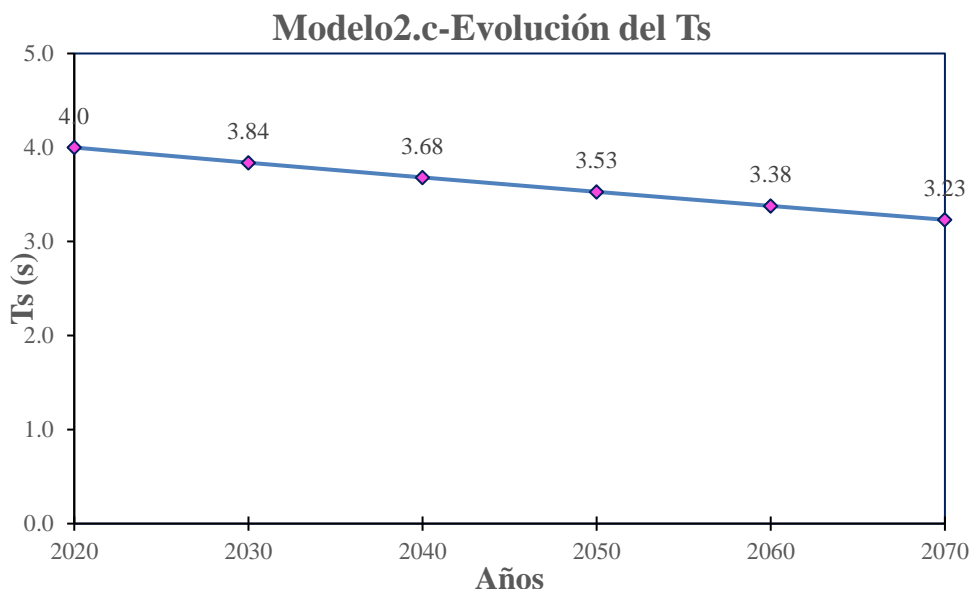


Figura 43. Evolución del T_s del Modelo 2.c en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Tabla 19 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 del Modelo 2.d, considerando un incremento porcentual del $\Delta V_s = 8\%$ de la velocidad de propagación de onda. Nótese la reducción del T_s en los próximos 50 años alcanzando un valor de hasta $T_s = 3.17$ s para 2070.

Tabla 19. Evolución del T_s en un periodo de 50 años considerando un incremento de V_s del 8% Modelo 2.d

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	V_s (m/s)	T_s (s)
2020	2030	10	2.07	69.93	73.15	3.82
2030	2040	20	4.14	67.86	74.30	3.65
2040	2050	30	6.21	65.79	75.46	3.49
2050	2060	40	8.28	63.72	76.61	3.33
2060	2070	50	10.35	61.65	77.76	3.17

En la Figura 44 se observan incrementos en velocidad de propagación de ondas de corte. Nótese que en este Modelo 2.d, en el año 2020 el suelo se caracterizaba con una $V_s = 72 \text{ m/s}$. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se incrementa a $V_s = 73.15 \text{ m/s}$, para 2040 a $V_s = 74.3 \text{ m/s}$, para 2050 a $V_s = 75.5 \text{ m/s}$, para 2060 a $V_s = 76.6 \text{ m/s}$, y para 2070 a $V_s = 77.8 \text{ m/s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el V_s aumentando en 5.8 m/s .

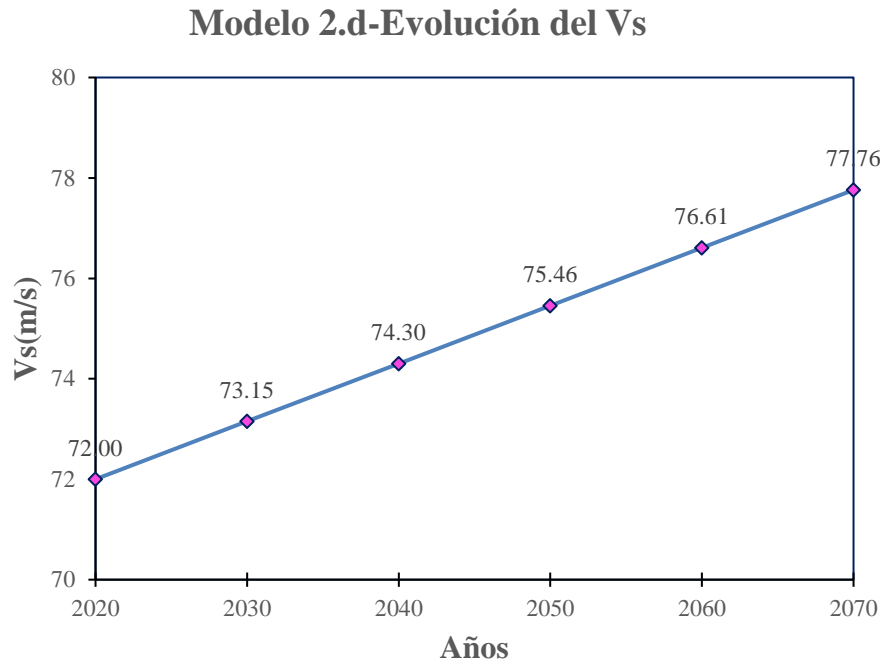


Figura 44. Evolución de la V_s del Modelo 2.d en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Figura 45 se observa para el Modelo 2.d que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4 \text{ s}$. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se reduce a $T_s = 3.82 \text{ s}$, para 2040 a $T_s = 3.65 \text{ s}$, para 2050 a $T_s = 3.49 \text{ s}$, para 2060 a $T_s = 3.33 \text{ s}$, y para 2070 a $T_s = 3.17 \text{ s}$. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 20% reduciéndose en 0.83 s .

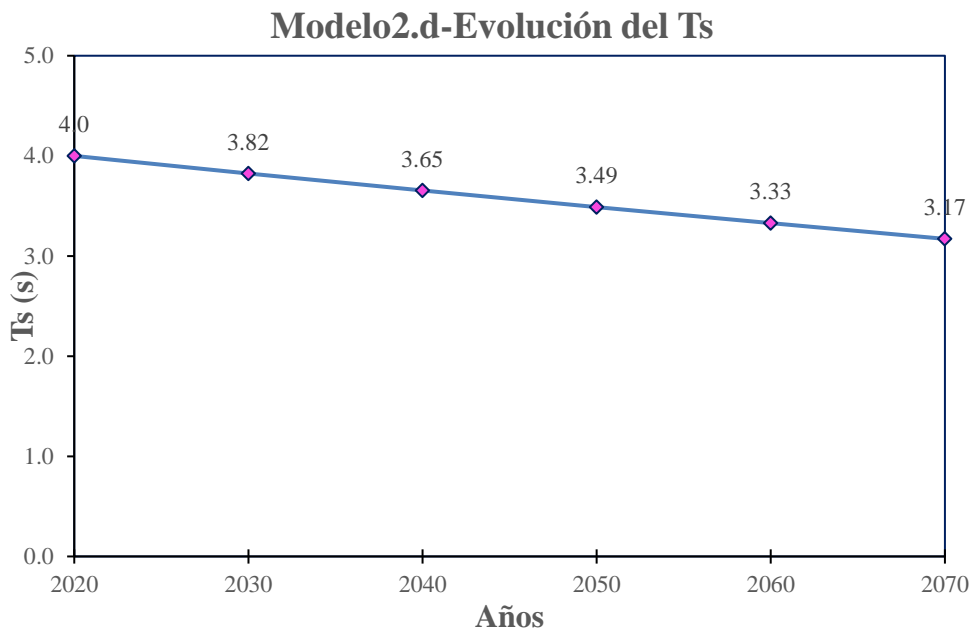


Figura 45. Evolución del Ts del Modelo 2.d en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Tabla 20 se presenta el proceso de observación de 50 años a partir del año 2020 hasta el año 2070 del Modelo 2.e, considerando un incremento porcentual del $\Delta V_s = 10\%$ de la velocidad de propagación de onda. Nótese la reducción del T_s en los próximos 50 años alcanzando un valor de hasta $T_s = 3.11$ s para 2070.

Tabla 20. Evolución del Ts en un periodo de 50 años considerando un incremento de Vs del 10% Modelo 2.e

Año		Tiempo (años)	ΔH (m)	H_f (m)	V_s (m/s)	T_s (s)
2020	2030	10	2.07	69.93	73.44	3.81
2030	2040	20	4.14	67.86	74.88	3.63
2040	2050	30	6.21	65.79	76.32	3.45
2050	2060	40	8.28	63.72	77.76	3.28
2060	2070	50	10.35	61.65	79.20	3.11

En la Figura 46 se observan incrementos en velocidad de propagación de ondas de corte. Nótese que en este Modelo 2.e, en el año 2020 el suelo se caracterizaba con una $V_s = 72$ m/s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se incrementa a $V_s = 73.4$ m/s, para 2040 a $V_s = 74.9$ m/s, para 2050 a $V_s = 76.3$ m/s, para 2060 a $V_s = 77.8$ m/s, y para 2070 a $V_s = 79.2$ m/s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el V_s aumentando en 7.2 m/s.

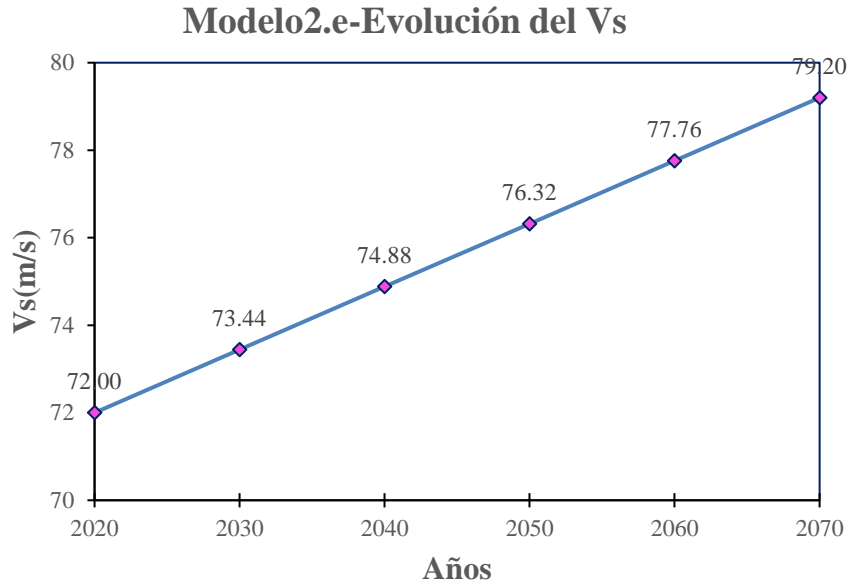


Figura 46. Evolución de la Vs del Modelo 2.e en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

En la Figura 47 se observa para el Modelo 2.e que en el año 2020 el suelo se caracterizaba con un $T_s = 4$ s. Analizando la reducción cada 10 años podemos observar que para el año 2030 se reduce a $T_s = 3.81$ s, para 2040 a $T_s = 3.63$ s, para 2050 a $T_s = 3.45$ s, para 2060 a $T_s = 3.28$ s, y para 2070 a $T_s = 3.11$ s. Por lo que se observa que del año 2020 al año 2070 el T_s se disminuye en un 22% reduciéndose en 0.89 s.

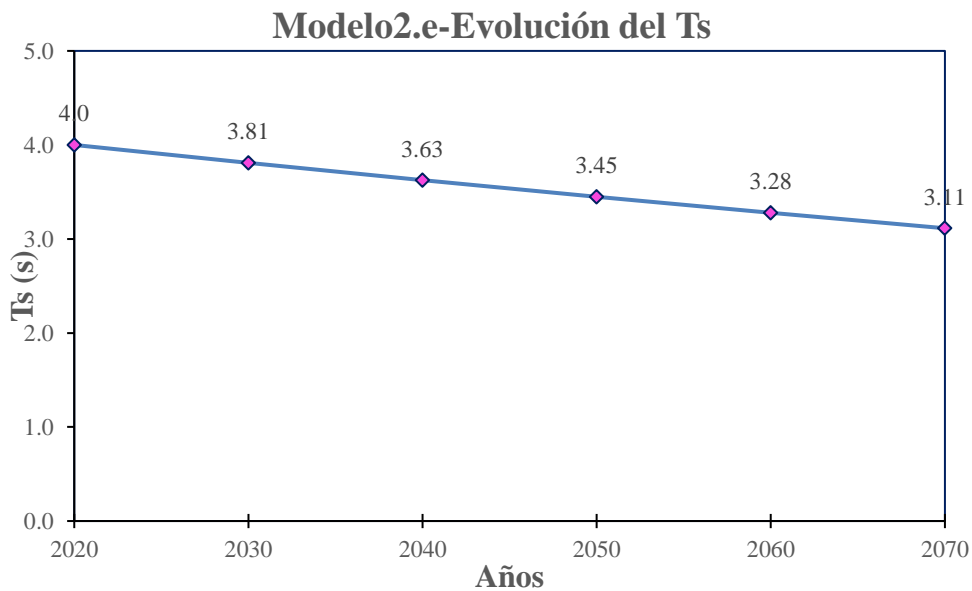


Figura 47. Evolución del Ts del Modelo 2.e en un periodo de 50 años considerando el hundimiento regional de la CDMX

A continuación se presentan los espectros de diseño para el sitio de estudio a cada 10 años, calculados con las Ecuaciones 1-10. En las siguientes figuras se presentan los espectros de diseño en función del periodo dominante de vibración del suelo para cada intervalo de tiempo (*i.e.*, 10 años) para los cinco submodelos de análisis: 1) Modelo 2.a, 2) Modelo 2.b, 3) Modelo 2.c, 4) Modelo 2.d, y 5) Modelo 2.e que consideran un incremento porcentual de la velocidad de propagación de ondas de corte de acuerdo con a) 2%, b) 4%, c) 6%, d) 8% y d) 10%, para cada modelo respectivamente.

En las figuras siguientes se presentan los espectros de diseño considerando los cuatro valores de Q (*i.e.*, $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$) y $R = 1$.

- En la Figura 48 se presentan seis espectros de diseño que corresponde al Modelo 2.a y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- Espectros de diseño del 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2030 con: $H = 69.9 \text{ m}$, $V_s = 72.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.87 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2040 con: $H = 67.9 \text{ m}$, $V_s = 72.6 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.74 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2050 con: $H = 65.9 \text{ m}$, $V_s = 72.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.61 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2060 con: $H = 63.7 \text{ m}$, $V_s = 73.1 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.48 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2070 con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 73.4 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.36 \text{ s}$

- En la Figura 49 se presentan seis espectros de diseño que corresponde al Modelo 2.b y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- Espectros de diseño del 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2030 con: $H = 69.9 \text{ m}$, $V_s = 72.6 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.85 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2040 con: $H = 67.9 \text{ m}$, $V_s = 73.1 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.71 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2050 con: $H = 65.9 \text{ m}$, $V_s = 73.7 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.57 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2060 con: $H = 63.7 \text{ m}$, $V_s = 74.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.43 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2070 con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 74.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.29 \text{ s}$

- En la Figura 50 se presentan seis espectros de diseño que corresponde al Modelo 2.c y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- Espectros de diseño del 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2030 con: $H = 69.9 \text{ m}$, $V_s = 72.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.84 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2040 con: $H = 67.9 \text{ m}$, $V_s = 73.7 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.68 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2050 con: $H = 65.9 \text{ m}$, $V_s = 74.6 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.53 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2060 con: $H = 63.7 \text{ m}$, $V_s = 75.5 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.38 \text{ s}$
- Espectros de diseño del 2070 con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 76.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.23 \text{ s}$

- En la Figura 51 se presentan seis espectros de diseño que corresponde al Modelo 2.d y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- a) Espectros de diseño del 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- b) Espectros de diseño del 2030 con: $H = 69.9 \text{ m}$, $V_s = 73.1 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.82 \text{ s}$
- c) Espectros de diseño del 2040 con: $H = 67.9 \text{ m}$, $V_s = 4.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.65 \text{ s}$
- d) Espectros de diseño del 2050 con: $H = 65.9 \text{ m}$, $V_s = 75.5 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.49 \text{ s}$
- e) Espectros de diseño del 2060 con: $H = 63.7 \text{ m}$, $V_s = 76.6 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.33 \text{ s}$
- f) Espectros de diseño del 2070 con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 77.8 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.17 \text{ s}$

- En la Figura 52 se presentan seis espectros de diseño que corresponde al Modelo 2.e y al espectro calculado en el año 2020, como se describe a continuación:

- a) Espectros de diseño del 2020 con: $H = 72 \text{ m}$, $V_s = 72 \text{ m/s}$ y $T_s = 4 \text{ s}$
- b) Espectros de diseño del 2030 con: $H = 69.9 \text{ m}$, $V_s = 73.4 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.81 \text{ s}$
- c) Espectros de diseño del 2040 con: $H = 67.9 \text{ m}$, $V_s = 74.9 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.63 \text{ s}$
- d) Espectros de diseño del 2050 con: $H = 65.9 \text{ m}$, $V_s = 76.3 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.45 \text{ s}$
- e) Espectros de diseño del 2060 con: $H = 63.7 \text{ m}$, $V_s = 77.8 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.28 \text{ s}$
- f) Espectros de diseño del 2070 con: $H = 61.6 \text{ m}$, $V_s = 79.2 \text{ m/s}$ y $T_s = 3.11 \text{ s}$

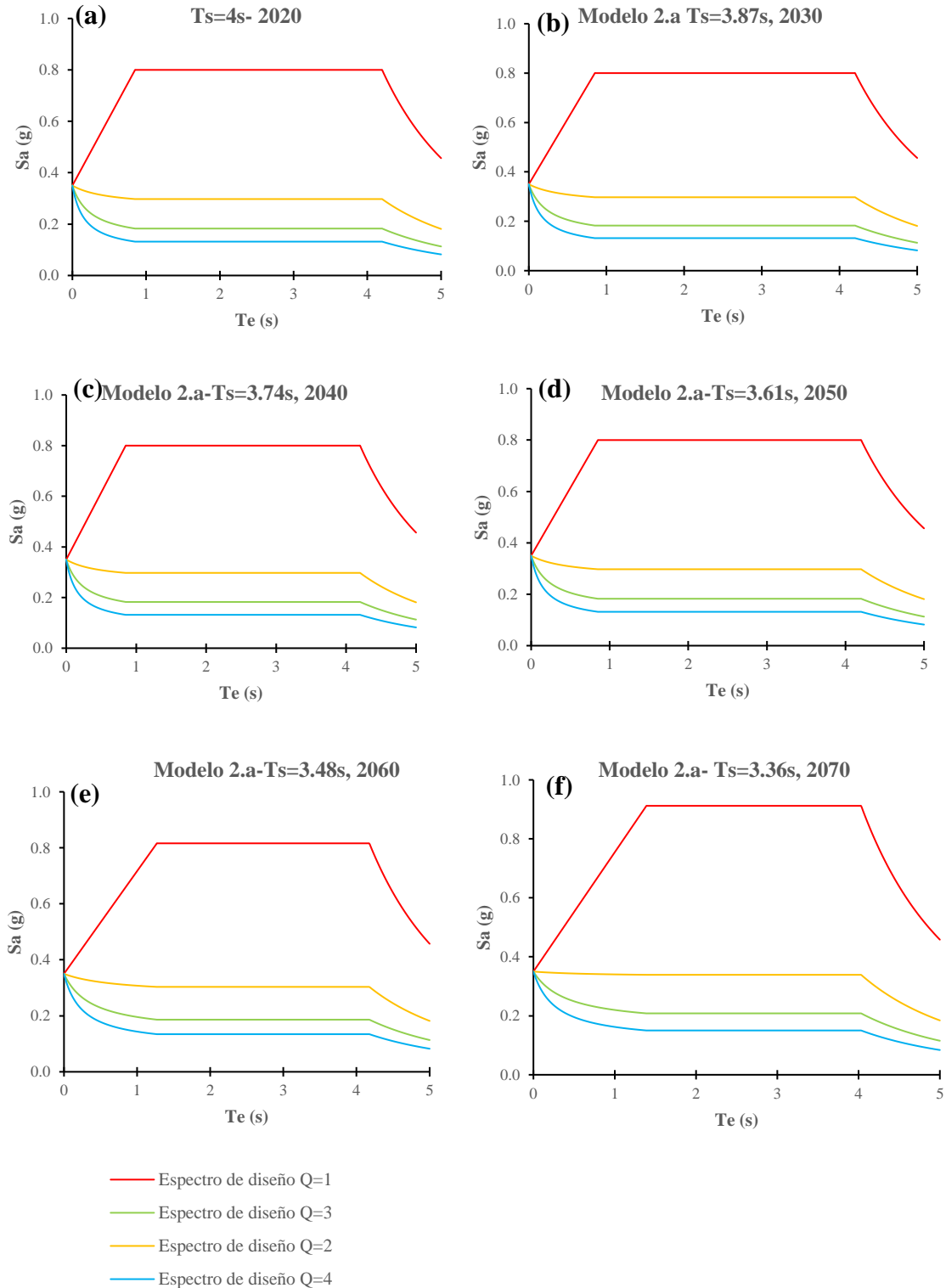


Figura 48. Cálculo de los espectros de diseño con $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ considerando la evolución del T_s y el cambio de V_s para el Modelo 2.a (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4s$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.87s$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.74s$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.61s$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.48s$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.36s$

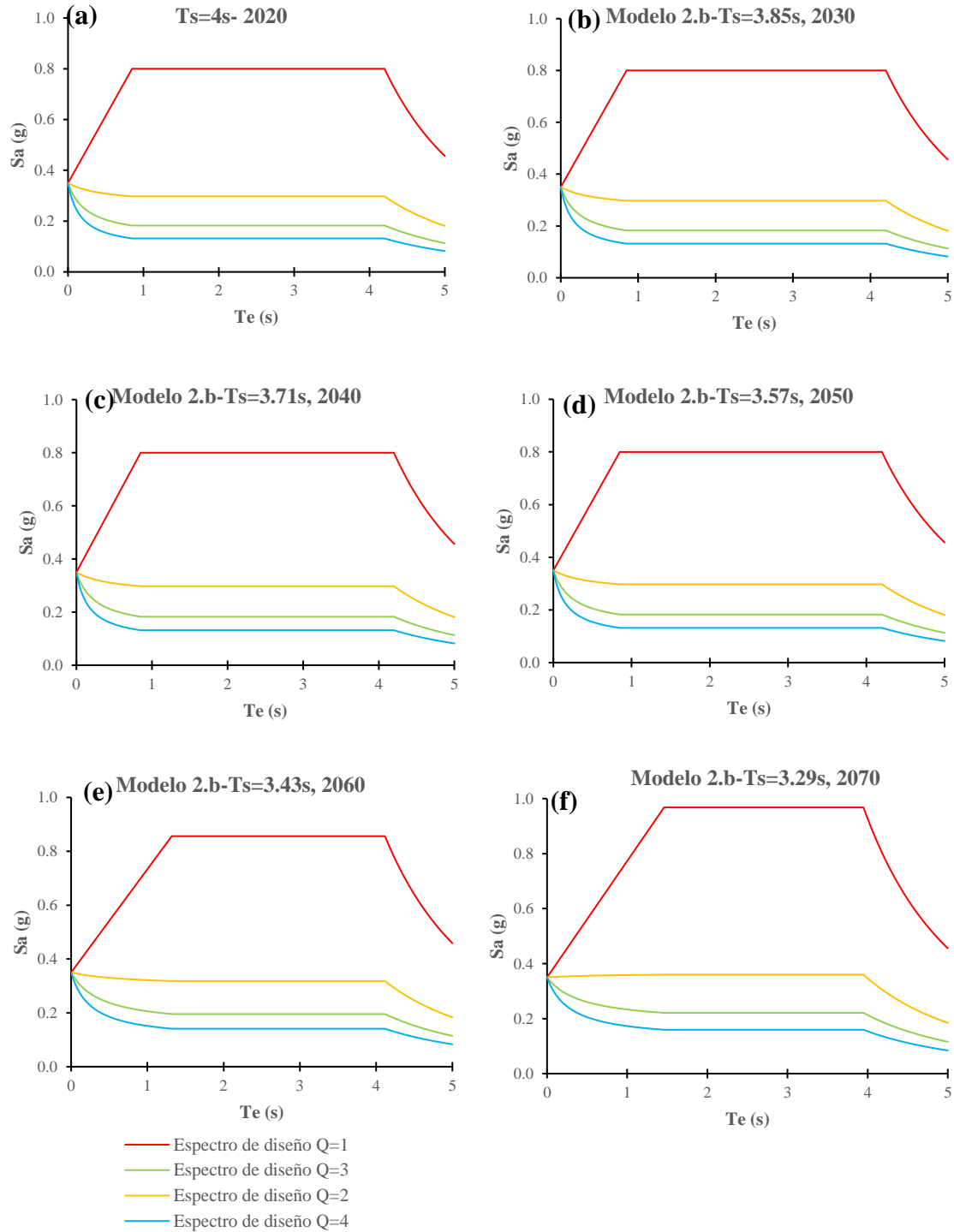


Figura 49. Cálculo de los espectros de diseño con $Q=1, Q=2, Q=3$ y $Q=4$ considerando la evolución del T_s y el cambio de V_s para el Modelo 2.b (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4s$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.85s$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.71s$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.57s$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.43s$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.29s$

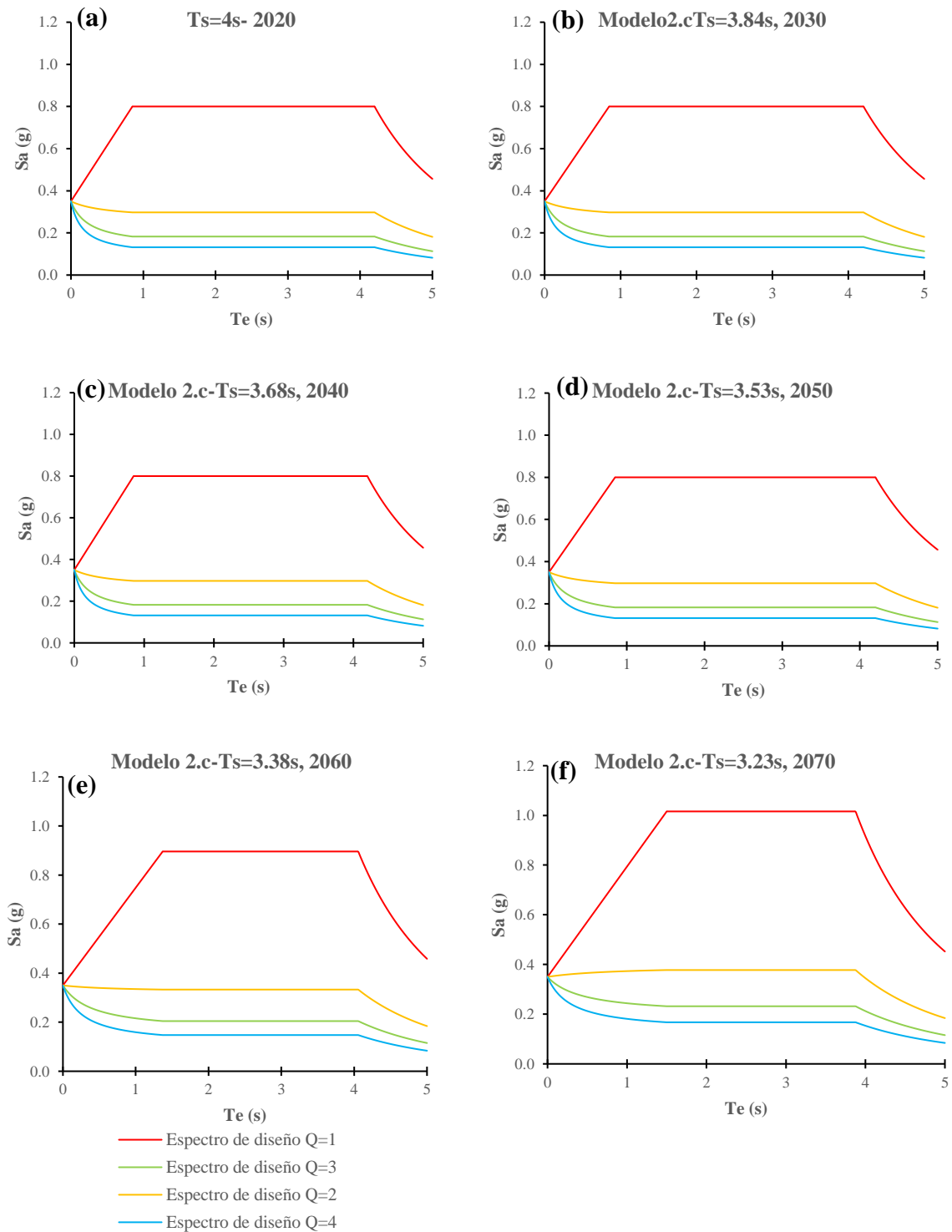


Figura 50. Cálculo de los espectros de diseño con $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ considerando la evolución del T_s y el cambio de V_s para el Modelo 2.c (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4s$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.84s$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.68s$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.53s$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.38s$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.23s$

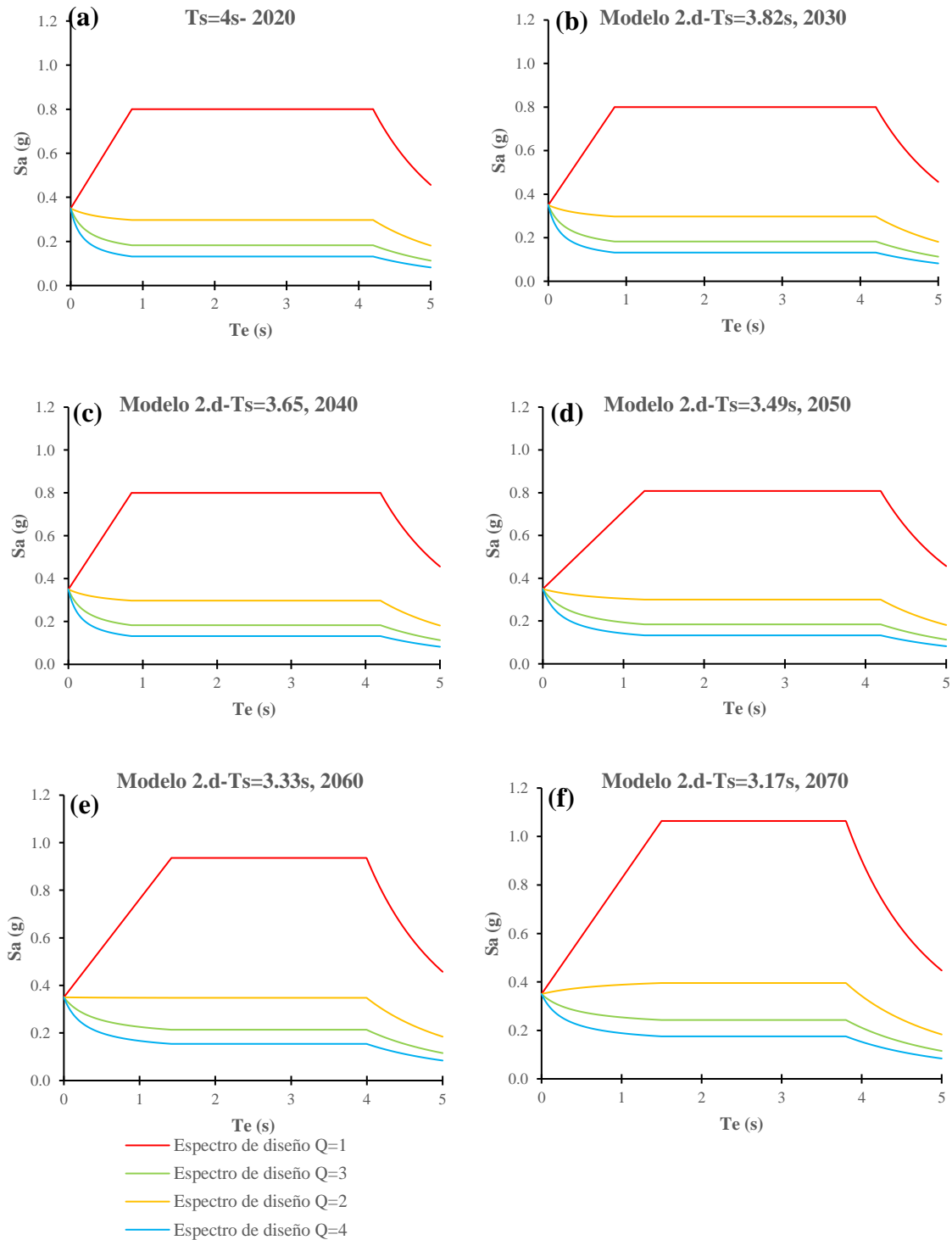


Figura 51. Cálculo de los espectros de diseño con Q=1, Q=2, Q=3 y Q=4 considerando la evolución del T_s y el cambio de V_s para el Modelo 2.d (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4s$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.82s$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.65s$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.49s$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.33s$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.17s$

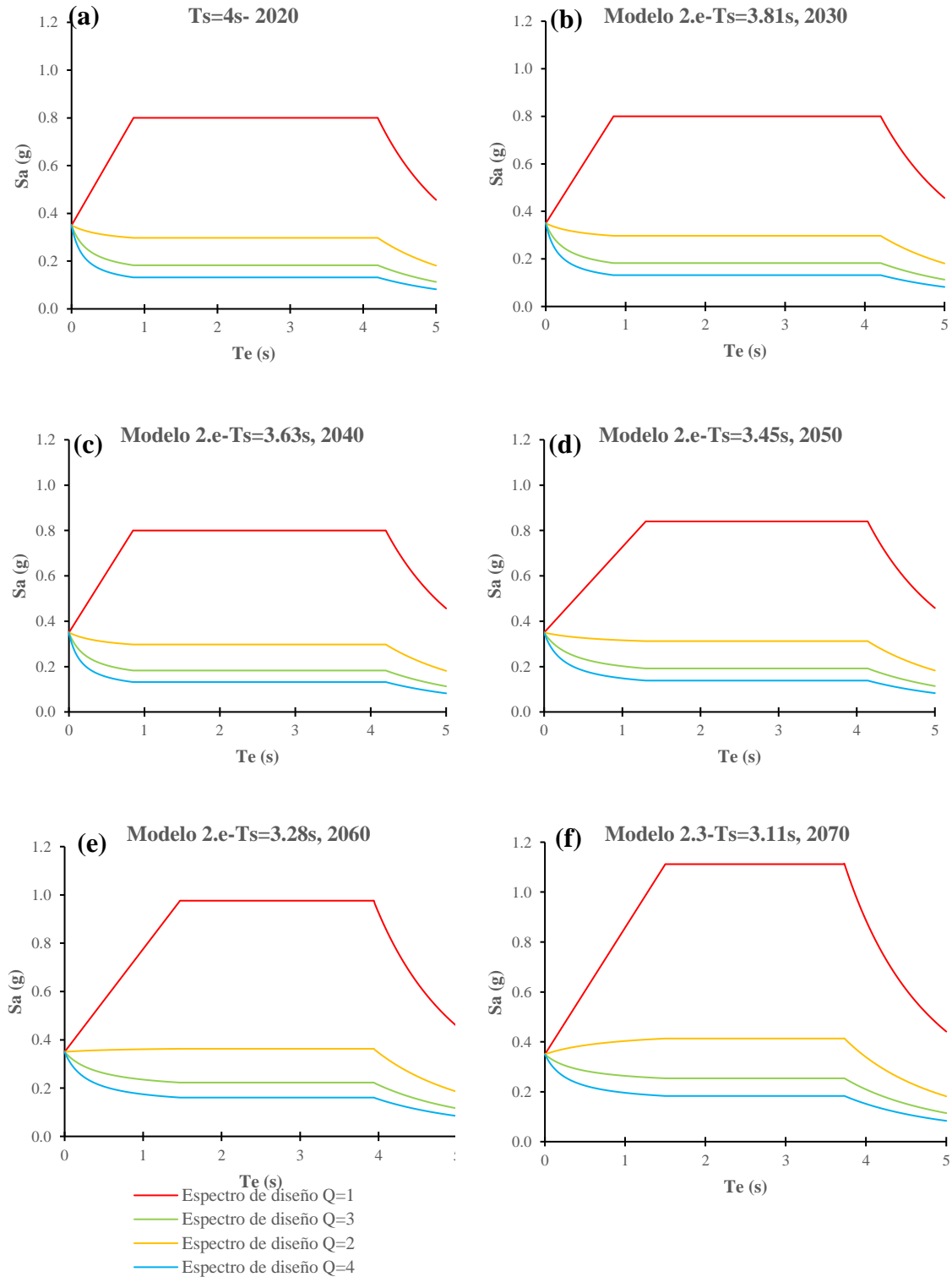


Figura 52. Cálculo de los espectros de diseño con $Q=1$, $Q=2$, $Q=3$ y $Q=4$ considerando la evolución del T_s y el cambio de V_s para el Modelo 2.e (a) Espectros en el año 2020 con $T_s=4s$, (b) Espectros en el año 2030 con $T_s=3.81s$, (c) Espectros en el año 2040 con $T_s=3.63s$, (d) Espectros en el año 2050 con $T_s=3.45s$, (e) Espectros en el año 2060 con $T_s=3.28s$ y (f) Espectros en el año 2070 con $T_s=3.11s$