



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Categorización geotécnica de
un sitio susceptible al
agrietamiento: aplicación a la
rehabilitación de la
cimentación de un edificio en
Iztapalapa**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Carlos Alberto Ayora Durán

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Silvia Raquel García Benítez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 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.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Carlos y Leticia, quienes siempre me han provisto con todas las herramientas necesarias para mi desarrollo personal y académico. Gracias por su incansable esfuerzo para darnos a mi hermana y a mí todo lo necesario para desarrollarnos. Gracias por su respaldo incondicional en todas las decisiones que he tomado, sin ese gran apoyo no estaría donde me encuentro ahora. Gracias por el ejemplo de la perseverancia, porque ustedes siempre han sido muestra de que el trabajo duro cosecha los mejores frutos. Gracias por enseñarnos a disfrutar la vida y a disfrutar lo que hacemos. Simplemente, gracias por ser los mejores padres, los amo.

A la Dra. Silvia García, por su enorme paciencia para guiarme en este proceso. Gracias por compartir su conocimiento conmigo, sin duda me llevo un gran aprendizaje, tanto personal, como académico. Gracias por impulsarme a seguir adelante con este proceso y sacar lo mejor de mí para concluirlo con éxito. Gracias por incluirme en su equipo de trabajo, conformado por excelentes profesionales, y, sobre todo, excelentes seres humanos.

Al Instituto de Ingeniería, por proveerme de las mejores herramientas tecnológicas, de consulta y recursos económicos; sin duda siempre al pendiente para proporcionar a los estudiantes todos los recursos necesarios.

Al M.I. Francisco Paniagua, por la información brindada para la aplicación de la metodología desarrollada al caso de estudio. Asimismo, le agradezco la formación profesional que me ha brindado en estos años, pues me ha guiado en el camino de la ingeniería con valores y ética profesional. Por último, le agradezco la confianza que en todo momento me ha dado para formar parte de su equipo de trabajo, compartiendo conmigo su conocimiento y experiencia, tanto personal como profesional.

Al Ing. José Nolasco, por la información proporcionada del caso de estudio. De igual manera, le agradezco las oportunidades que me ha brindado para mi desarrollo profesional, así como la confianza depositada en mí.

A mis abuelos, Carlos y Elvia, Miguel[†] y Manuela, por ser mi ejemplo a seguir. Gracias por ser el ejemplo de amor incondicional, por enseñarme que venimos a esta vida a disfrutar y compartir con nuestros seres queridos.

A mi familia, por todo el amor que me han brindado, pues ha sido un gran respaldo en mi desarrollo personal, académico y profesional. No alcanzarían las páginas ni las palabras para agradecerle a cada uno por todas las alegrías y bendiciones que han traído a mi vida, pero cada uno sabe el amor y cariño que le tengo.

A los “besinos”, por su amistad y cariño en esta etapa universitaria. Gracias por los momentos compartidos y por ser un gran apoyo para salir adelante en una etapa complicada de salud mundial.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA	2
II.I Breve descripción geológica del Valle de México	2
II.II Geología de la Alcaldía Iztapalapa.....	6
II.III Geomorfología de la Alcaldía Iztapalapa	9
II.IV Hidrología de la Alcaldía Iztapalapa	12
CAPÍTULO III. CONTEXTO GEOTÉCNICO DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA.....	13
III.I Suelos del Valle de México.	13
Formación de suelos en el Valle de México.....	13
Estratigrafía típica del Valle de México	14
Comportamiento de los suelos del Valle de México	17
III.II Actividad sísmica del Valle de México	20
Efectos de sitio	21
Influencia de la topografía local.....	23
III.III Suelos de la Alcaldía Iztapalapa.	24
Geo-Zonificación de Iztapalapa.....	25
Peligro geológico asociado a las zonas geotécnicas.....	29
CAPÍTULO IV. MODELO DE RIESGO POR AGRIETAMIENTO	31
IV.I Riesgo.	32
IV.II Amenaza.	34
Mecanismos de fracturamiento.....	35
Identificación de amenazas.	37
IV.III Vulnerabilidad.....	39
Exposición	41
Susceptibilidad	44
Resiliencia	46
CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	49
V.I Generalidades.....	49
Ubicación	49

Características Arquitectónicas.....	50
V.II Características Geotécnicas	53
Zonificación Geotécnica	53
Características de la cimentación	54
Modelo Geotécnico de la Unidad Habitacional	56
V.III Características Estructurales.....	61
Estructuración.....	61
Sistema de Piso	62
CAPÍTULO VI. PLANTEAMIENTO Y COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS	63
VI.I Amenazas	63
Nivel de Aguas Freáticas (NAF)	63
Sismicidad en la zona	66
VI.II Susceptibilidad.....	69
Paquetes de suelo con Contenidos de Agua (W%) mínimos	69
Inicio de Paquetes de suelo con Contenidos de Agua (W%) máximos.....	70
VI.III Exposición.....	71
Cotas de terreno	72
Profundidad del Basamento	72
VI.IV Lineamientos y Recomendaciones para la Reconstrucción Segura	74
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL EN EL QUE SE INDICAN LOS CONTORNOS DEL SECTOR SUR DE LA CUENCA DE MÉXICO Y DE LA CIUDAD DE MÉXICO, ASÍ COMO LAS SIERRAS QUE LIMITAN A ESTAS ÚLTIMAS: (1) SIERRA DE LAS CRUCES, (2) SIERRA NEVADA, (3) SIERRA DE CHICHINAUTZIN; (4) SIERRA DE GUADALUPE; (5) SIERRA DE PACHUCA. EN LA PORCIÓN SUR DEL MAPA SE MUESTRAN LAS REGIONES DE (6) TEPOZTLÁN, MORELOS, EN DONDE SE ENCUENTRAN EXPUESTOS LOS PRIMEROS EPISODIOS VOLCÁNICOS DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANS-MEXICANA EN SU SECTOR CENTRO-ORIENTAL Y LOS CAMPOS VOLCÁNICOS DE LA SIERRA MADRE DEL SUR: (7) HUAUTLA, MORELOS, (8) LA CALDERA DE TILZAPOTLA Y (9) TAXCO, GUERRERO. (OBTENIDO DE GONZÁLEZ TORRES ET AL., 2015)	3
FIGURA 2. COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS DE LOS DE LOS POZOS PROFUNDOS PERFORADOS EN LA CUENCA DE MÉXICO, EN DONDE SE MUESTRAN LAS EDADES OBTENIDAS PARA CADA UNO DE ELLOS. (OBTENIDO DE GONZÁLEZ TORRES ET AL., 2015)	5
FIGURA 3. MODELO GEOLÓGICO DE LA CUENCA DE MÉXICO. (OBTENIDA DE MOOSER, 2018)	6

FIGURA 4. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL POZO PROFUNDO SAN LORENZO TEZONCO. (OBTENIDA DE ARCE ET AL., 2015)	8
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL POZO SAN LORENZO TEZONCO Y DEL PARQUE NACIONAL EL TEPOZTECO. ELABORACIÓN PROPIA, OBTENIDA DE GOOGLE EARTH.	9
FIGURA 6. PRINCIPALES ELEVACIONES DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA (OBTENIDO DE ATLAS DE RIESGOS NATURALES DE LA DELEGACIÓN IZTAPALAPA, MÉXICO, D.F., 2011)	11
FIGURA 7. MAPA HIDROLÓGICO DE IZTAPALAPA (OBTENIDO DE ATLAS DE RIESGOS NATURALES DE LA DELEGACIÓN IZTAPALAPA, MÉXICO, D.F., 2011).....	12
FIGURA 8. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (OBTENIDO DE NTC-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES, 2017)	15
FIGURA 9. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL PARQUE RAMÓN LÓPEZ VELARDE EN LA COLONIA ROMA, CIUDAD DE MÉXICO (OBTENIDO DE DÍAZ-RODRÍGUEZ, 2006).	17
FIGURA 10. CORTE ESTRATIGRÁFICO EN EL SENTIDO NORTE-SUR, DONDE SE MUESTRA LA ESTRATIGRAFÍA TÍPICA DE LA ZONA III Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN (OBTENIDO DE OVANDO-SHELLY, ET AL., 2013).	18
FIGURA 11. COMPARACIÓN DE PRUEBAS REALIZADAS CON PIEZOCONO, EN EL MISMO PUNTO, EN DIFERENTES FECHAS (OBTENIDO DE OVANDO-SHELLY, ET AL., 2013).....	19
FIGURA 12. CURVA DEFORMACIÓN - TIEMPO QUE MUESTRA EL EFECTO DE CARGAS CÍCLICAS EN MUESTRAS CONFINADAS LATERALMENTE (OBTENIDA DE DÍAZ-RODRÍGUEZ, 2006).	20
FIGURA 13. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y CONDICIONES GEOTÉCNICAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO: (A) UBICACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN RELATIVOS A LA ZONA DE LOMAS, TRANSICIÓN Y LAGO; (B) CONTORNOS DEL ESPESOR DE SUELOS BLANDOS (OBTENIDA DE KRAMER, 1996).....	22
FIGURA 14. REGISTROS DE ACELERACIÓN DE LAS ESTACIONES UNAM Y SCT (OBTENIDA DE KRAMER, 1996).	22
FIGURA 15. ESPECTROS DE RESPUESTA CORRESPONDIENTES A LOS REGISTROS SÍSMICOS DE LAS ESTACIONES UNAM Y SCT (OBTENIDA DE KRAMER, 1996).	23
FIGURA 16. CARACTERIZACIÓN DE IRREGULARIDADES TOPOGRÁFICAS SIMPLES: (A) NOTACIÓN DE UNA CRESTA TRIANGULAR; (B) APROXIMACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO EN PORCIONES DE CRESTA Y VALLE (OBTENIDA DE KRAMER, 1996).	24
FIGURA 17. MAPA DE INESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA (OBTENIDO DE DELEGACIÓN IZTAPALAPA, 2011).	25
FIGURA 18. MAPA DONDE SE MUESTRAN LOS TRES SISTEMAS PRINCIPALES DE FRACTURAMIENTO QUE AFECTAN A LA ALCALDÍA IZTAPALAPA (BAJO PERMISO DE PUBLICACIÓN GARCÍA, ET AL., 2019).....	26
FIGURA 19. MAPA DONDE SE MUESTRA EL PATRÓN DE FRACTURAMIENTO UBICADO EN EL SECTOR NOROESTE DEL VOLCÁN YUHUALIXQUI (BAJO PERMISO DE PUBLICACIÓN GARCÍA, ET AL., 2019).	27
FIGURA 20. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA DE ACUERDO CON LAS NTC PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES VERSIÓN 2017 (ELABORACIÓN PROPIA, OBTENIDO DEL PROGRAMA SASID).	28
FIGURA 21. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PROPUESTA PARA EL TERRITORIO DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA (POLÍGONO DELIMITADO CON LÍNEA NEGRA). SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS DE: FLANCO VOLCÁNICO EN ROJO, LADERA VOLCÁNICA EN NARANJA, PIEDEMONTE VOLCÁNICO EN VERDE PÁLIDO Y LA PLANICIE LACUSTRE EN VERDE MEDIO. LOS SISTEMAS DE FRACTURAMIENTO CARTOGRAFIADOS SE PRESENTAN EN LÍNEAS ROJAS (OBTENIDO DE GUTIÉRREZ, ET AL., 2012).....	30
FIGURA 22. EVALUACIÓN DE RIESGO (OBTENIDA DE SERRE ET AL., 2012)	32
FIGURA 23. MAPAMUNDI DONDE SE MUESTRA LA UBICACIÓN DE LAS PRINCIPALES AMENAZAS NATURALES QUE HAN AFECTADO AL MUNDO (OBTENIDO DE BANCO MUNDIAL Y NACIONES UNIDAS, 2010).....	35

FIGURA 24. ESQUEMA CONCEPTUAL DE SEDIMENTACIÓN FLAVIO LACUSTRE EN UNA CUENCA CERRADA DE ORIGEN VOLCÁNICO, CON ACTIVIDAD CONTEMPORÁNEA A LA SEDIMENTACIÓN COMO ES EL CASO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO (OBTENIDO DE CARREÓN – FREYRE, ET AL., 2003).	36
FIGURA 25. ESCENARIOS POSIBLES DE ORIGEN (CAUSAS) DEL AGRIETAMIENTO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA, ET AL., 2019).	39
FIGURA 26. INFORMACIÓN SOBRE ESPESOR DE LOS ESTRATOS DE ARCILLAS (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA, ET AL., 2019).	43
FIGURA 27. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR EXPOSICIÓN - TRANSICIÓN/BASAMENTO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA, ET AL., 2019).	45
FIGURA 28. MODELO SISTÉMICO DE RIESGO BASADO EN LA NOCIÓN DE VULNERABILIDAD RESILIENTE (OBTENIDO DE PROVITOLLO, 2012).	48
FIGURA 29. UBICACIÓN DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (CROQUIS CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA, ET AL., 2019).	50
FIGURA 30. PLANTA DE CONJUNTO DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25, SE OBSERVAN LOS MÓDULOS QUE LA CONFORMAN (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	51
FIGURA 31. VISTA AÉREA DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25, SE OBSERVAN LOS MÓDULOS Y LAS COLINDANCIAS DE LA UNIDAD (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	51
FIGURA 32. FACHADA PRINCIPAL MÓDULO II (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	52
FIGURA 33. FACHADA PRINCIPAL MÓDULO II (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	52
FIGURA 34. FACHADA PRINCIPAL MÓDULO III (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	53
FIGURA 35. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO, SE OBSERVA LA UBICACIÓN DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (OBTENIDO DE NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIMENTACIONES, 2017).	54
FIGURA 36. ACERCAMIENTO DE LA FACHADA PRINCIPAL DEL MÓDULO II, SE OBSERVA LA CIMENTACIÓN EMPLEADA EN CADA UNO DE LOS MÓDULOS (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	55
FIGURA 37. CIMENTACIÓN SOBRE CAJÓN (OBTENIDA DE TAMEZ, 2001).	56
FIGURA 38. PLANTA DE UBICACIÓN DE LOS SONDEOS EJECUTADOS EN LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	57
FIGURA 39. PLANTA DE UBICACIÓN DE LOS CORTES ESTRATIGRÁFICOS MÁS REPRESENTATIVOS (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	57
FIGURA 40. CORTE ESTRATIGRÁFICO DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 EN LA DIRECCIÓN W-E (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	59
FIGURA 41. CORTE ESTRATIGRÁFICO DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 EN LA DIRECCIÓN NW-SE (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	60
FIGURA 42. CORTE TIPO DONDE SE MUESTRA EL REFUERZO HORIZONTAL Y VERTICAL EMPLEADO EN LOS MUROS; ASIMISMO, SE OBSERVAN LOS DOS TIPOS DE TABIQUES QUE LOS CONFORMAN (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	61
FIGURA 43. SISTEMA CONSTRUCTIVO DE MAMPOSTERÍA REFORZADA INTERIORMENTE (OBTENIDO DE NTC-DCEM, 2017).	62
FIGURA 44. CORTE TIPO LOSA DE ENTREPISO EMPLEADA EN UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	62
FIGURA 45. CAPA DE NAF DE LOS ALREDEDORES DE LA ZONA DE ESTUDIO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).	64

FIGURA 46. CAPA DE NAF DE LOS ALREDEDORES DE LA ZONA DE ESTUDIO, DONDE SE MUESTRA LA FRANJA CONSIDERADA COMO SECCIÓN CRÍTICA PARA EL AGRIETAMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA, CON CAPA DE NAF, CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).....	65
FIGURA 47. ACERCAMIENTO DE CAPA DE NAF, CON LA PLANTA GENERAL DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 SOBREPUESTA (ELABORACIÓN PROPIA, CON CAPA DE NAF CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019, Y PLANTA DE LA UNIDAD HABITACIONAL OBTENIDA DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	66
FIGURA 48. CAPA DE ACELERACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985, SE SEÑALA LA UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019). 67	67
FIGURA 49. CAPA DE ACELERACIONES MÁXIMAS REGISTRADAS DURANTE EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017, SE SEÑALA LA UBICACIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019). 68	68
FIGURA 50. CAPA CON ESPESORES DE PAQUETES DE SUELO CON CONTENIDOS DE AGUA MÍNIMOS (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).....	70
FIGURA 51. CAPA QUE MUESTRA LA PROFUNDIDAD DE INICIO DE LOS PAQUETES DE SUELO CON CONTENIDOS DE AGUA MÁXIMO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).....	71
FIGURA 52. CAPA DE COTAS DE TERRENO, SE SEÑALA LA LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).	72
FIGURA 53. CAPA DE PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO, SE SEÑALA LA LOCALIZACIÓN DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).	73
FIGURA 54. MEDICIÓN TOPOGRÁFICA DE DESPLOMES DE LOS MÓDULOS QUE CONFORMAN LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	74
FIGURA 55. CONFIGURACIÓN Y UBICACIÓN DE LAS PRINCIPALES GRIETAS QUE SE ENCUENTRAN EN LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (OBTENIDO DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).	75
FIGURA 56. ACERCAMIENTO DE LA CAPA DE NAF, CON LA PLANTA DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (ELABORACIÓN PROPIA, CON CAPA DE NAF CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019, Y PLANTA DE LA UNIDAD HABITACIONAL OBTENIDA DE PRO-GPIC & BROS, S.A. DE C.V., 2020).....	76
FIGURA 57. CAPAS DE HETEROGENEIDAD, DONDE SE MUESTRAN LOS PAQUETES DE SUELO CON CONTENIDOS DE AGUA (W%) BAJOS Y ALTOS. SE SEÑALA LA UBICACIÓN DE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).....	77
FIGURA 58. CAPAS DE EXPOSICIÓN (PROFUNDIDAD DEL BASAMENTO Y COTAS DE TERRENO), DONDE SE MUESTRA LA ALTA EXPOSICIÓN QUE TIENE LA UNIDAD HABITACIONAL MOLINO 25 AL AGRIETAMIENTO (CON PERMISO DE IMPRESIÓN DE GARCÍA ET AL., 2019).....	78

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CORRELACIÓN DE CORRELACIÓN DE PROPIEDADES PARA CADA ZONA GEOTÉCNICA DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA, VELOCIDADES DE CORTE (Vs) Y TASA DE HUNDIMIENTO ANUAL (TH).....	27
TABLA 2. MARCO TEÓRICO ANALÍTICO PARA EVALUACIÓN DE RIESGO (OBTENIDA DE BAKER, 2012).....	33



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017 evidenciaron entornos (naturales y antrópicos) de la zona suroriente de la Ciudad de México, en importante riesgo. Los complejos escenarios de alteraciones en las masas de suelo en las Alcaldías de Tláhuac e Iztapalapa imponían un formidable reto a la respuesta efectiva de recuperación en esta zona de la Ciudad de México.

A partir de estos eventos aumentó el interés de académicos y diferentes instancias gubernamentales en establecer métodos y criterios para diagnosticar la problemática desde la perspectiva del riesgo y la resiliencia, de forma que las intervenciones de recuperación de infraestructura y casa habitación fueran sistemáticas con niveles de seguridad apropiados. La reconstrucción de la ciudad exigía que la ruta de trabajo de analistas, diseñadores y constructores estuviera ligada al conocimiento más actualizado sobre las susceptibilidades de los suelos, los procesos de agrietamiento o fisuramiento, las respuestas sísmicas, la exposición de las comunidades y todo aquello que contribuyera a rediseñar soluciones que mitigaran los efectos de las complejas amenazas que enfrenta esta zona de la CDMX.

La respuesta del entorno fue y sigue siendo tan compleja que diversos equipos de científicos y tecnólogos generaron estudios desde diversos enfoques, cada uno apuntando las causas de lo manifestado hacia el campo donde su pericia los orientó. En este trabajo se concentran las principales conclusiones de estos esfuerzos para presentar una aproximación a la cuantificación del riesgo por agrietamiento en una región de Iztapalapa. El hilo conductor de la investigación es la aparición y magnificación de discontinuidades al sur de la Cuenca del Valle de México, particularmente en la Alcaldía Iztapalapa. Mediante mapas parcelados que conectan aspectos geotécnicos, geológicos, y antrópicos, se describe la susceptibilidad al fenómeno de las comunidades asentadas en la parte de la Alcaldía más afectada y que coincide con la Transición Abrupta de la CDMX.

Las conclusiones de este trabajo, que se otorgan al diseñador/analista de cimentaciones, se establecen con base en interpretaciones de las relaciones paramétricas halladas con técnicas de la inteligencia artificial. Se buscó definir la causalidad y correlación entre factores geotécnicos y geológicos (plasmados en mapas) y el riesgo por agrietamiento en la región que contiene al predio (edificio multifamiliar). Se reconocen y entienden la(s) amenaza(s) que se desprenden de la actividad humana y agravan este riesgo.

Los resultados se presentan como lectura de mapas de Amenaza, Susceptibilidad y Exposición, contruidos con modelos espaciales neuronales entrenados con propiedades derivadas de campañas de exploración geotécnica y determinaciones paramétricas con técnicas geofísicas. Además, se definieron los factores más estrechamente vinculados con la(s) Amenaza(s), en su forma actual y se proponen los escenarios de evolución. Con esto, las causas→efectos y su dinámica, se evita la peligrosa visión mecanicista de establecer elementos que actúan de forma independiente; al contrario, en esta investigación se relacionan todos los factores en un modelo que incorpora al medio natural, al antrópico, a las fuerzas de la naturaleza y a las acciones humanas como ingredientes que inciden en las manifestaciones más claras del agrietamiento.



CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA

Iztapalapa es una de las 16 demarcaciones territoriales de Ciudad de México. Con poco más de 116 km² de superficie, ésta encabeza la lista de las regiones más densamente pobladas del oriente de la capital mexicana (con 1 815 786 habitantes, incluso es la demarcación más poblada de todo el país, INEGI (2020)).

La Ciudad de México, enmarcada por la cuenca que lleva su nombre, tiene un contorno irregular alargado de norte a sur, de aproximadamente 125 km de largo y 75 km de ancho. Es una cuenca endorreica que se ubica en la porción centro – oriental de la Faja Volcánica Trans – Mexicana. Está rodeada por altas montañas, limitada al norte por las sierras de Pachuca, Tepotzotlan, Guadalupe, Patlachique y Tepozán; al sur por la sierra de Chichinautzin; al este por la sierra Nevada, con sus picos Iztaccíhuatl y Popocatepetl, con una altura media de 5,300 m; al oeste por la sierra de Monte Alto y de las Cruces (Figura 1) (Díaz-Rodríguez, 2006; Carreón et al., 2012).

La base de la Cuenca del Valle de México está formada por depósitos marinos del Mesozoico superior, a profundidades que oscilan entre los 1500 y 3000 m. Son calizas y lutitas del Cretácico Superior intensamente plegadas. Al Norte de la Cuenca las elevaciones obedecen a pliegues laramílicos, mientras que las del Sur obedecen a anticlinales formados en el Terciario inferior, por empujes de la masa Xolapa (Mooser, 2018).

Sobre el basamento marino fueron acumulándose, desde la emersión de la masa continental a principios del Terciario hasta la actualidad, productos del vulcanismo que consiste en lavas, tobas, cenizas, brechas, lahares, depósitos fluviales y aluviales, paleosuelos y arcillas lacustres con espesores de 1,500 a 3000 m (Díaz-Rodríguez, 2006; Mooser, 2018).

La parte sur-central de la Cuenca de México es una llanura lacustre plana, otrora, cubierta por lagos someros y pantanos, a la que frecuentemente se le denomina Valle de México. Contiene varios lagos someros, de los cuales, el de Texcoco es el mayor. Le sigue en extensión la laguna de Zumpango, al noroeste, mientras que el lago de Chalco, tercero en importancia, se extinguió por completo a principios del siglo XX. La Alcaldía se sitúa en la porción sur del vaso del lago de Texcoco.

II.1 Breve descripción geológica del Valle de México

La estructura geológica regional de la Cuenca de México ha sido estudiada por un gran número de investigadores entre los que destacan los trabajos de Zeeavert (1953), Marsal y Mazari (1959), Mooser (1974, 1975) y De Cserna et al. (1987). La Cuenca se encuentra compuesta básicamente de rocas volcánicas y sedimentos de tipo lacustre. El abrupto relieve de las montañas que rodean a la Cuenca alcanza altitudes que sobrepasan los 5,000 msnm y están formadas principalmente por riolitas, dacitas, andesitas y traquitas generalmente cubiertas por basaltos. La Ciudad de México cubre un área aproximada de 9,600 km², tiene una altitud promedio de 2,240 msnm, y se ubica sobre una planicie lacustre rellena de materiales de origen fluviolacustre y volcánicos derivados de las montañas, así como por enormes masas de cenizas de volcanes más recientes (Carreón, 2011; 2012).

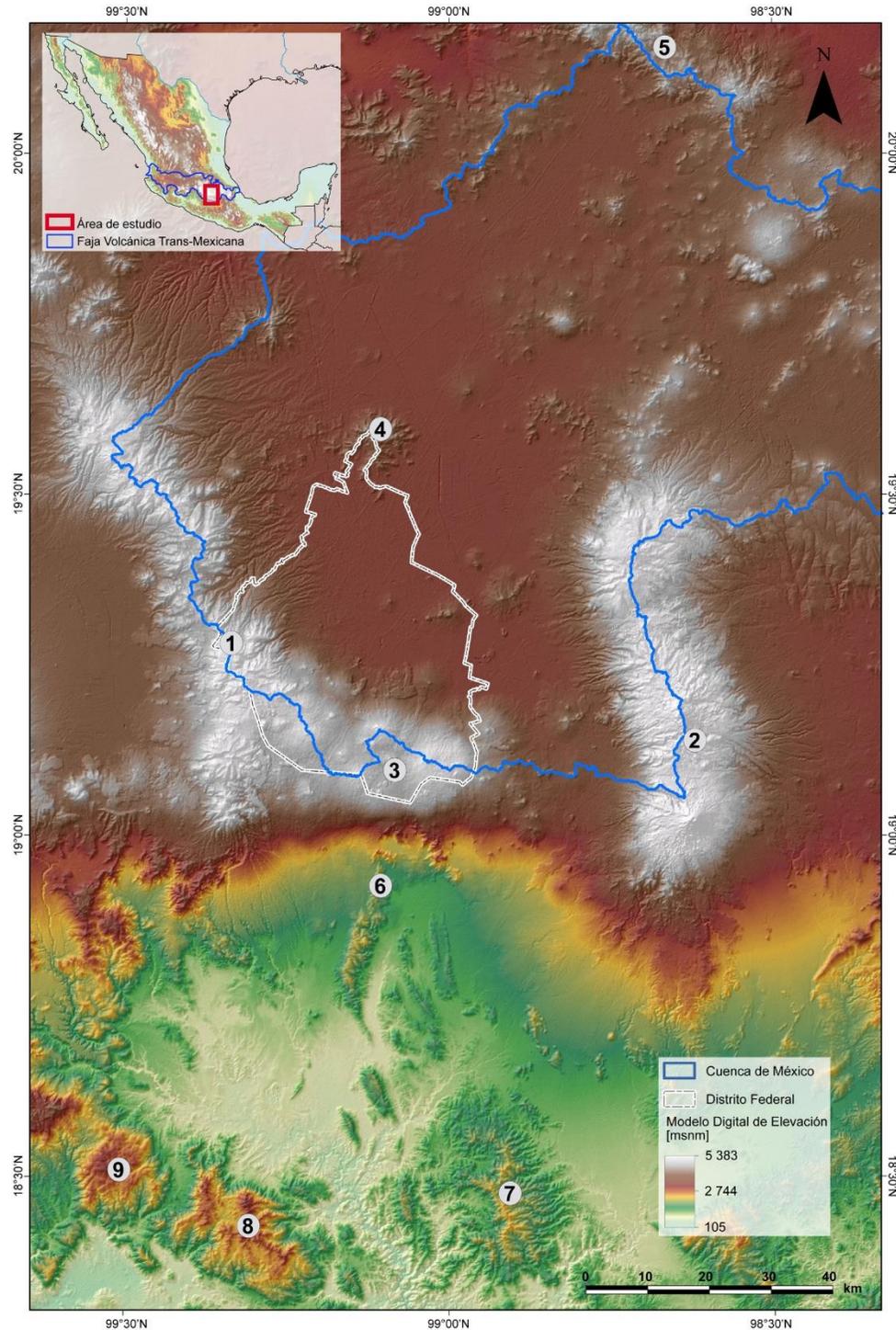


Figura 1. Modelo de elevación digital en el que se indican los contornos del sector sur de la Cuenca de México y de la Ciudad de México, así como las sierras que limitan a estas últimas: (1) Sierra de las Cruces, (2) Sierra Nevada, (3) Sierra de Chichinautzin; (4) Sierra de Guadalupe; (5) Sierra de Pachuca. En la porción sur del mapa se muestran las regiones de (6) Tepoztlán, Morelos, en donde se encuentran expuestos los primeros episodios volcánicos de la Faja Volcánica Trans-Mexicana en su sector centro-oriental y los campos volcánicos de la Sierra Madre del Sur: (7) Huatla, Morelos, (8) la caldera de Tilzapotla y (9) Taxco, Guerrero. (Obtenido de González Torres et al., 2015)



Algunas de las características de las sierras de origen volcánico que delimitan a la Cuenca de México son las siguientes (González Torres et al., 2015):

- La Sierra de las Cruces (límite occidental) tiene una longitud de 110 km, y un ancho variable entre 47 km en su parte norte y 27 km en su parte sur; sus edades varían entre 3.7 y 0.7 Ma, por lo que es la sierra más antigua en la Cuenca de México.
- En el campo volcánico Chichinautzin (límite meridional), las edades más antiguas varían entre 1.2 y 0.9 Ma en su porción oeste y sur, y son menores de 0.04 Ma en su mayor parte.
- La Sierra Nevada (límite oriental) tiene una longitud de 45 km y una altura máxima de 5454 msnm en el volcán Popocatepetl; sus edades varían de 1.8 Ma al actual.

La estratigrafía (a escala regional) del subsuelo de la Cuenca de México se ha integrado a partir de la información de varios pozos profundos y ha sido descrita en diferentes estudios (de Cserna et al., 1988; Pérez-Cruz, 1988; Enciso-De la Vega, 1992; Arce et al., 2013a, 2015). La base está constituida por la Formación Morelos del Cretácico inferior y por depósitos de conglomerados calcáreos y anhidritas similares al Grupo Balsas. El relleno está formado por depósitos lacustres en la cima y productos volcánicos. Estos últimos incluyen derrames de lavas de composición variable desde basalto a dacita (con dominancia de andesitas), depósitos piroclásticos de tobas e ignimbritas y una amplia variedad de materiales volcánoclasticos con edades que varían desde el Oligoceno hasta el Cuaternario (Schlaepfer, 1968; Mooser, 1975; de Cserna et al., 1988; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Enciso-De la Vega, 1992; Pérez-Cruz, 1998; Arce et al., 2013a; González Torres et al., 2015).

Los seis pozos profundos perforados en la Cuenca de México cubren un rango de profundidad que alcanza desde 2008 a 3200 m (Figura 2) (Oviedo de León, 1970; PEMEX, 1987a, b, c en Pérez-Cruz, 1988; Arce et al., 2013a, 2015). El mayor espesor litológico perforado en la Cuenca de México (3200 m) se obtuvo a partir del pozo Roma-1, que, sin embargo, no logró alcanzar el basamento de calizas; en cambio, el pozo Mixhuca-1 corta las calizas a aproximadamente 1600 m de profundidad. Se han realizado fechamientos isotópicos en todos ellos (González Torres et al., 2015).

De acuerdo con Pérez-Cruz (1988), el relleno de la cuenca está conformado por cuatro unidades, que de la base a la cima son:

- a. Calizas del Cretácico que constituyen el basamento.
- b. Unidad Volcánica Inferior (UVI), constituida por productos volcánicos efusivos y piroclásticos.
- c. Unidad Volcánica Superior (UVS), constituida esencialmente por rocas piroclásticas, con una menor proporción de rocas efusivas.
- d. Unidad de depósitos lacustres y fluviales representados por arcillas, limos y arenas.

La Unidad Volcánica Inferior se relaciona con la provincia ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental; mientras que la Unidad Volcánica Superior corresponde a las rocas de la Faja Volcánica Trans – Mexicana.

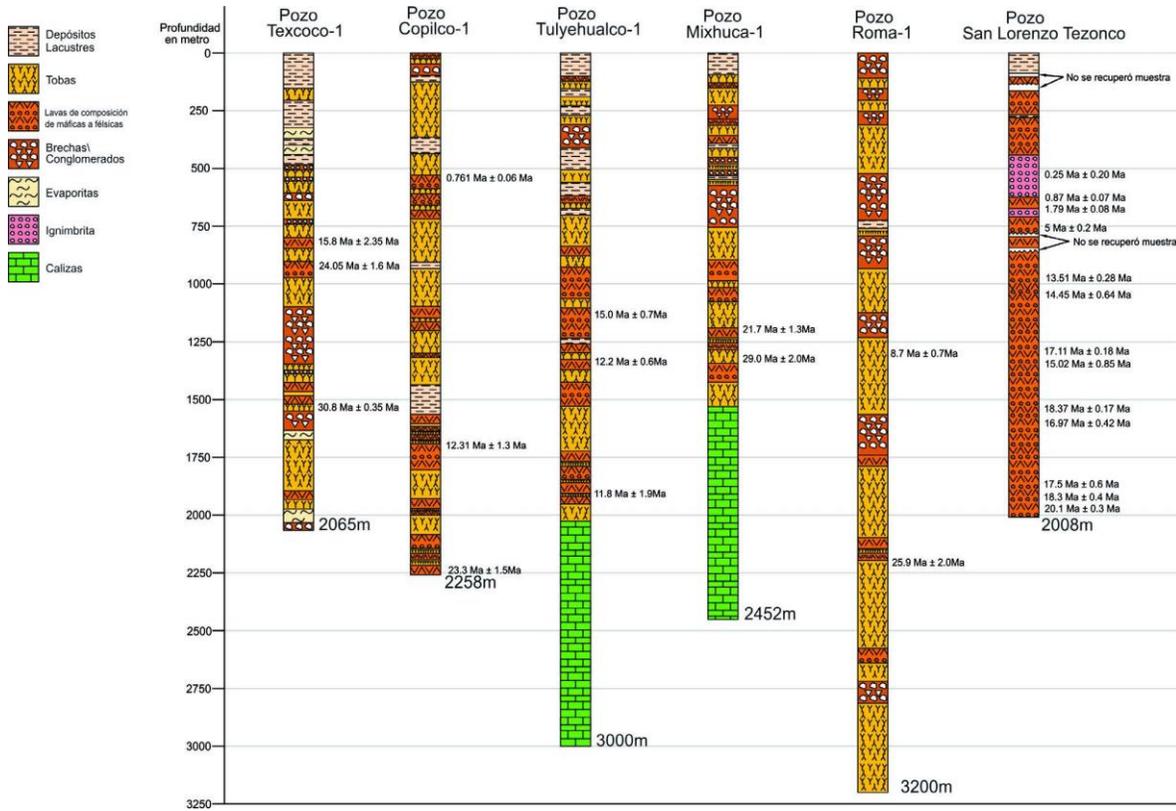


Figura 2. Columnas estratigráficas de los de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México, en donde se muestran las edades obtenidas para cada uno de ellos. (Obtenido de González Torres et al., 2015)

La Cuenca del Valle de México era una cuenca exorreica con drenaje hacia el sur. El área donde se ubica la Ciudad de México hace un millón de años correspondía a un valle, en cuyo fondo, el río que fluía drenaba la región de la Sierra de Pachuca hacia el sur, hacia la cuenca hidrográfica del antiguo Río Amacuzac (Osorio-Tafall, 1946; Fries, 1960; Mooser, 1975). Las laderas de este valle deben haber tenido una topografía escalonada, comparable a la que hoy se observa en las cercanías de Tepoztlán, Morelos. Con la formación de una presa natural volcánica, que es la Sierra de Chichinautzin, el valle paulatinamente quedó cerrado hacia el sur hace unos 700,000 años (Mooser, 1975), o quizá menos. Frente a esa presa, en el norte, comenzó a formarse un vaso que fue azolvándose, tanto por los aportes en suspensión desde el norte por el antiguo río principal, como por sus afluentes desde el poniente y el oriente (de Cserna et al., 1988). Este vaso se rellenó con la formación de abanicos aluviales coalescentes, depósitos de tefra y lacustres. Todos estos productos sedimentarios pudieran estar localmente cubiertos o interdigitados con productos volcánicos, principalmente de composición andesítico – basáltica, que se formaron por la actividad de centros eruptivos locales, algunos de los cuales hoy están sepultados.

Esta secuencia de relleno, que incluye tanto material aluvial como lacustre varía en espesor debido a la configuración irregular del terreno que cubrió, pero, en términos generales, aumenta en espesor desde el norte hasta el sur. Según los cálculos hechos con base en el perfil hidráulico del antiguo río entre la región de Pachuca, Hidalgo y Tepoztlán, Morelos, y si no hubiera habido fallamiento y hundimiento de bloques relacionados, en la parte meridional de la Cuenca de México el espesor del

relleno debería ser cercano a los 600 m (de Cserna, et al., 1988). En la Figura 3, se muestra el modelo geológico de la Cuenca de México.

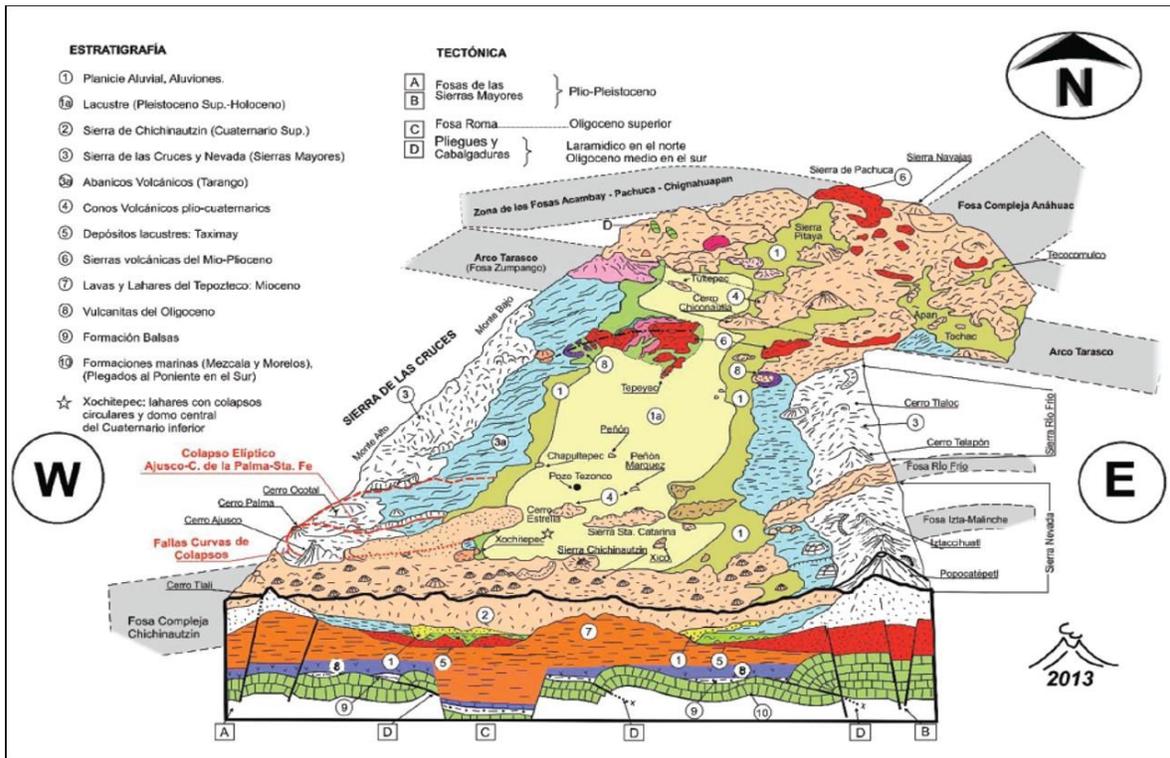


Figura 3. Modelo geológico de la Cuenca de México. (Obtenida de Mooser, 2018)

II.II Geología de la Alcaldía Iztapalapa

La fisiografía de la Alcaldía de Iztapalapa está dominada por un valle y algunas montañas aisladas. El relieve en su mayor parte corresponde al valle que proporciona las superficies planas óptimas para el desarrollo de asentamientos humanos. También se encuentran ciertas irregularidades aisladas que corresponden a las elevaciones más importantes del área: la Sierra de Santa Catarina, el Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella (Figura 5).

La geología de la Alcaldía Iztapalapa se puede comprender mejor gracias al Pozo San Lorenzo Tezonco ($19^{\circ} 22' 44.27''$ N y $99^{\circ} 5' 5.25''$ O), que fue perforado en el 2012 por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) alcanzando una profundidad de 2008 metros.

El pozo San Lorenzo Tezonco se ubica en la parte sur de la Cuenca de México, a pocos kilómetros al NO de las estructuras volcánicas monogenéticas: Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués. Hacia la parte sur, a 15 km del pozo, inicia el Campo Volcánico Chichinautzin, constituido por una serie de derrames de lava y conos monogenéticos; mientras que, hacia la parte oeste, a 25 km se localiza parte de la Sierra de las Cruces (Arce et al., 2015).

El muestreo en el pozo San Lorenzo Tezonco se realizó a cada 2 metros, pero sin recuperación de núcleos, por lo que la estratigrafía que se ha obtenido de éste es general (sólo fue posible determinar cambios litológicos a escala Métrica) (Arce et al., 2013a). La edad más antigua en este



pozo fue de 18 Ma y corresponde a una profundidad de 1550 m. En la figura 4, se observa el perfil estratigráfico del pozo, donde se muestra la edad de cada paquete y la formación a la que pertenece.

Arce y sus colaboradores (2013a) propusieron que el Pozo San Lorenzo Tezonco se ubica en una estructura de graben orientado en dirección E-O y coincide con la orientación de la Sierra de Santa Catarina, conformada por seis volcanes monogenéticos.

Con los fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y la composición química de muestras superficiales se dividió la estratigrafía del pozo en los siguientes paquetes:

1. Lacustre (0 - 70 metros)
2. Santa Catarina y Cerro de la Estrella (71 - 580 metros)
3. Sierra de las Cruces (581 - 875 metros)
4. Formación Tepoztlán (876 - 2008 metros)

El paquete Lacustre consta de depósitos epiclásticos (arenas, limos y arcillas) y en algunos niveles se observaron conchas de ostrácodos. El espesor de los depósitos lacustres es variable, en el área de Texcoco se han reportado espesores de 80 m, con una edad máxima probable de 220 mil años (Lozano-García, 1989) y recientemente se han reportado espesores de hasta 122 metros con edades preliminares de 220 mil años, en la zona de Chalco (Brown et al., 2012; Arce et al., 2015).

El paquete Santa Catarina y Cerro de la Estrella consiste en dos tipos de lava, ambos de color gris oscuro, de composición andesítico-basáltica y andesítica, con pocos fenocristales de plagioclasa, piroxeno y en menor proporción, olivino, cuya edad no muy precisa, es de menos de 0.25 Ma, correlacionado con productos del Campo Volcánico Chichinautzin (Arce et al., 2013a). Se plantea que estas lavas podrían pertenecer a productos de la Sierra de Santa Catarina y Cerro de la Estrella, con base en: 1) la cercanía de entre 4 y 7 km con respecto al Pozo San Lorenzo Tezonco; 2) La composición química; y 3) la edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muy joven sugerida para Santa Catarina (probablemente del Holoceno) (Arce et al., 2015; Brown et al., 2012).

El paquete Sierra de las Cruces consiste en lavas de color gris claro, de textura porfídica con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y piroxeno (lava dacítica), con edades entre 0.9 y 1.8 Ma correlacionada con productos de la Sierra de las Cruces, ubicada al occidente de la Cuenca de México. Para este paquete también se tiene una secuencia de depósitos de ignimbrita, parcialmente alterada a arcilla, con abundantes cristales de plagioclasa, anfíbol, cuarzo y en menor proporción piroxeno, que corresponde a una composición riolítica y fechada en 5 Ma y abarca las profundidades de 760 a 875 metros (Arce et al., 2013a; 2015).

Con base en los nuevos fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se propone un último paquete de rocas correlacionado con la Formación Tepoztlán, que abarca desde los 875 metros hasta el final del pozo (2008 metros de profundidad). Este paquete consiste en una secuencia de lavas y en menor cantidad depósitos piroclásticos, de composición diversa, de andesita basáltica, andesita, dacita y riolita, similar a rocas descritas para la Formación Tepoztlán, la cual aflora aproximadamente a 40 km al sur del pozo San Lorenzo Tezonco, en la localidad de Tepoztlán, Morelos, con edades entre 11 y 22.8 Ma (Arce et al., 2013a; 2015). En la Figura 5, se observa la localización del Pozo San Lorenzo Tezonco, así como de Tepoztlán, Morelos, donde aflora la Formación Tepoztlán.

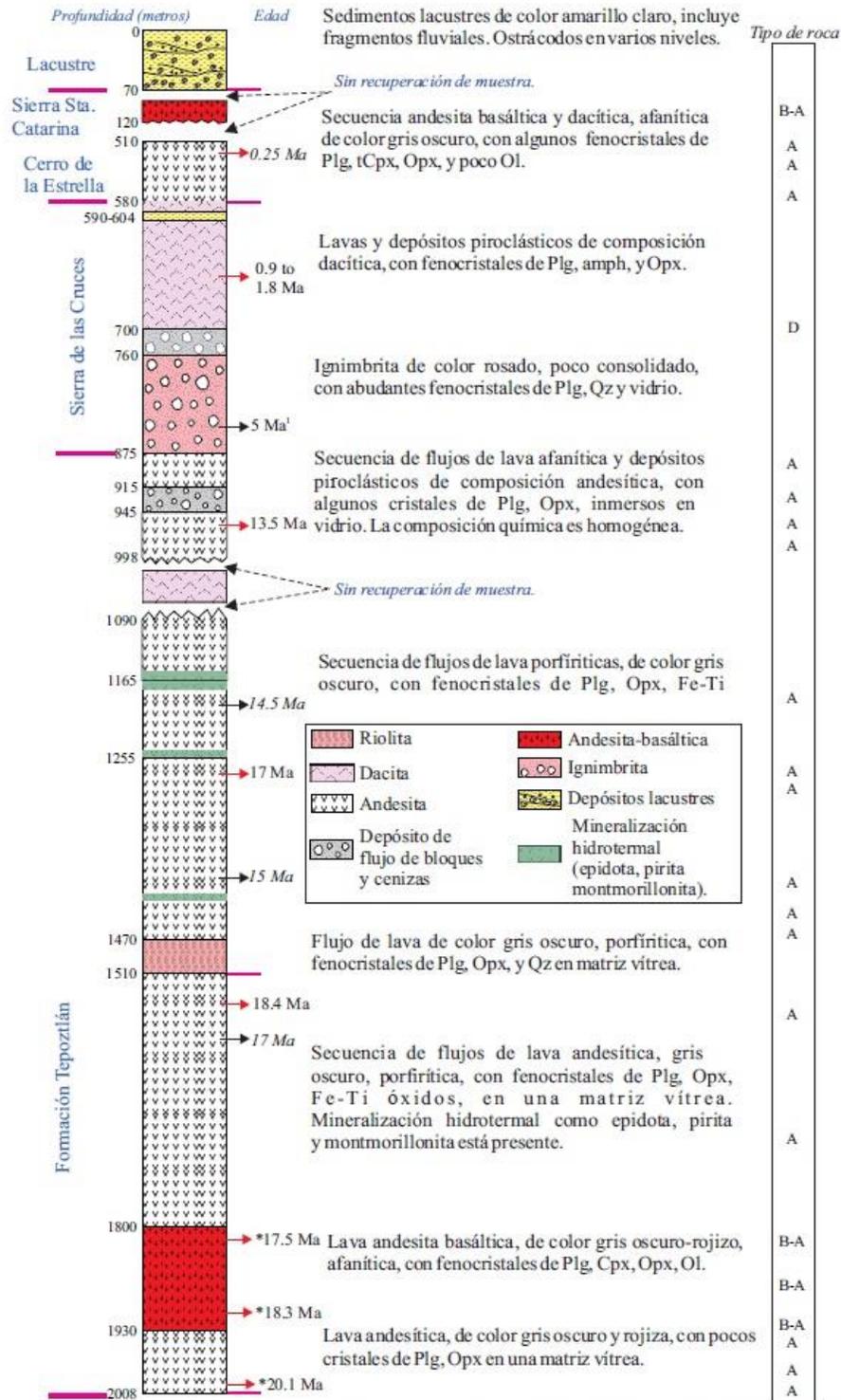


Figura 4. Columna estratigráfica del pozo profundo San Lorenzo Tezonco. (Obtenida de Arce et al., 2015)

Hacia la superficie, la geología de la Alcaldía Iztapalapa corresponde al valle lacustre, pie de monte y estructuras volcánicas (Figura 6). Los materiales que constituyen el subsuelo de Iztapalapa corresponden a una intercalación de productos volcánicos tales como lavas, tobas y cenizas, que incluyen materiales granulares transportados por río y arroyos provenientes de las partes

topográficamente altas, y que fueron arrastrados hacia los valles. Cubriendo a dichos materiales y en espesores variables, se encuentran arcillas y arenas finas que son el producto del sedimento de los antiguos lagos (Delegación Iztapalapa, 2011).



Figura 5. Ubicación del Pozo San Lorenzo Tezonco y del Parque Nacional El Tepozteco. Elaboración propia, obtenida de Google Earth.

II.III Geomorfología de la Alcaldía Iztapalapa

Desde el punto de vista morfológico, la Alcaldía Iztapalapa presenta una superficie relativamente plana, que ocupa aproximadamente el 81% situada a una elevación de 2241 msnm (Delegación Iztapalapa, 2011). Tiene un espesor de sedimentos de aproximadamente 700 m, y se considera fueron acarreados por los cauces que descendían de las sierras existentes, como Xochitepec y Nevada. La planicie es interrumpida por las elevaciones volcánicas, cerros de la Estrella, El Peñón del Marqués y al este, la Sierra de Santa Catarina (Figura 6).

El Cerro Peñón del Marqués, es un volcán cinerítico situado en la parte norte de la Alcaldía, tiene una elevación máxima de 2370 msnm, su cima tiene 132 m sobre el nivel de la planicie, litológicamente está constituido por lavas y piroclastos, ambos de composición básica. Los piroclastos se observan afectados por numerosas grietas, originadas por la combinación de movimientos tectónicos y explotación del agua subterránea (Huízar, 1998). Su topografía es de laderas cortas y muy inclinadas, son típicas de un cono cinerítico y no presenta modelado fluvial.

El Cerro de la Estrella, tiene una elevación de 2450 msnm, su cima se encuentra a 214 m sobre la planicie, está constituido por lavas basálticas cubiertas por piroclastos y tobas. Tiene una topografía relativamente suave, sus laderas son menos inclinadas que las del Peñón del Marqués, y están



parcialmente cubiertas por una carpeta vegetal de árboles (pirul) y pastos, el modelado fluvial es incipiente (Huizar, 1998; Delegación Iztapalapa, 2011).

El Cerro la Caldera, situado al noreste de la delegación, tiene una elevación de 2350 msnm, es un volcán constituido por lapilli, presenta dos cráteres freatomagmáticos tipo caldera, y constituye la parte terminal oriental de la Sierra Santa Catarina. Sus laderas son cortas y rectas, presentando muy poco modelado fluvial. Salvo una ligera cubierta de pasto, prácticamente carece de vegetación. El cerro tiene dos cráteres en cuyo interior se práctica la agricultura, asimismo, en su ladera sudeste se ubica el relleno sanitario del mismo nombre (Delegación Iztapalapa, 2011).

El relieve más sobresaliente en esta zona es la Sierra Santa Catarina, que tiene una extensión de 12 km y su orientación es SE-NE, tiene una elevación de 2750 msnm, y la cima está a 510 m sobre la planicie. Está constituida por rocas basálticas que se alternan con material piroclástico (escoria, tezontle). En esta sierra existen siete volcanes principales (Yahualixqui, Xaltepec, Tetecón, Mazatepec, Tecuatzi, Guadalupe y La Caldera). El volcán Guadalupe es el más alto y reciente de todos (Figura 5) (Delegación Iztapalapa, 2011).

Debido a la aspereza de los derrames de lava que constituyen sus laderas, la Sierra Santa Catarina es muy irregular y de suaves pendientes, y no presenta rasgos importantes de modelado fluvial. Presenta relieve de origen endógeno y exógeno; el endógeno es de tipo volcánico acumulativo y el exógeno es de tipo erosivo acumulativo y antrópico (Lugo et al., 1994). Este último se debe a la extracción de material aprovechado para la construcción. La zona presenta una serie de 11 conos cineríticos bien conservados, de los cuales, tres han sido intensamente explotados como banco de material, como es el caso del volcán Yahualixqui. Los asentamientos humanos han proliferado ocupando prácticamente toda la ladera occidental.

De acuerdo con el Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa (2011), existen cinco unidades morfogénicas:

- **Laderas montañosas:** Representadas por la Sierra de Santa Catarina y el cerro de la Estrella. Presentan un origen endógeno volcánico, del Terciario Superior- Cuaternario (0-5 m.a.). Se encuentran formadas principalmente de conos volcánicos y derrames de lava. Presentan rocas básicas e intermedias, lavas andesíticas, dacíticas, riódacíticas y tobas, con material piroclástico de flujo y de caída (De Cserna et al., 1987, Mooser et al., 1996). Presenta superficies cumbresales redondeadas, con una altitud media de 2450 a 2750 msnm; y una altura relativa dominante de 510m.
- **Lomeríos:** Los cerros Peñón del Marqués y Yuhualixqui constituyen esta unidad. Son de origen endógeno volcánico modelado (tectónizado y denudatorio) del Cuaternario (0-2 Ma). Su litología dominante es de tobas, cenizas y depósitos piroclásticos de flujo y de caída. Están compuestos de rocas basálticas y basáltico-andesitas (De Cserna et al., 1987, Mooser et al., 1996). Se caracterizan por presentar estructuras disyuntivas generadas por movimientos tectónicos actuales (fallas) (Tapia Vareya y López Blanco, 2002). Presentan una altitud media 2350 a 2370 msnm, y una altura relativa de 132 y 214 m.
- **Planicie lacustre:** Su origen es exógeno acumulativo del Cuaternario (0-2 m.a.). Está compuesta de sedimentos lacustres que provienen del acarreo que produce el agua de los cauces de montaña, desde los depósitos piroclásticos de explosiones recientes de los volcanes Cuaternarios de los alrededores (Tapia Vareya y López Blanco, 2002). Esta unidad

presenta una altitud media de 2241m, y ocupa el mayor porcentaje del terreno de la Delegación.

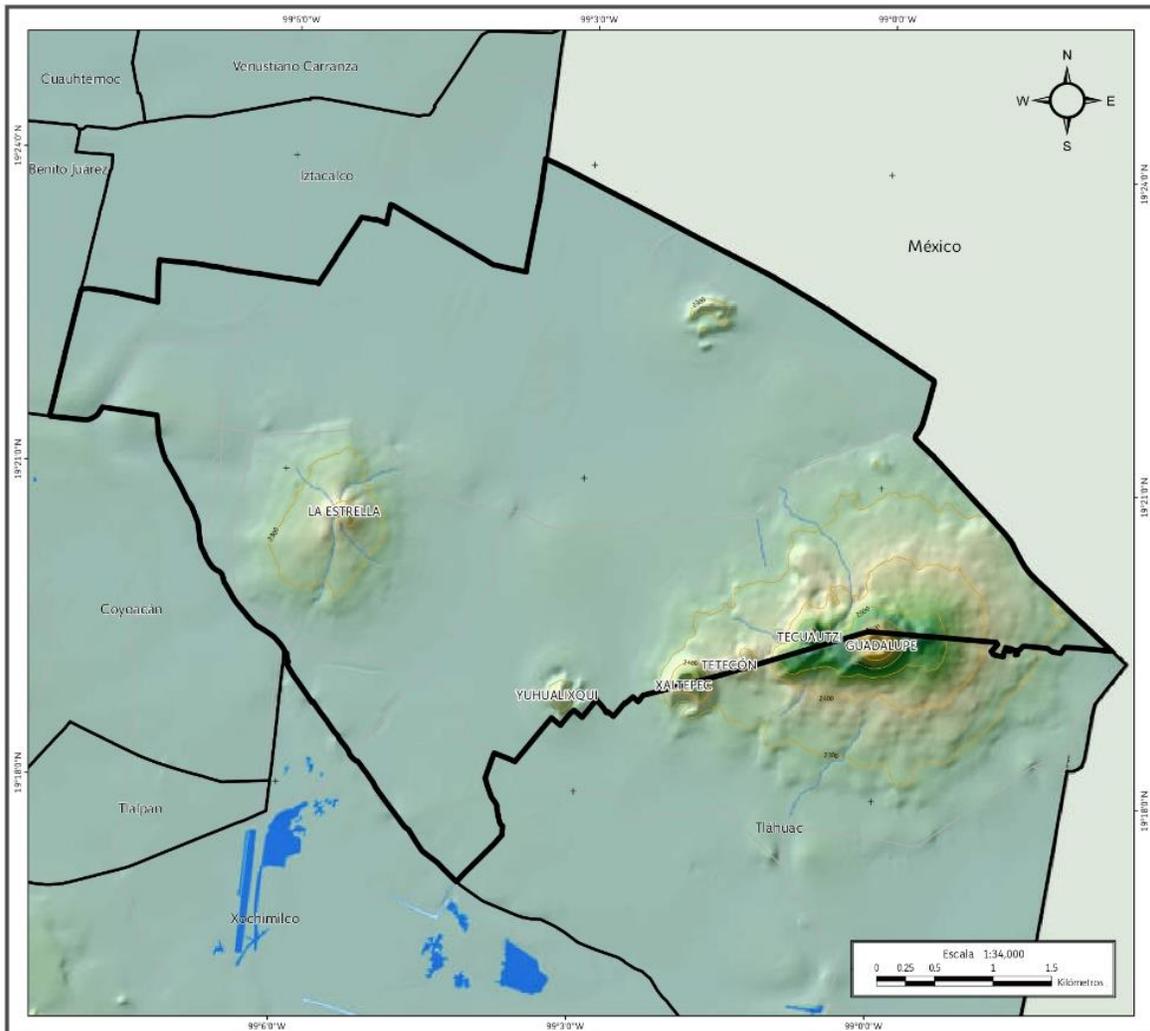


Figura 6. Principales elevaciones de la Alcaldía Iztapalapa (Obtenido de Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa, México, D.F., 2011)

- **Pie de monte:** Se encuentra en las laderas de la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella, Cerro la Caldera y Peñón del Marqués. Presenta un origen exógeno acumulativo (denudatorio y tectonizado) del Cuaternario (0-2 m.a.) (Tapia Vareya y López Blanco, 2002) compuesto de lavas, tobas, cenizas y depósitos epiclásticos y piroclásticos de flujo. Algunos presentan forma de abanico con una composición de basalto y basalto-andesítica (De Cserna et al., 1987; Mooser et al., 1996). También se caracterizan por presentar tectonismo activo que se manifiesta por la presencia de fallas.
- **Planicie aluvial:** Esta unidad se localiza en los alrededores del Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina. Es de origen exógeno acumulativo del Cuaternario (0-2 m.a.). Formado de material acumulativo aluvial y por otros depósitos de ladera, originados por procesos gravitacionales y fluviales. Asimismo, algunas de ellas se caracterizan por estar formadas

por depósitos de lahar retrabajados, y por secuencias piroclásticas de caída y de flujo, asimismo de tobas eólicas y brechas de pómez (Tapia Vareya y López Blanco, 2002).

II.IV Hidrología de la Alcaldía Iztapalapa

El relieve que rodea la planicie de la Cuenca de México impide que los escurrimientos superficiales que descienden de las partes altas fluyan fuera de la cuenca, originando así una cuenca endorreica (cerrada) que determinó la existencia de lagos como el de Texcoco y el de Tenochtitlán (en algún momento fusionados en uno sólo). El primero contenía agua salobre, mientras que el segundo era de agua dulce. La mayor parte del área de Iztapalapa formó parte del Lago de Texcoco y una mínima parte era inundada con agua dulce (Huizar, 1998).

Iztapalapa fue una región con grandes extensiones de agua. En sus inicios, la Alcaldía era atravesada por el Río Churubusco, que al unirse con el Río de la Piedad formaban el Río Unido. También la cruzaba el Canal Nacional, actualmente Calzada de la Viga, donde se recolectaban las aguas de los canales de Chalco, Tezontle, Del Moral y el de Garay para desembocar en el Canal del Desagüe. A pesar de ello, en la actualidad no existen depósitos naturales de agua debido a la pavimentación urbana que ha tenido la Alcaldía (Figura 7) (Ramírez y Rodríguez, 2002).

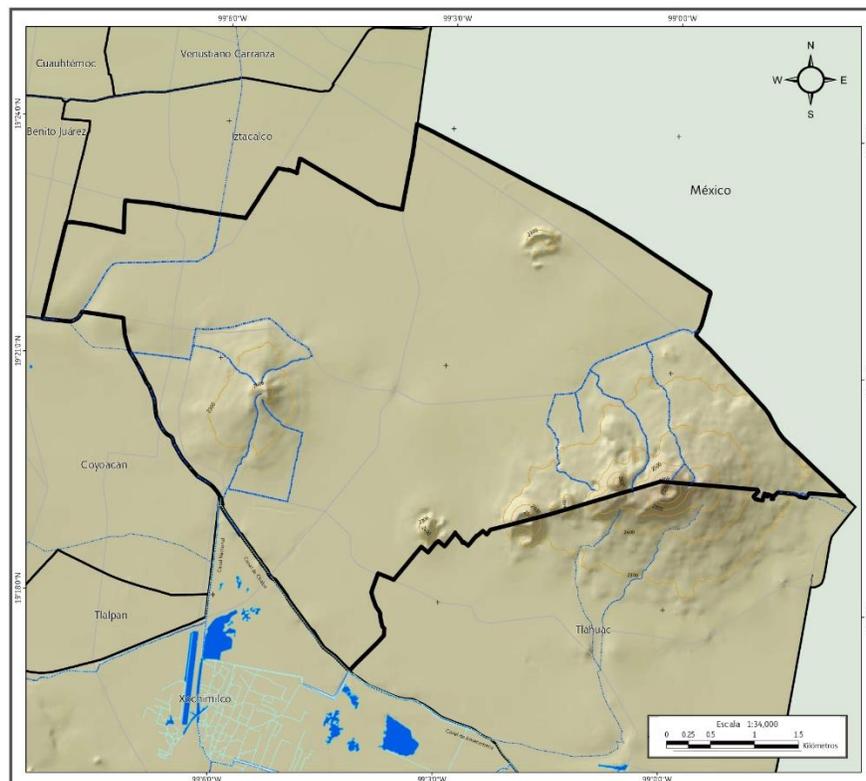


Figura 7. Mapa hidrológico de Iztapalapa (Obtenido de Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa, México, D.F., 2011)



CAPÍTULO III. CONTEXTO GEOTÉCNICO DE LA ALCALDÍA IZTAPALAPA

En el capítulo anterior, se habló sobre el contexto geológico de la Alcaldía Iztapalapa con el fin de exponer los antecedentes que dieron origen a la actual topografía y orografía de la zona. Asimismo, conocer la historia geológica permite tener una mejor comprensión de los posibles fenómenos geológicos que pueden afectar a la zona de estudio; tales como fallas geológicas, deslizamientos, actividad volcánica local, entre otras.

Además de la Geología, conocer la Hidrología y Geomorfología de una región permite analizar y generar un panorama integral para abordar, lo más correctamente posible, la formación y evolución de las capas más superficiales. Para los desarrollos de infraestructura civil son estos primeros metros (formaciones arcillosas) los que se estudian con mayor detenimiento, pues influyen sustancialmente en el comportamiento de las estructuras.

En este capítulo, sobre la descripción del suelo del Valle de México (particularmente la formación de los distintos horizontes que conforman el paquete lacustre) se analizarán las formaciones estratigráficas típicas de la zona de estudio (Alcaldía Iztapalapa, región sureste).

III.I Suelos del Valle de México.

Formación de suelos en el Valle de México.

Los lagos son cuerpos de agua que se forman en cuencas o depresiones donde el agua se almacena y cuya vida dura unos cuantos miles de años, limitada por las condiciones climáticas y geológicas de su entorno, desaparece a causa de la erosión y la paulatina acumulación del sedimento en el lecho lacustre. Los procesos de depósito que ocurren en los lagos son influenciados por condiciones climáticas y por una variedad de factores físicos, químicos y biológicos (Díaz-Rodríguez, 2006).

Los depósitos lacustres provienen principalmente de los ríos, los sedimentos se depositan a lo largo de la rívera, particularmente en la desembocadura de los ríos, donde se forman abanicos aluviales o deltas, que se extienden al interior del lago. Las gravas y arenas se depositan en las riberas, en tanto que los limos y arcillas alcanzan el centro del lago.

Los suelos del Valle de México corresponden a suelos lacustres, los cuales se formaron mediante procesos de erosión y transporte, seguido de depositación y consolidación bajo su propio peso. El comportamiento de estos suelos depende principalmente de dos factores: de su composición y de su estructura. Los suelos de la Ciudad de México son sedimentos heterogéneos, volcánicos, lacustres, con una proporción y variedad de microfósiles (ostrácodos y diatomeas) que adicionan compuestos solubles generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la microestructura del suelo influyendo fuertemente en su comportamiento (Díaz-Rodríguez et al. 1998; Díaz-Rodríguez, 2016).

Los procesos que favorecen la formación de arcillas son, en su mayor parte, secuenciales, por lo que la existencia de ciertos tipos de arcillas se restringe a ciertos intervalos de temperaturas y de tiempo. Las condiciones específicas de un ambiente lacustre están dadas por su salinidad, pH, tirante de agua, temperatura y tiempo de permanencia (drenaje). Estas condiciones pudieron variar en tiempos muy cortos en la cuenca y subcuencas lacustres del Valle de México debido a la coalescencia del depósito con actividad volcánica del tipo efusivo y explosivo (piroclástico) (Carreón et al., 2012).



En un suelo el término composición se refiere a la naturaleza de las partículas mismas: tamaño, forma y mineralogía. La mineralogía controla el tamaño, forma y particularidades de los componentes sólidos del suelo; éstos y su tipo de interacción con la fase líquida determinan la plasticidad, compresibilidad, resistencia y permeabilidad. Por lo tanto, la mineralogía es fundamental en la interpretación y comprensión de las propiedades de los suelos. Sin embargo, para las arcillas del Valle, los resultados de los estudios mineralógicos a menudo varían entre investigadores, debido a variaciones en los métodos de análisis, preparación de las muestras, entre otros factores (Díaz-Rodríguez, 2006). El subsuelo de la ciudad de México es un material singular donde el orden de abundancia de los minerales varía erráticamente, y resulta aventurado tratar de generalizar la proporción y variedad de los componentes con alguna precisión (Zeevaert, 1949; Marsal y Mazari, 1959; Lo, 1962; Mesri, Rokhsar y Bohor, 1975; Gómez-Looh, 1987; Peralta y Fabi, 1989; Díaz-Rodríguez, et al. 1998, 2006).

Una de las condiciones más importantes para los fines de la presente investigación es que existe una estrecha relación entre las condiciones mineralógicas de los materiales arcillosos y su capacidad de retención de agua, condiciones de consolidación y, por ende, su compresibilidad (Carreón et al., 2012).

En general, los componentes de los suelos se pueden clasificar en tres grupos (Díaz-Rodríguez et al., 1998):

- *Componente alóctona*, consiste en minerales detríticos, tales como la plagioclasa, hornblenda, hiperstena, cristobalita, vidrio volcánico, minerales de arcilla, ceniza volcánica y materia orgánica; todos estos componentes son resultado de la erosión de la cuenca.
- *Componente autóctona*, incluye precipitado de calcita bioquímica (valvas de ostrácodos y conchas de gastrópodos), sílice biogénica (frústulas de diatomeas), olitos, y materia orgánica.
- *Componente diagenética*, incluye componentes que se formaron de la alteración de vidrio volcánico o de la inestabilidad de otros componentes primarios después de su depositación (sílice, ópalo y minerales ferromagnesianos); se identifican ópalo-CT, cristobalita, goetita, calcita y pirita.

Por tanto, los suelos de la Ciudad de México son mezclas complejas de minerales cristalinos y no cristalinos que desafían una nomenclatura sencilla: son arcillas heterogéneas, volcánicas, lacustres, con una proporción y variedad de microorganismos que adicionan compuestos solubles, generados por la alteración de sus exoesqueletos y que forman parte de la estructura del suelo, así como materia orgánica residual (Díaz-Rodríguez, 2006).

Estratigrafía típica del Valle de México

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en su versión 2017, se clasifica geotécnicamente a la Ciudad de México en 3 zonas, con las siguientes características generales:

- a. Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados,

depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados.

- b. Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.
- c. Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son, en general, medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la figura 8 se muestra la ubicación de las 3 zonas geotécnicas de la Ciudad de México.

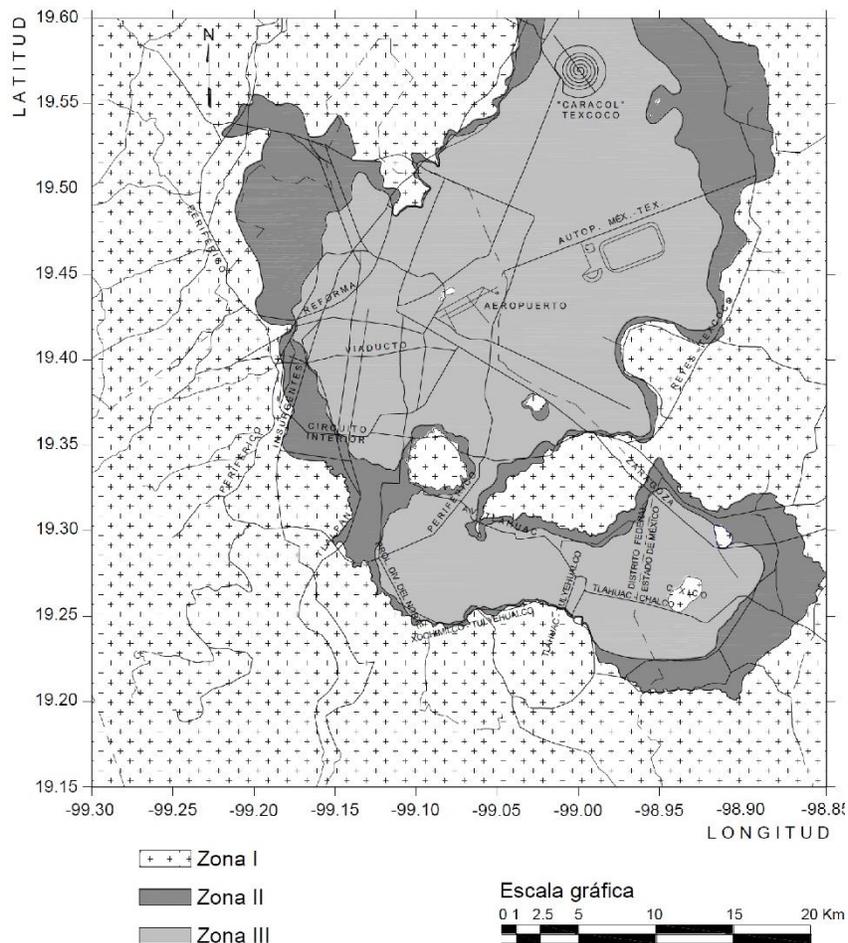


Figura 8. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Obtenido de NTC-Diseño y Construcción de Cimentaciones, 2017)

Díaz-Rodríguez et al. (1998), realizaron un estudio en el Parque Ramón López Velarde, ubicado en la Colonia Roma, Alcaldía Benito Juárez, Ciudad de México; la estratigrafía obtenida puede



considerarse típica de la zona lacustre (Zona III) de la Ciudad de México. Se identificaron seis zonas, las cuales se describen en orden ascendente, de 40 m de profundidad a la superficie del terreno. En la figura 9 se observa el perfil estratigráfico del pozo, donde se ubica cada zona, así como la descripción del tipo de suelo encontrado.

- **Zona 1: Arenas con grava (40 – 38 m).** Debido a la abundancia de fragmentos de roca volcánica en esta zona, los minerales predominantes son feldespato (50%) y hornblenda (24%). Es notoria la ausencia de calcita y materia orgánica. Granulométricamente esta zona está constituida por arena con grava con una matriz de limo, las partículas mayores alcanzan un tamaño de hasta 1.5 cm. En comparación con el resto de la columna estratigráfica, esta zona es de granulometría gruesa. El contenido de agua no supera el 25%, la resistencia a la compresión no confinada q_c es de 40 kg/cm² y la velocidad de propagación de ondas de corte V_s es de 110 m/s.
- **Zona 2: Arenas con grava y arenas limosas (38 – 36 m).** En esta zona los feldespatos tienen una relación inversa con la hornblenda. La cristobalita se incrementa rápidamente hasta 42%, sin embargo, la calcita y MO tienen cantidades despreciables. Los minerales de arcilla no varían apreciablemente (7%), el CIC exhibe su valor más bajo (20 mequiv./100 g). Granulométricamente la zona se caracteriza por una rápida transición de sedimentos gruesos a una textura de arenas limosas. El contenido de agua tiene un valor promedio de 100%, con un $q_c = 40 \text{ kg/cm}^2$ y una V_s de 100 m/s. Esta zona presenta un decrecimiento del pH de 8 a 6.3.
- **Zona 3: Limos arcillosos con arena (36 - 30 m).** Los minerales predominantes en esta zona son cristobalita y feldespato. La hornblenda es escasa, y la calcita empieza a aparecer hacia la parte superior de la zona. En la parte inferior de la zona, se infiere la existencia de dos paleosuelos, debido a la presencia de raíces, lo cual se refleja en los valores de MO. Granulométricamente, esta zona se clasifica como limo arcilloso con poca arena (excepcionalmente el contenido de arena alcanza un 50%). El valor del q_c varía de 15 a 22 kg/cm² y una V_s de 75 m/s.; el pH varía entre 4 y 6.2. Esta zona se interpreta como una transición entre condiciones de depósito subaéreas y condiciones incipientes de depósito lacustre.
- **Zona 4: Limos arcillosos o arcillas limosas (30-7 m).** Esta es la zona más importante desde el punto de vista de la geotecnia, principalmente debido a su alta compresibilidad ($m_v = 0.1 \text{ kg/cm}^2$). La calcita alcanza su máximo valor (32%) a la profundidad de 27 m. Granulométricamente, esta zona se clasifica como limo arcilloso o arcilla limosa, con poca arena. Se tienen varias lentes de arena interestratificadas, los horizontes S2 y S3 son los más importantes. El contenido de agua se incrementa con el decrecimiento de la profundidad, con un valor de aproximadamente 220% a 30 m y alcanzado un máximo de 420% a 7 m. Los promedios de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad son 338%, 80% y 308%, respectivamente. El q_c presenta un comportamiento aproximadamente lineal con la profundidad, y la V_s es casi constante con la profundidad, con un promedio de 81 m/s. La zona 4 representa un lapso en el cual las condiciones lacustres se establecieron claramente, esto apoyado por la evidente proliferación de diatomeas y ostrácodos en los sedimentos.
- **Zona 5: Limo arcilloso con arena (7-3 m).** En la base de esta zona se encuentra un horizonte de arena S4, el cual presenta el mayor contenido de arena (85%) de todo el perfil. Los minerales identificados son hornblenda, feldespato y cristobalita en concentraciones

similares a la parte superior de la zona 4. La calcita y MO muestra un decrecimiento, en tanto que los minerales de arcilla incrementan su concentración de 1 a 14%. El CIC decrece logrando un valor estable entre 40 y 50 mequiv/100 g. La granulometría de esta zona corresponde a una arena, con variaciones a limo arenoso y limo arcilloso. El valor del q_c es de aproximadamente 24 kg/cm^2 , el contenido de agua exhibe una tendencia a decrecer.

- **Zona 6: relleno artificial (3-0 m).** Esta zona 6 es un relleno artificial, producto de la actividad humana.

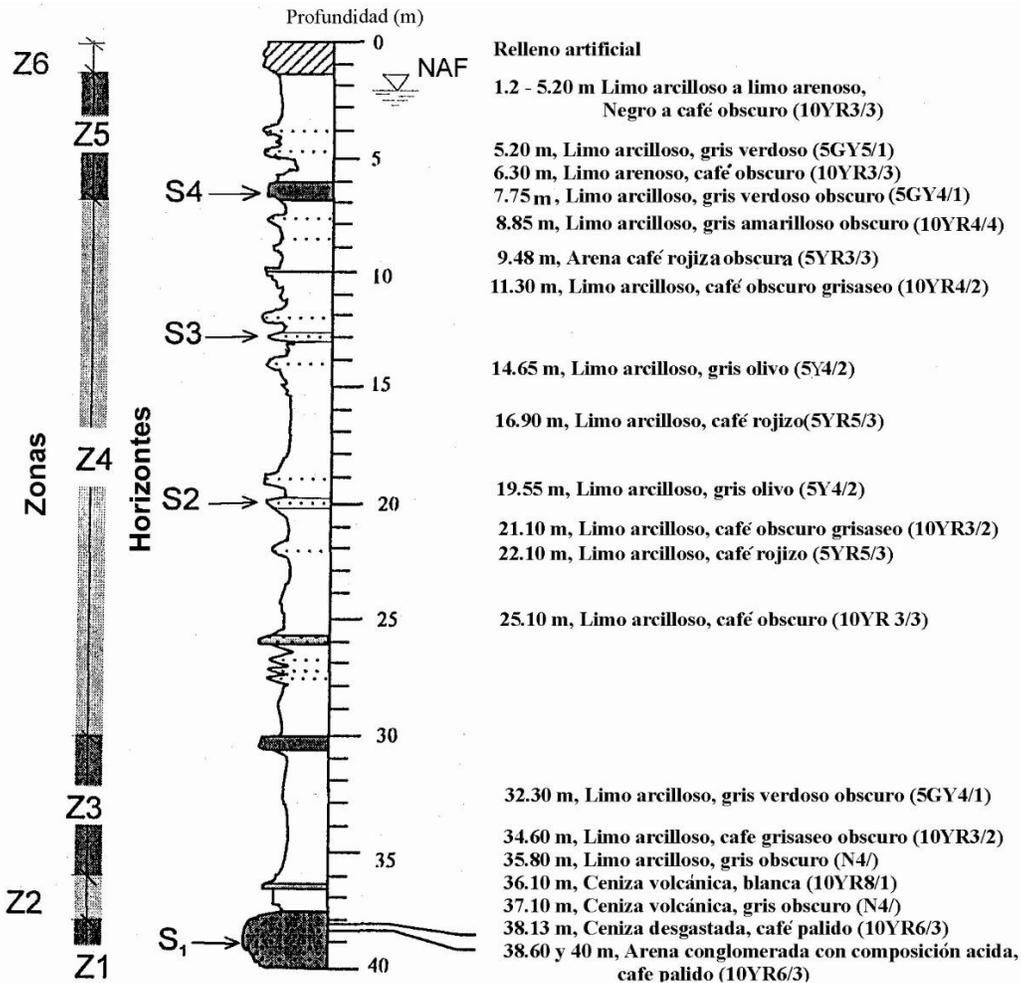


Figura 9. Columna estratigráfica del Parque Ramón López Velarde en la colonia Roma, Ciudad de México (Obtenido de Díaz-Rodríguez, 2006).

Comportamiento de los suelos del Valle de México

Los suelos lacustres de la ciudad de México han sido fuente de muchos problemas serios de ingeniería. Los tres principales problemas a los que se enfrentan los ingenieros durante el diseño y construcción de edificaciones y cimentaciones son:

- Las propiedades singulares de los sedimentos lacustres.
- El hundimiento regional.
- La alta sismicidad.

El hundimiento de la ciudad de México se descubrió desde 1891, mediante mediciones se encontró que la velocidad del hundimiento variaba entre 3 a 5 cm/año. En 1947 las velocidades habían aumentado de 15 a 30 cm/año, y actualmente se tiene una velocidad de 5 a 7 cm/año. En muchos lugares de la ciudad de México se tienen fuertes asentamientos de la superficie del terreno, lo que provoca fisuras y grietas (Díaz-Rodríguez, 2006).

Ovando-Shelly et al. (2013), analizan cómo afecta el hundimiento regional al comportamiento de los suelos lacustres de la Ciudad de México. Establecen un corte estratigráfico típico de la Zona III en el sentido Norte-Sur, donde muestran el perfil de 4 sondeos con piezocono (Figura 10) y se observa la resistencia a la penetración típica de la estratigrafía de esta zona.

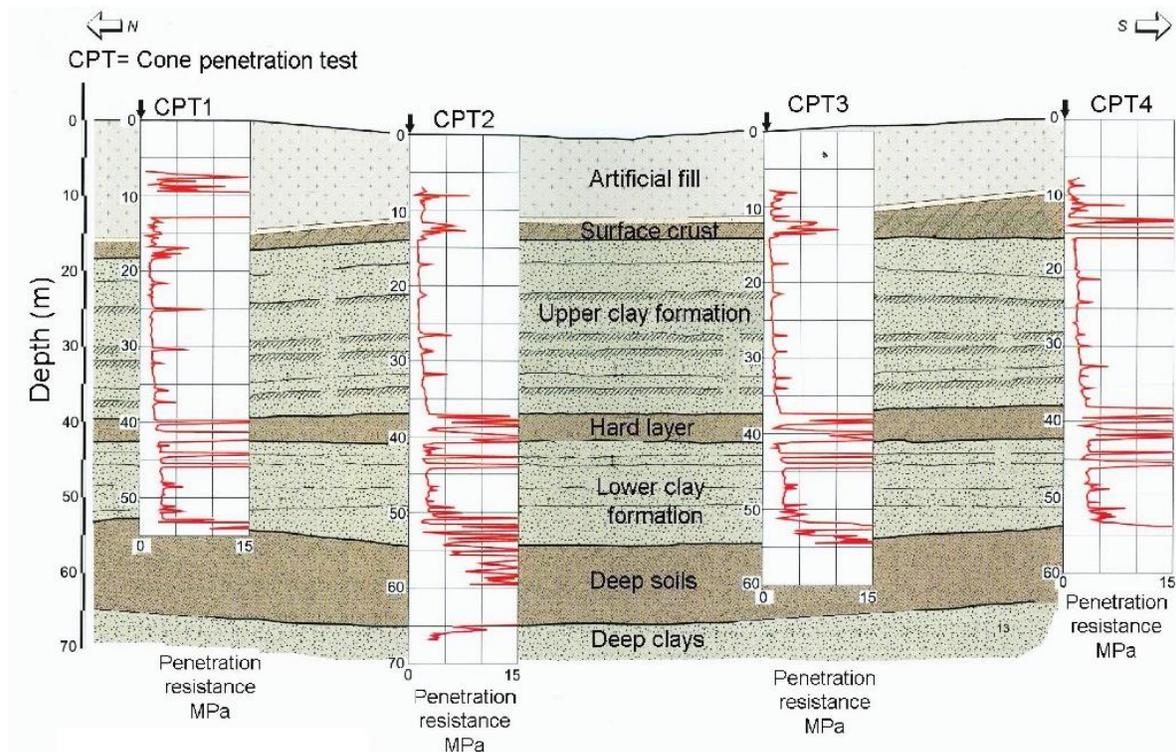


Figura 10. Corte estratigráfico en el sentido Norte-Sur, donde se muestra la estratigrafía típica de la Zona III y la resistencia a la penetración (Obtenido de Ovando-Shelly, et al., 2013).

Asimismo, Ovando-Shelly et al., (2013), hacen una comparación de dos sondeos de piezocono realizados en el mismo sitio tras un periodo de 14 años de diferencia, para mostrar cómo afecta el hundimiento regional las propiedades mecánicas de los sedimentos lacustres; en la Figura 11 se muestra el perfil estratigráfico con la comparación realizada.

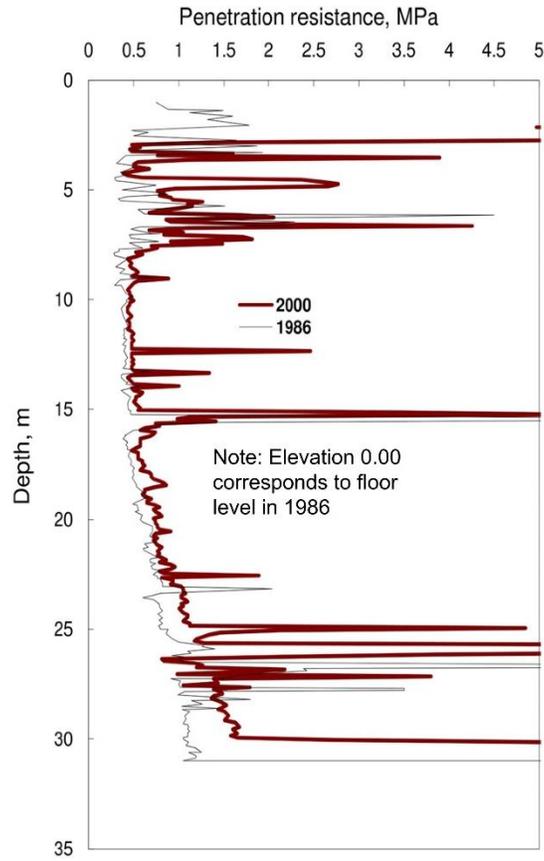


Figura 11. Comparación de pruebas realizadas con Piezocono, en el mismo punto, en diferentes fechas (Obtenido de Ovando-Shelly, et al., 2013).

El comportamiento estático de los sedimentos lacustres de la ciudad de México puede establecerse como sigue: cuando se somete a esfuerzos inferiores al esfuerzo de fluencia, σ'_y , el esqueleto del suelo tiene un comportamiento de tipo elástico (Díaz-Rodríguez et al., 1992), cuando se supera dicho esfuerzo, las fuerzas entre partículas se rompen y el suelo muestra una excesiva deformación y cambios de volumen con predominante consolidación secundaria (Díaz-Rodríguez, 2006).

En cuanto a las propiedades dinámicas, Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero (1989), investigaron el efecto de la aplicación de carga cíclica a muestras inalteradas de los suelos típicos de la ciudad de México, confinadas mediante un anillo metálico flotante. Los resultados sugieren una tendencia de reducción del esfuerzo de fluencia σ'_y . Este efecto se puede deber a la reorientación de las partículas del suelo, equivalente a un remoldeo parcial provocado por la aplicación de esfuerzo cíclico. En la Figura 12, se muestra la curva deformación – tiempo de las pruebas realizadas por Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero (1989), donde se aprecia que a pesar de que las amplitudes del esfuerzo cíclico fueron grandes (0.683 kg/cm^2) el suelo presentó una recuperación elástica importante.

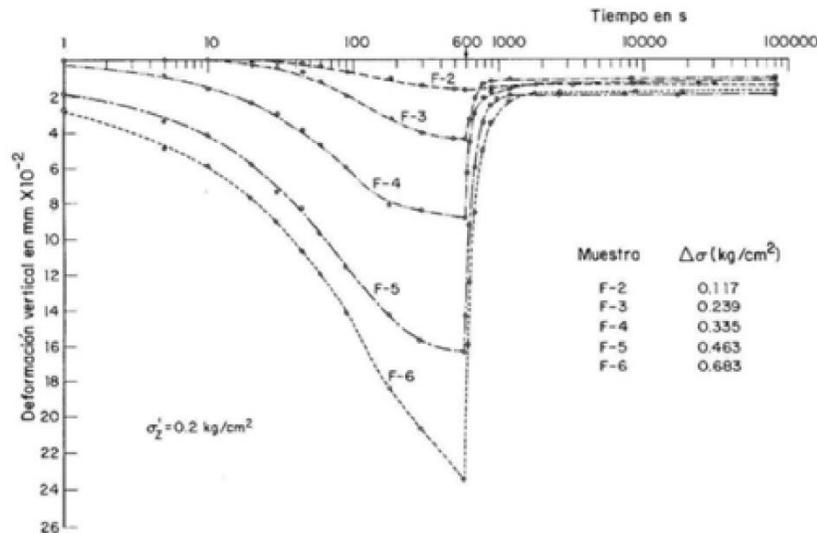


Figura 12. Curva deformación - tiempo que muestra el efecto de cargas cíclicas en muestras confinadas lateralmente (Obtenida de Díaz-Rodríguez, 2006).

Asimismo, Díaz-Rodríguez y Leyte-Guerrero (1989), determinaron que la evolución del módulo de rigidez, $G = \tau/\gamma$, durante el proceso de consolidación muestra que, para pequeñas deformaciones (8×10^{-5} a 2×10^{-4}), se incrementa en forma lineal con el logaritmo del tiempo de consolidación, sin presentarse ningún quiebre que permita distinguir la terminación de la consolidación primaria e inicio de la secundaria. Este resultado sugiere que los efectos del tiempo deben tomarse en cuenta en la selección del módulo de rigidez G a partir de resultados de laboratorio (Díaz-Rodríguez, 2006).

III.II Actividad sísmica del Valle de México

La actividad sísmica observada en la zona central y meridional de México se debe principalmente a la subducción de las placas Rivera y Cocos bajo la placa de Norteamérica, a la interacción de las placas Rivera, Cocos y del Caribe, y también a la actividad cortical superficial en el continente (Díaz-Rodríguez, 2006). Varios eventos sísmicos han producido daños importantes en la ciudad de México desde hace siglos, por ejemplo, el sismo de subducción del 7 de abril de 1845, el cual produjo intensidades en la ciudad de México de VIII (MMI); el del 28 de julio de 1957, M7.6, con una distancia epicentral de aproximadamente 350 km, que produjo el colapso y/o daños importantes sobre numerosas construcciones localizadas en la zona lacustre (Zeevaert, 1988), aunque la vulnerabilidad de la ciudad de México se confirmó a gran escala con el sismo ocurrido frente a las costas de Michoacán y Guerrero el 19 de septiembre de 1985. El epicentro se localizó a una profundidad focal de 16 km y una distancia de aproximadamente 380 km. La amplificación de las ondas sísmicas en la zona lacustre con respecto a la zona firme fue de 10 a 100 veces y la aceleración máxima en superficie alcanzó valores de 170 gals (Díaz-Rodríguez, 2006; Zeevaert, 1988).

Posterior a este evento, otro gran impacto sobre la Ciudad de México fue el sufrido el 19 de septiembre de 2017, cuyo epicentro se localizó cerca de los límites entre los estados de Puebla y Morelos aproximadamente a 120 km de la Ciudad de México, el evento causó daños severos a edificios e infraestructura en cuatro estados. Tan sólo en la Ciudad de México, 39 edificios colapsaron, y cientos tuvieron daños de severos a moderados (Quinde et al., 2020).



Debe reconocerse que el subsuelo de la Ciudad de México es muy sensitivo a cargas estáticas y dinámicas. El comportamiento sismo-dinámico del subsuelo está altamente relacionado con la estratigrafía y la configuración de la base firme donde se apoyan los sedimentos suaves (Zeevaert, 1988). La experiencia indica que la respuesta sísmica de formaciones superficiales estratificadas es más sensible a las variaciones de velocidad de ondas de cortante que a las de otros parámetros. Este efecto resulta particularmente evidente cuando hay fuertes contrastes entre las impedancias sísmicas de las capas de suelo. La duración muy larga de los movimientos sísmicos en los mantos blandos está más estrechamente relacionada con la compresibilidad y las propiedades dinámicas de los suelos, que con la duración correspondiente sobre terreno firme (Faccioli et al., 1975).

Efectos de sitio

La influencia de la geología local y las condiciones del suelo en la intensidad del movimiento del terreno y el daño asociado al sismo se conocen desde hace muchos años. A principios del siglo XIX, MacMurdo (1824) notó que durante el sismo ocurrido en 1819 en Cutch, India, los edificios que se encontraban cimentados a mayor profundidad, alcanzando terreno rocoso, no sufrieron tantos daños como aquellos que se encontraban cimentados a una menor profundidad. Desde estas tempranas observaciones, los efectos de sitio en el movimiento del terreno han sido ilustrados en terremotos alrededor del mundo (Kramer, 1996; Díaz-Rodríguez, 2016). Los efectos de sitio influyen profundamente todas las características importantes del movimiento fuerte del terreno, tales como amplitud, frecuencia, y duración. La extensión de su influencia depende de la geometría y las propiedades del material del subsuelo, la topografía del sitio, y las características del movimiento inicial. La naturaleza de los efectos de sitio puede ser ilustrada de varias maneras: de manera sencilla, con el análisis de la respuesta teórica del suelo; con mediciones del movimiento de la superficie y subsuelo en un mismo sitio; y mediante mediciones de la superficie del terreno con distintas condiciones de subsuelo (Rojas et al., 1989).

El sismo del 19 de septiembre de 1985, ocurrido en Michoacán M8.1, causó daños moderados en los alrededores del epicentro (cerca de la costa del Pacífico en México), pero causó fuertes daños a 350 km en la Ciudad de México. Estudios del movimiento del terreno registrados en distintos sitios de la Ciudad de México, ilustran la importante relación entre las condiciones locales del suelo y movimientos del terreno dañinos, y llevó a importantes avances en el entendimiento de la respuesta cíclica de las arcillas plásticas (Díaz-Rodríguez, 2006; Zeevaert, 1988; Seed et al., 1988).

Para zonificación de efectos sísmicos, la Ciudad México es comúnmente dividida en 3 zonas con diferentes condiciones de subsuelo (Figura 13a). Como se ha descrito anteriormente, la primera es la Zona de Lomas compuesta por depósitos de suelos granulares, basalto, o tobas volcánicas. En la Zona del Lago, depósitos gruesos de suelos muy blandos formados por la pluviación de limo aerotransportado, arcilla y ceniza de los volcanes cercanos a través de las aguas del antiguo Lago de Texcoco, se extienden a considerables profundidades, como se muestra en los contornos de la Figura 13b. Estos suelos blandos, generalmente consisten en 2 capas de arcilla blanda separadas por una capa arenosa de 0 a 6 metros de espesor llamada *capa dura*. El agua subterránea se encuentra generalmente a una profundidad de cerca de 2 metros en la mayor parte de la Zona del Lago. Entre la Zona de Lomas y la Zona del Lago se encuentra la Zona de Transición, donde los depósitos de suelo blando son delgados y se encuentran erráticamente intercalados con depósitos aluviales (Díaz-Rodríguez, 2006; Kramer, 1996; Carreón-Freyre et al., 2017).

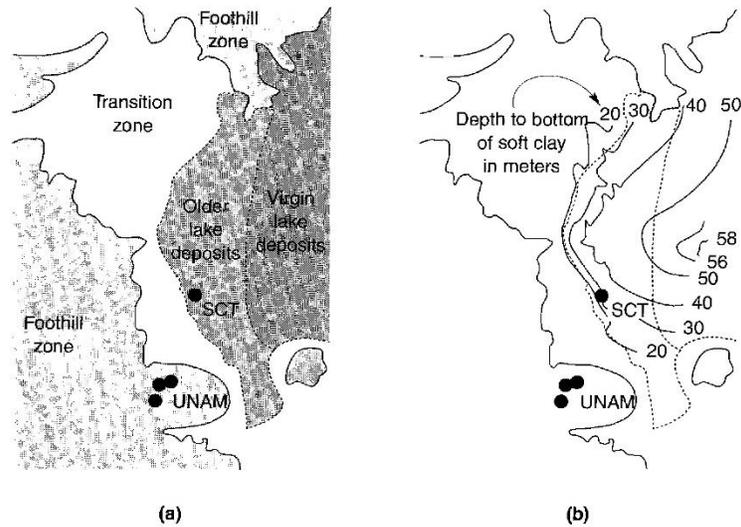


Figura 13. Instrumentos de medición y condiciones geotécnicas en la Ciudad de México: (a) ubicación de los instrumentos de medición relativos a la zona de lomas, transición y lago; (b) contornos del espesor de suelos blandos (Obtenida de Kramer, 1996).

Previo a 1985, un número de instrumentos de medición de movimiento fueron desplegados en la Ciudad de México. En la Figura 13a, se muestran las ubicaciones de las estaciones colocadas en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y en la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). La estación de la UNAM fue localizada en la Zona de Lomas, en una capa de 3 a 5 m de espesor de roca basáltica, le subyace una capa blanda de espesor desconocido. La estación de la SCT fue ubicada en los suelos blandos de la Zona del Lago (Kramer, 1996; Rojas, E. et al., 1989).

A pesar de que el sismo de Michoacán fue bastante fuerte, la gran distancia de la Ciudad de México produjo aceleraciones en el sitio de la UNAM de sólo 0.03g a 0.04g (Figura 14). En la Zona de Transición, las aceleraciones pico en el sitio VIV fueron ligeramente más grandes que las registradas en la estación UNAM, pero aun así bajas. Sin embargo, en la Zona del Lago las aceleraciones pico en las estaciones CDA y SCT fueron cinco veces mayores a las registradas en la estación UNAM. La frecuencia de los movimientos en las estaciones SCT y CDA también fueron muy diferentes al registro de la estación UNAM; el periodo dominante fue de alrededor de 2 segundos en la estación SCT y un poco más alto en la estación CDA (Díaz-Rodríguez, 2006; Zeevaert, 1988).

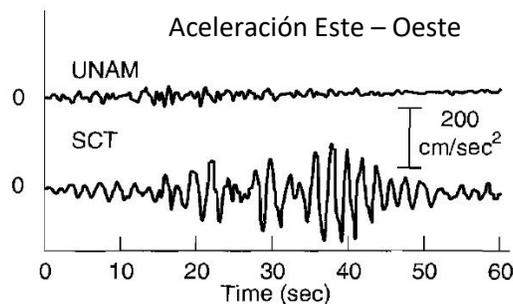


Figura 14. Registros de aceleración de las estaciones UNAM y SCT (Obtenida de Kramer, 1996).

El espectro de respuesta mostrado en la Figura 15, ilustra los pronunciados efectos de los suelos de la Zona del Lago: para periodos de aproximadamente 2 segundos, la aceleración espectral en la estación SCT son cerca de 10 veces mayores a la aceleración registrada en la estación UNAM. A la estación SCT le subyacen de 35 a 40 m de arcilla blanda, con una velocidad promedio de ondas s de 75m/s. Como resultado de esto, el periodo característico del lugar es $T_s = \frac{4H}{v_s} = \frac{4(37.5)}{75} = 2 \text{ seg}$, un valor consistente con el pico del espectro de respuesta de la Figura 15 (Kramer, 1996).

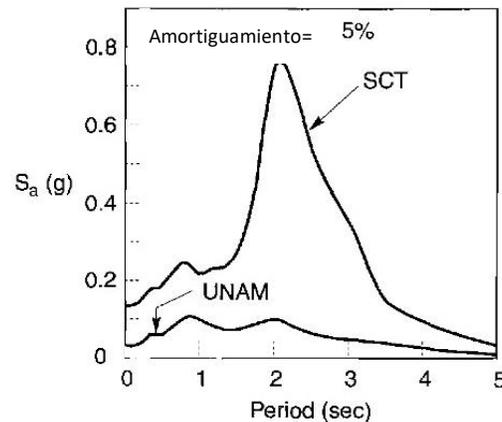


Figura 15. Espectros de respuesta correspondientes a los registros sísmicos de las estaciones UNAM y SCT (Obtenida de Kramer, 1996).

El daño estructural en la Ciudad de México fue altamente selectivo; grandes partes de la ciudad no sufrieron daño, mientras otras áreas fueron muy afectadas. El daño fue despreciable en la Zona de Lomas y mínimo en la Zona de Transición. El mayor daño ocurrió en la Zona del Lago, que le subyace una capa de 38 a 50 m de suelo blando, donde los periodos característicos del sitio fueron estimados de 1.9 a 2.8 segundos. Incluso en esta zona, el daño a edificios de menos de 5 pisos y más de 30 fue mínimo. Sin embargo, la mayoría de los edificios entre 5 y 20 niveles tuvieron daños fuertes o colapsaron. Usando la regla general y aproximada que el periodo fundamental de un edificio de N niveles es $N/10$ segundos, la mayoría de los edificios dañados tenían periodos fundamentales iguales o similares a los periodos característicos del sitio donde se encontraban. Aunado al efecto del aumento del periodo por la interacción suelo estructura y la tendencia del periodo fundamental de una estructura a aumentar durante un sismo fuerte (debido a la reducción de rigidez causada por el daño estructural y arquitectónico acumulado), parece probable que las estructuras dañadas fueron sometidas a muchos ciclos de grandes fuerzas dinámicas en periodos cercanos a su periodo fundamental. Esta condición de “doble resonancia” (amplificación del movimiento del basamento por los depósitos de suelo blando y la amplificación del movimiento del suelo por la estructura) combinada con el diseño estructural y construcción deficientes, muy probablemente fue el ingrediente clave en la devastación (Stone, et al., 1987; Carreón-Freyre et al., 2017).

Influencia de la topografía local

Los efectos de las irregularidades topográficas pueden ser significativos en los movimientos del terreno. Probablemente, el mejor ejemplo conocido de los aparentes efectos topográficos fue

recogido por un acelerógrafo en el contrafuerte de la presa Pacoima al sur de California. El acelerógrafo de la presa Pacoima registró aceleraciones horizontales pico de alrededor de 1.25g en cada una de las dos direcciones perpendiculares en sismo de San Fernando en 1971 M6.4, valores que fueron considerablemente mayores a los esperados para un sismo de esa magnitud. Sin embargo, el acelerógrafo estaba localizado en el pico de una cresta rocosa estrecha, adyacente a la presa. Investigaciones subsecuentes atribuyeron una buena parte de los inusuales picos de las aceleraciones a la respuesta dinámica de la cresta, un efecto topográfico. En los casos donde valles aluviales fueron llenados con suelos blandos, análisis dimensionales de la respuesta del terreno permiten frecuentemente capturar lo más esencial de la respuesta. Sin embargo, podrían no permitir describir las complejas ondas de campo y las largas duraciones producidas por las múltiples reflexiones en algunos de estos basamentos (Trifunac, et al., 1971; Rogers, 2012).

Los efectos topográficos causados por irregularidades simples pueden ser estimados por soluciones exactas para idealizar problemas. Para una cresta triangular infinita sujeta a ondas SH propagadas verticalmente (con movimiento de la partícula paralela a su eje), desplazamientos en el apéndice son amplificados por un factor $2\pi/\phi$, donde ϕ es el ángulo del vértice de la cresta (Figura 16a). Este acercamiento también puede ser empleado para aproximar los efectos topográficos de ciertos casos de terreno cresta – valle (Figura 16b) (Sánchez-Sesma, 1990).

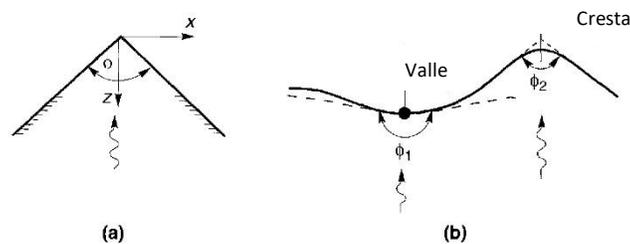


Figura 16. Caracterización de irregularidades topográficas simples: (a) notación de una cresta triangular; (b) aproximación de la superficie del terreno en porciones de cresta y valle (Obtenida de Kramer, 1996).

Los análisis de las irregularidades topográficas es un problema complicado; la interacción de ondas puede producir patrones complejos de amplificación y deamplificación, dependiendo de la geometría de la irregularidad y del tipo, frecuencias, y ángulos de incidencia de las ondas de llegada (Sánchez-Sesma, et al., 1980; Carreón-Freyre et al., 2017).

III.III Suelos de la Alcaldía Iztapalapa.

La Alcaldía Iztapalapa se ubica en la parte Oriente de la Ciudad de México y en sus casi 114 km² están ubicados la Sierra de Santa Catarina, el Peñón del Marques y el Cerro de la Estrella que cercan una planicie lacustre que en alguna época se comunicó con el lago de Texcoco. En esta zona se encuentran materiales arcillosos, limosos, sedimentos fluviales y materiales de origen volcánico (depósitos de caída y flujos piroclásticos principalmente) (Gutiérrez, et al., 2012).

Los principales problemas de carácter geológico que afectan el territorio de la Alcaldía Iztapalapa son la subsidencia y el fracturamiento del subsuelo, además de la inestabilidad de laderas y taludes (en la Figura 13 se muestra el mapa de susceptibilidad por inestabilidad de laderas). Han sido muchos los esfuerzos por entender los mecanismos y los efectos de forma que, investigadores, técnicos, administradores de gobierno y sociedad civil consolidaron el Centro de Evaluación de

Riesgos Geológicos (CERG) de la Alcaldía que intenta metodológicamente cartografiar el fracturamiento y darle sentido en un contexto *Geo* más local (Gutiérrez, et al., 2012).

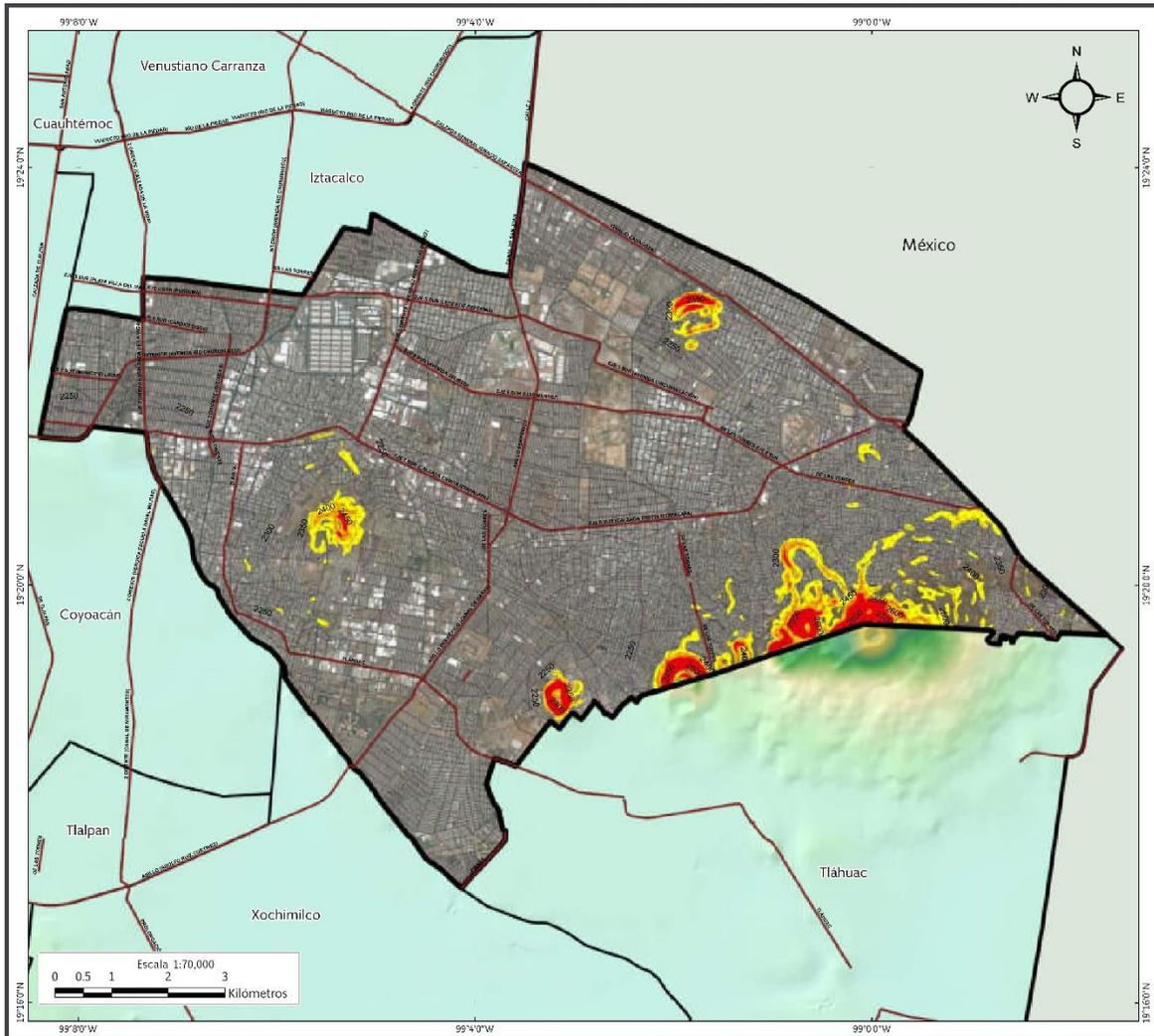


Figura 17. Mapa de inestabilidad de laderas y taludes de la Alcaldía Iztapalapa (Obtenido de Delegación Iztapalapa, 2011).

Geo-Zonificación de Iztapalapa

Hasta la fecha, se han identificado tres sistemas principales de fracturamiento en la zona, que se muestran en la Figura 14: (a) el primero con una orientación NE-SW delimitado por el borde de la Sierra de Santa Catarina por debajo de la mancha urbana, (b) el segundo con orientación WNW-ESE que coincide con el límite del lago de Texcoco durante el siglo XIX y, (c) y el sistema de fracturas anulares de tensión que rodean al Peñón del Marqués. La distribución y orientación de las fracturas estudiadas muestra que no es posible establecer un mecanismo general que explique sus condiciones de generación y propagación (Gutiérrez, et al., 2012).

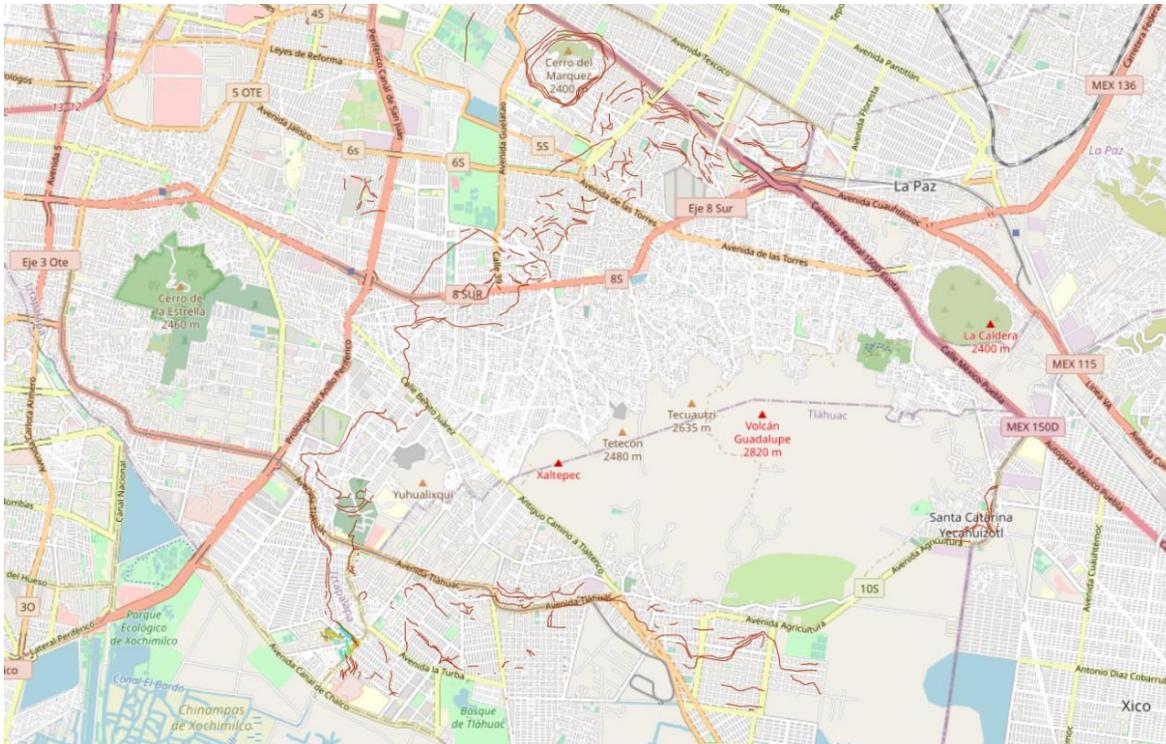


Figura 18. Mapa donde se muestran los tres sistemas principales de fracturamiento que afectan a la Alcaldía Iztapalapa (Bajo permiso de publicación García, et al., 2019).

En algunos casos, la geometría de las fracturas permite identificar y delimitar antiguas superficies de emplazamiento de materiales volcánicos y de depósitos fluviales, como en el sector Noroeste del volcán Yuhualixqui, en la Figura 15 se muestra que el patrón de fracturamiento pone en evidencia el frente de un depósito piroclástico, y sus desplazamientos verticales están relacionados con el espesor de esta (Gutiérrez, et al., 2012).

Dentro de los principales tipos de relieve que conforman el valle de la Alcaldía Iztapalapa, se puede observar el endógeno de tipo volcánico acumulativo y el exógeno en erosivo y acumulativo (Lugo-Hubp, 1996). Estos tipos de relieve han formado una variedad de rasgos naturales causados por el vulcanismo tanto por la acumulación como por la erosión, además de una planicie de tipo lacustre que se encuentra relleno por diversas secuencias conformadas por materiales de rocas volcánicas, piroclásticas y sedimentos limosos y arcillosos (Gutiérrez, et al., 2012).

La identificación y delimitación de unidades geomorfológicas sirvieron como base en la delimitación de la zonificación geotécnica en particular para las zonas de piedemonte volcánico, en donde los materiales presentan propiedades hidráulicas y mecánicas heterogéneas (Gutiérrez, et al., 2012).

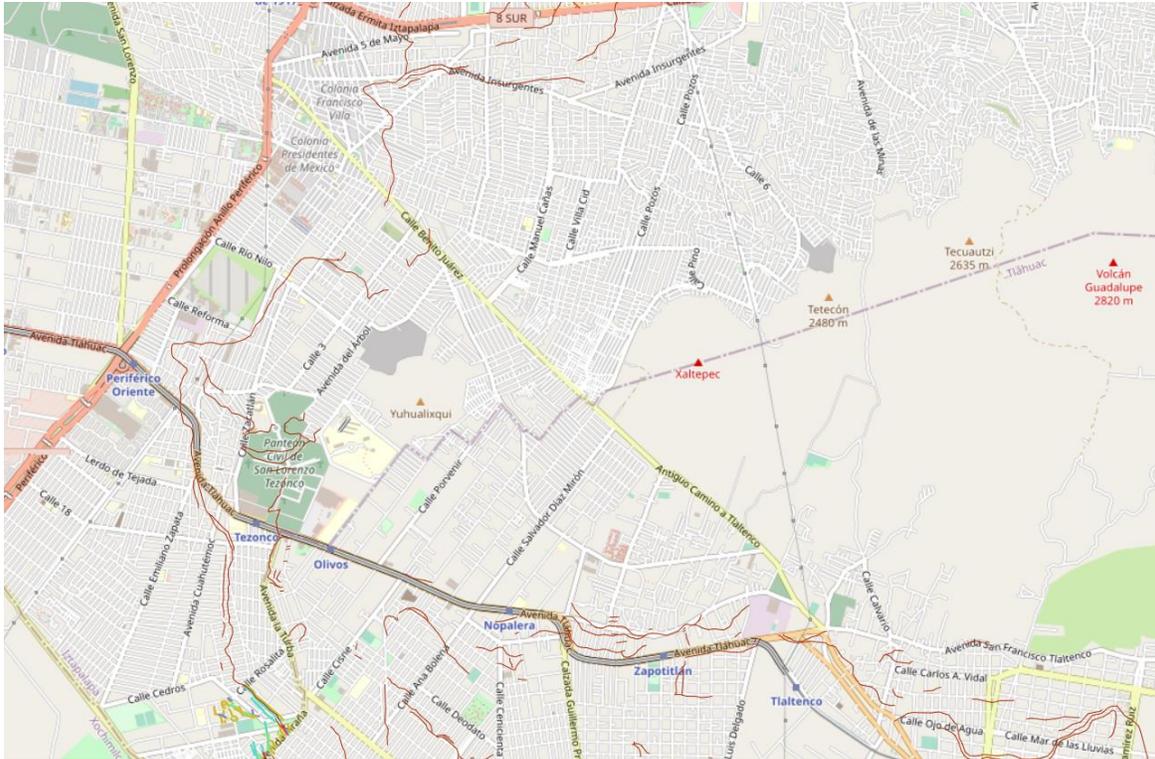


Figura 19. Mapa donde se muestra el patrón de fracturamiento ubicado en el sector noroeste del volcán Yuhualixqui (Bajo permiso de publicación García, et al., 2019).

Gutiérrez, et al., 2012, proponen las siguientes zonas geotécnicas con base en la metodología definida en el estudio que realizaron para la zonificación geotécnica de Iztapalapa:

Tabla 1. Correlación de Correlación de Propiedades para cada Zona Geotécnica de la Alcaldía Iztapalapa, Velocidades de Corte (V_s) y Tasa de hundimiento anual (TH).

Zona Geotécnica	Área [km ²]	V_s [cm/s]	TH [cm]	Geología
Flanco Volcánico	37.4	0 - 15	0 - 3	Lavas andesíticas y piroclastos
Ladera Volcánica	13.4	15 - 40	3 - 7	Piroclastos (granular y roca)
Pie de monte	15.3	40 - 55	7 - 14	Coluvión
Planicie lacustre	47.5	>55	>14	Depósitos limo-arcillosos

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal en su versión 2017, se establecen 3 zonas geotécnicas. Como se observa en la Figura 15, en la Alcaldía Iztapalapa existen las 3 zonas geotécnicas definidas en las normas, lo cual representa una zonificación geotécnica muy burda, que

en la realidad es mucho más compleja. Es por ello que Gutiérrez, et al., 2012, propusieron la zonificación geotécnica antes mencionada y que más adelante se explica de manera más detallada.

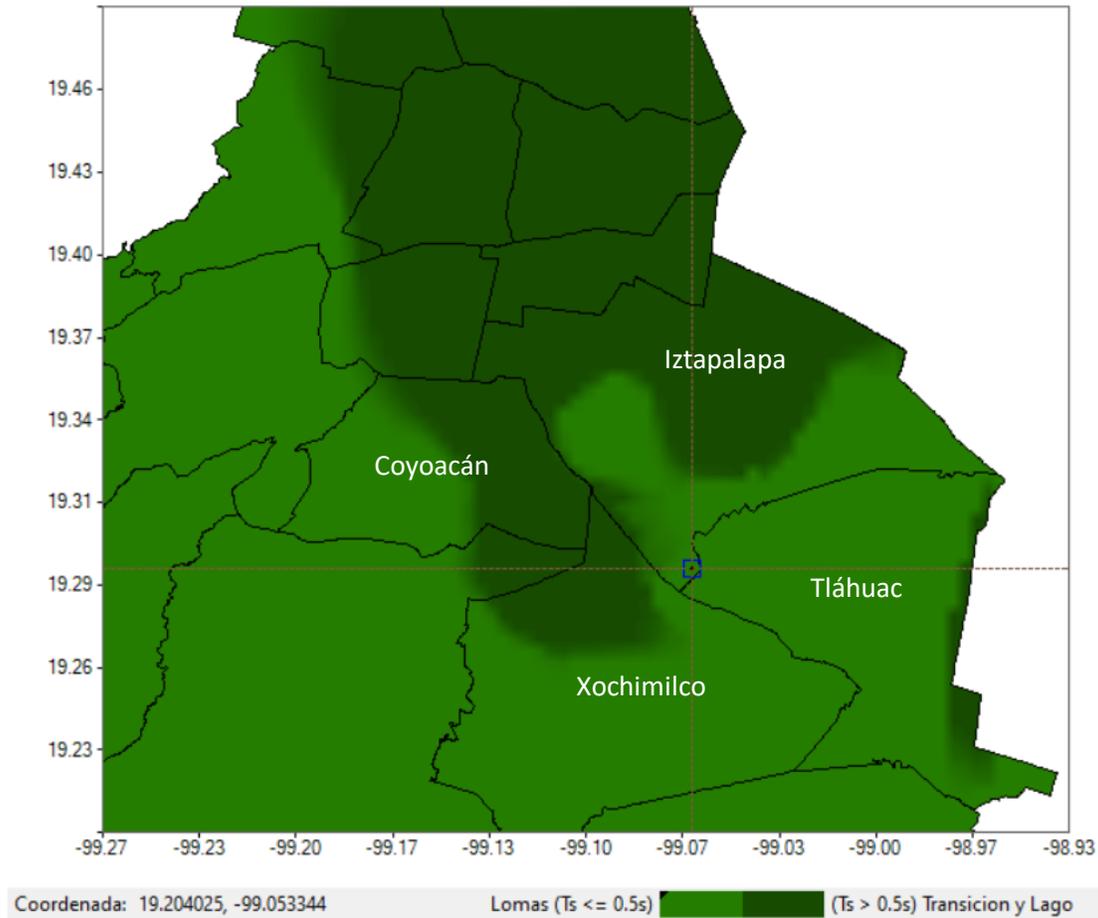


Figura 20. Zonificación geotécnica de la Alcaldía Iztapalapa de acuerdo con las NTC para el Diseño y Construcción de Cimentaciones versión 2017 (Elaboración propia, obtenido del programa SASID).

A continuación, se describen las zonas geotécnicas propuestas por Gutiérrez, et al., 2012 (en la figura 21 se observan estas zonas en un mapa):

- **Zona I: Unidad geotécnica de Flanco Volcánico.** Esta zona comprende el terreno que presenta pendientes mayores a los 30°, en donde los materiales son principalmente rocas volcánicas (basaltos y andesitas) en ocasiones inter-digitadas, con materiales granulares arenosos de origen piroclástico en estado suelto a semi-soldado con oquedades. El espesor de estos materiales es en promedio de 60 m.
- **Zona II: Unidad geotécnica de Ladera Volcánica.** En esta zona se localiza una amplia diversidad de materiales piroclásticos granulares y rocas piroclásticas. Los materiales granulares corresponden a fragmentos de escoria y rocas (basaltos) de diversos tamaños granulométricos (bloques-ceniza) que se encuentran en contacto grano a grano sin ninguna matriz fina de soporte. Los espesores de esta unidad varían desde algunos decímetros hasta varios metros. Estos materiales son particularmente susceptibles a la erosión, lo que puede provocar el colapso de su estructura y la formación de socavamientos.



- **Zona III: Unidad geotécnica de Piedemonte Volcánico.** En esta zona se localizan interdigitaciones de materiales coluvión (depósitos fluviales de pendiente) con materiales volcánicos, y depósitos lacustres. Los espesores varían de uno a cinco metros. Esta unidad se caracteriza por el alto contraste de propiedades físicas. Los materiales más someros se han clasificado como limos y arenas con contenidos de agua que varían del 30 al 100 %. En esta zona se observa una alta deformación del terreno y fracturamiento. Debido a la aplicación de elevadas cargas estáticas (edificaciones que exceden la capacidad de carga de los materiales del subsuelo) y dinámicas (tráfico de vehículos pesados), así como a la excesiva extracción de agua subterránea, en esta zona se observan asentamientos diferenciales, fracturamiento y hundimiento generalizado. Los sistemas de fracturamiento que se han cartografiado en esta zona generalmente siguen zonas de debilidad que se asocian a contactos litológicos entre los materiales mencionados, frentes de emplazamiento de materiales volcánicos como lavas, piroclastos y materiales sedimentarios recientes. En algunos sectores de esta zona, se han observado rasgos de creep en materiales cohesivos y deslizamientos de ladera con superficies de despeque asociadas con materiales de baja resistencia de corte.
- **Zona IV: Unidad geotécnica lacustre.** La mayor parte de los materiales que se pueden encontrar en esta zona geotécnica son depósitos de limos y arcillas con frecuente presencia de lentes de arena muy fina que corresponden a cenizas volcánicas con un grado de alteración variable. En la literatura se pueden encontrar numerosos estudios de caracterización (física y mecánica) de las Arcillas del Valle de México que constituyen esta unidad geotécnica debido a su complejo comportamiento mecánico: altos contenidos de agua (en ocasiones más de 300 %), alta compresibilidad, alta plasticidad, alta relación de vacíos, baja resistencia al corte (valores de Cohesión entre 2 y 12 Ton/m² y ángulos de fricción interna de menos de 10°) y ruptura frágil. Entre los principales minerales que constituyen estas secuencias arcillosas se han reportado Montmorillonita, Halloysita, Illita y Alófono. De acuerdo con el análisis de varios sondeos geotécnicos en las zonas lacustres de Iztapalapa se ha observado que los depósitos arcillosos que presentan de 10 a 15 m de espesor y que frecuentemente se encuentran interestratificados con depósitos de limos y arenas piroclásticas de 2 a 4 m de espesor.

Peligro geológico asociado a las zonas geotécnicas

Gutiérrez, et al., 2012, asocian la inestabilidad de laderas, y la subsidencia y fracturamiento con las zonas geotécnicas de la siguiente manera:

- **Subsidencia y Fracturamiento.** A partir de la correlación de los datos de velocidad de hundimiento medidos mediante Interferometría de Radar (InSAR), y la cartografía del fracturamiento, se identificó una alta correlación entre los contrastes mayores en las velocidades de hundimiento con las trazas en superficie del fracturamiento. Las zonas críticas se ubican en la porción noreste y alrededor del Peñón del Marques, en donde los hundimientos se encuentran asociados a un deslizamiento activo de los flancos del edificio volcánico. En el sector noreste de la alcaldía se identificó la predominancia de secuencias de limo-arcillosas altamente compresibles y con baja capacidad de carga.

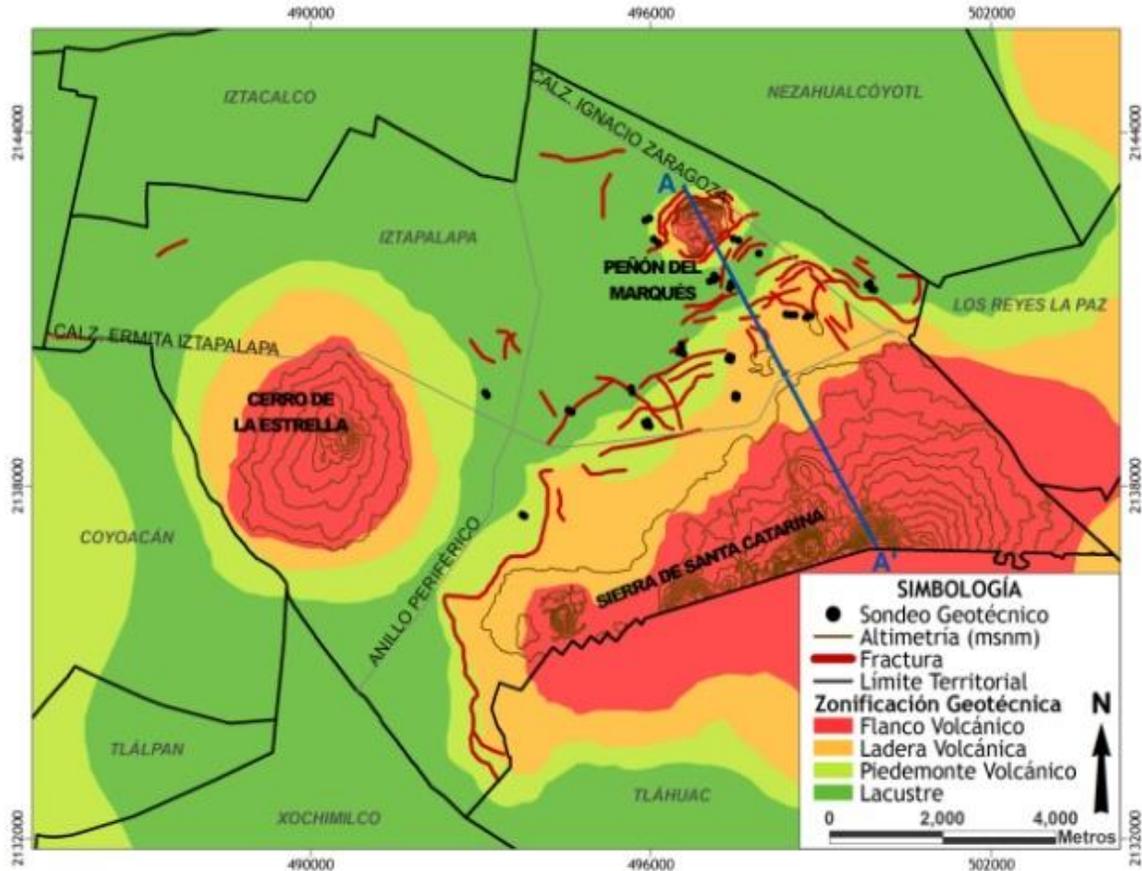


Figura 21. Zonificación Geotécnica propuesta para el territorio de la Alcaldía Iztapalapa (polígono delimitado con línea negra). Se muestra la distribución de las zonas de: Flanco Volcánico en rojo, Ladera Volcánica en naranja, Piedemonte volcánico en verde pálido y la planicie lacustre en verde medio. Los sistemas de fracturamiento cartografiados se presentan en líneas rojas (Obtenido de Gutiérrez, et al., 2012).

- Inestabilidad de laderas.** Los principales problemas de inestabilidad de taludes se relacionan con mecanismos de falla, de caída o desprendimientos de bloques. En las zonas de ladera y flanco volcánico existe una gran variedad de materiales de origen volcánico cuyas propiedades mecánicas son contrastantes (granulometría, cohesión, espesor, resistencia, entre otros). Esta variabilidad estratigráfica se debe a su origen, en gran parte del territorio se observan interdigitaciones de materiales granulares con secuencias de lavas. Los depósitos granulares presentan nula cohesión por lo que son susceptibles a los agentes erosivos.

CAPÍTULO IV. MODELO DE RIESGO POR AGRIETAMIENTO

Como se mencionó en el capítulo anterior, la principal afectación geotécnica presente en la Alcaldía Iztapalapa se debe al agrietamiento, que va de la mano del fenómeno de subsidencia. Para estudiar esta afectación, se presenta el modelo conceptual de riesgo por agrietamiento propuesto por García et al., (2019). A continuación, se presenta el modelo, posteriormente se explican los componentes que lo integran.

Para obtener una aproximación al riesgo por agrietamiento se utilizó el siguiente planteamiento:

Si:



Y a su vez:



Donde:

- **Vulnerabilidad:** son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.
- **Exposición:** condición de desventaja debido a la ubicación, posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo.
- **Susceptibilidad:** grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso.
- **Resiliencia:** capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.

Entonces el modelo de riesgo por agrietamiento es el siguiente:



Ahora, se describen los componentes del modelo de riesgo por agrietamiento.

IV.I Riesgo.

La definición de riesgo es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Ahora, se entiende como Riesgo por Agrietamiento a la probabilidad de que se generen grietas en el suelo y éstas impacten con consecuencias negativas a las estructuras.

Como se mencionó anteriormente, el riesgo resulta de la combinación de amenaza, exposición y vulnerabilidad, por lo que para evaluarlo se deben conocer estos componentes de manera exhaustiva. Una evaluación de riesgos define: uno, la naturaleza y la magnitud de las amenazas; dos, la infraestructura expuesta ante este peligro; tres, la vulnerabilidad de las comunidades expuestas a estas amenazas (Figura 22) (Baker, 2012).



Figura 22. Evaluación de riesgo (Obtenida de Serre et al., 2012)

En los últimos años, ha crecido en la comunidad académica la necesidad de definir metodologías para evaluar el riesgo, pues la exposición al riesgo se ha exacerbado por condiciones de vivienda sobrepobladas, falta de infraestructura adecuada y servicios, vivienda insegura, inadecuada nutrición, y salud pobre. Estas condiciones pueden cambiar rápidamente una amenaza natural o cambio en el clima en un desastre, y resultar en la pérdida de servicios básicos, daño o destrucción de hogares, pérdida de sustento, malnutrición, enfermedad, discapacidad, y pérdida de vida (Baker, 2012).

Por ello, hoy en día múltiples razones hacen que los riesgos urbanos sean difíciles de manejar. Desde el 2007, la mitad de la población mundial vive en ambientes urbanos. Después de alcanzar este límite, se espera que el total de la población mundial viviendo en ciudades y pueblos se duplique en los próximos treinta años. Esta tasa de crecimiento es equivalente a construir una nueva ciudad con un millón de habitantes cada semana. Este rápido crecimiento muestra por sí mismo las cuestiones en juego para dominar los riesgos urbanos (Serre, et al., 2012).

Es importante definir el riesgo debido a distintas situaciones, pues las ciudades concentran actividades, posesiones y personas. Cuando ocurre un evento como un sismo, una inundación, un accidente industrial, o una combinación de severas amenazas, la forma en la que las ciudades operan es generalmente interrumpida. Dependiendo de la gravedad del evento, los efectos de la crisis pueden sentirse en una amplia escala (Serre, et al., 2012).



Una distinción de riesgo más amplia, útil para el análisis de riesgo, es el concepto de riesgo intensivo y extensivo, encontrado en la literatura de riesgo de desastres. Riesgo intensivo se refiere a áreas donde mayores concentraciones de personas vulnerables y bienes económicos son expuestos a severas amenazas (por ejemplo, sismos mayores, ciclones tropicales, inundaciones severas, o tsunamis). En contraste, riesgo extensivo se refiere a amplias regiones expuestas a pérdidas con mayor frecuencia de ocurrencia, con menor o moderada intensidad (por ejemplo, inundaciones localizadas, incendios, y derrumbes en asentamientos informales) (Baker, 2012).

En la tabla 2, se observa una descripción de los elementos que componen un análisis de riesgo general, aplicables al modelo conceptual de riesgo por agrietamiento.

Tabla 2. Marco teórico analítico para evaluación de riesgo (Obtenida de Baker, 2012).

Vulnerabilidad			
Amenaza Natural	Exposición	Susceptibilidad	Recuperación
Las amenazas son potencialmente eventos físicos dañinos o fenómenos que pueden causar la pérdida de vidas o lesiones, daño a las propiedades, disrupción social y económica, o degradación ambiental. ¹	La naturaleza y el grado al cual el sistema está expuesto a variaciones significativas.	Es el grado al cual un sistema es afectado, ya sea adversa o benéficamente, por los cambios. El efecto puede ser directo o indirecto.	La habilidad de un sistema de ajustarse a los cambios, para moderar los daños potenciales, para tomar ventaja de las oportunidades, o para lidiar con las consecuencias.

En este caso, el riesgo al agrietamiento es directamente proporcional a las amenazas (asociadas a la actividad humana y a los fenómenos naturales) y a la vulnerabilidad de la comunidad. Es decir, el riesgo será mayor cuando las condiciones de ubicación geográfica, naturaleza geotécnica del sitio, actividad humana, condiciones sísmicas, entre otras amenazas, sean favorables a la generación de grietas. Asimismo, la vulnerabilidad que tenga la comunidad a los efectos dañinos de una amenaza incrementará el riesgo al agrietamiento. Por lo tanto, se puede reducir el riesgo si se disminuyen las amenazas y la vulnerabilidad.

La disminución de amenazas es algo complicado de lograr, pues intervienen factores naturales que no puede controlar el ser humano. Sin embargo, aquellas amenazas generadas por la actividad humana se pueden controlar y, por lo tanto, lograr una disminución considerada de éstas. Otra medida para disminuir el riesgo es fortalecer a la comunidad para disminuir la vulnerabilidad que tiene a los efectos dañinos de las distintas amenazas. Puesto en palabras suena a una solución sencilla, sin embargo, para lograr disminuir las amenazas antrópicas y la vulnerabilidad de la

¹ Una distinción hecha en la literatura de desastres es la definición de un desastre como los efectos de las amenazas en la sociedad como resultado de una combinación de exposición y vulnerabilidad. Los desastres, no amenazas, causan muertes y daños (Banco Mundial y Naciones Unidas, 2010).



comunidad, se requieren medidas coordinadas de la comunidad, así como la participación de las distintas instancias del gobierno local.

En el modelo conceptual se ilustró que la vulnerabilidad es directamente proporcional a la exposición y a la susceptibilidad, pero es inversamente proporcional a la resiliencia, que es la capacidad de resistir y recuperarse de un sistema ante fenómenos de diferente naturaleza. Es decir, si aumenta la resiliencia de la comunidad, el riesgo disminuye. Por lo tanto, otra forma de reducir el riesgo por agrietamiento es creando comunidades resilientes a este fenómeno. De nuevo, es una solución aparentemente sencilla, pero requiere una gran colaboración de los integrantes de la comunidad con los órganos de gobierno para crear mecanismos que trabajen como una red de seguridad que proteja a la comunidad, que los haga capaces de resistir y los ayude a tener una capacidad de recuperación mayor (García, et al., 2019).

Por último, el estudio realizado por Baker, 2012, para la construcción de resiliencia en las ciudades, obtuvo los siguientes resultados clave, que proveen una guía para dirigir el riesgo:

- **Las zonas urbanas marginadas están en la primera línea.** Los pobres son particularmente vulnerables al cambio climático y amenazas naturales debido al lugar en el que viven dentro de las ciudades, y la falta de servicios básicos confiables ahí.
- **Los gobiernos de las ciudades son los pilotos para dirigir los riesgos.** Los gobiernos locales juegan un rol vital en proveer servicios básicos que son críticos para mejorar la resiliencia de las zonas marginadas.
- **Los oficiales de las ciudades construyen resiliencia al normalizar la reducción del riesgo en manejo urbano.** Reducir el riesgo de desastres puede ser mejor dirigido y sostenido en el tiempo a través de la integración con prácticas de manejo y planeación urbana existentes.
- **Apoyo financiero significativo es necesario.** Los gobiernos locales necesitan apalancar los recursos existentes y nuevos para hacer frente a las carencias en la entrega de servicios y adaptación de infraestructura básica.

A continuación, se definirá la visión de amenaza que tiene el modelo. Asimismo, se definirán las amenazas relacionadas al agrietamiento que afectan a la comunidad de Iztapalapa, de origen antrópico y natural. También, se hablará sobre la vulnerabilidad de la comunidad, entendida como la exposición, susceptibilidad y resiliencia.

IV.II Amenaza.

La amenaza es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa (inundación, tormenta, sequía, terremoto) que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. La amenaza se determina en función de la intensidad y la frecuencia, y a menudo se clasifican por causa (García, et al., 2019).

Si se toma en cuenta un enfoque mundial, cada amenaza natural aflige a los países de forma distinta, pero muchos países están sujetos a múltiples amenazas, si bien la importancia de cada uno de ellos difiere. Los terremotos y los volcanes (amenazas geofísicas) tienden a agruparse a lo largo de los límites de las fallas, caracterizados por ser terrenos montañosos. Las inundaciones, los ciclones y los deslizamientos de tierra (amenazas hidrometeorológicas) afectan a las regiones costeras del este

de los principales continentes, así como a algunas regiones del interior de Norteamérica, Suramérica, Europa y Asia. Las sequías están más ampliamente dispersadas a lo largo de los trópicos semiáridos (Banco Mundial y Naciones Unidas, 2010).

Para complementar el párrafo anterior, en la Figura 23, se observan las ubicaciones de las siguientes amenazas principales: terremotos de magnitud superior a 6 en la escala de Richter desde 1950 hasta febrero de 2010 (del centro de Datos sobre Terremotos de California del Norte, www.ncedc.org); registros de tormentas tropicales de 1975-2007; sequías basadas en el índice estandarizado de precipitaciones (SPI, por sus siglas en inglés. Valores elevados indican una alta probabilidad de déficit de precipitaciones) (Banco Mundial y Naciones Unidas, 2010).

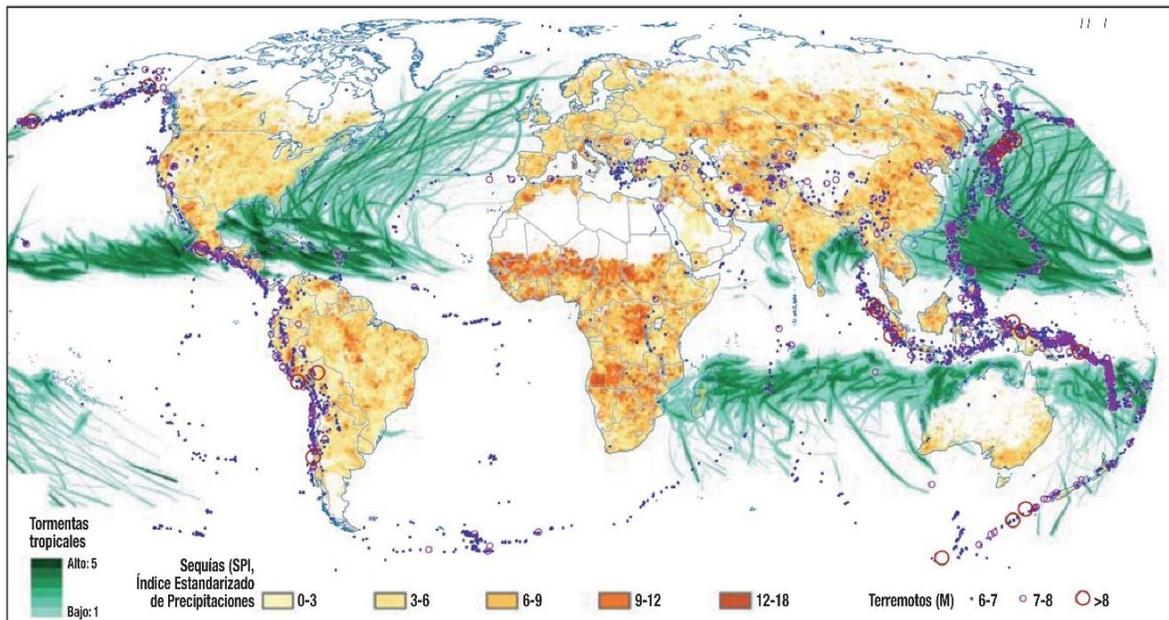


Figura 23. Mapamundi donde se muestra la ubicación de las principales amenazas naturales que han afectado al mundo (Obtenido de Banco Mundial y Naciones Unidas, 2010).

Ahora, para definir el enfoque de amenazas del modelo de García, et al., 2019, primero, se deben definir los escenarios naturales que se ligan a patrones particulares de agrietamiento.

Mecanismos de fracturamiento

A partir de un análisis de la literatura existente hasta entonces, Orozco y Figueroa (1991) señalan que las fracturas aparecen en zonas de fuertes hundimientos (la mayoría se inician a profundidad y se propagan hacia la superficie) y de transiciones estratigráficas laterales. En la Figura 24 se muestra, de manera esquemática, la alta heterogeneidad de la secuencia estratigráfica en una cuenca fluvio – lacustre en zonas volcánicas relativamente recientes. La variabilidad lateral y en profundidad de la granulometría y permeabilidad del medio en este tipo de cuencas condiciona el comportamiento mecánico diferencial de los materiales y determina la distribución de gradientes hidráulicos críticos. Se puede establecer entonces que el fracturamiento de sedimentos está influenciado por la interacción entre los factores geológicos que condicionan sus propiedades y los factores disipadores que rompen el equilibrio mecánico del sistema (Carreón – Freyre, et al., 2006).

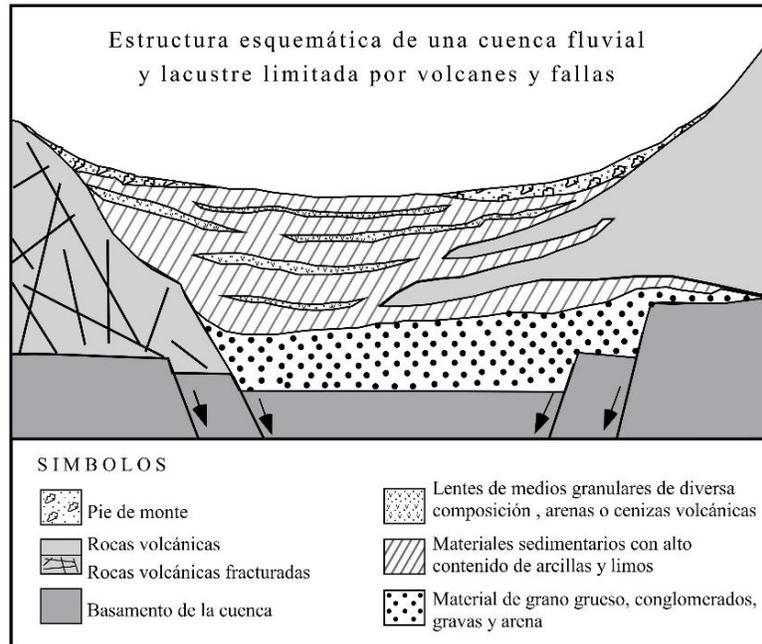


Figura 24. Esquema conceptual de sedimentación fluvio lacustre en una cuenca cerrada de origen volcánico, con actividad contemporánea a la sedimentación como es el caso de la Cuenca del Valle de México (Obtenido de Carreón – Freyre, et al., 2003).

Las características geológicas de una secuencia sedimentaria, como el ambiente de depósito y estructuras pre – existentes en el basamento, son heterogeneidades determinantes para la formación y propagación de fracturas (por ejemplo, agrietamiento por desecación) que pueden modificar el estado local de esfuerzos y controlar la evolución de las fracturas alrededor de ellas. Asimismo, la variación de la mineralogía del material arcilloso y la permeabilidad de los sedimentos y rocas se puede traducir en variaciones de compresibilidad y llevar al fracturamiento por deformación diferencial (Tuckwell, et al., 2003).

De acuerdo con Carreón-Freyre, et al., 2006, los sistemas de fracturamiento se pueden estudiar de acuerdo con su tamaño y la asociación de factores que les dan origen. Dado que los conceptos regional y local son relativos ya que dependen de la escala y del tipo de estudio, se distinguen de acuerdo con los criterios siguientes:

1. Las estructuras regionales son de dimensiones mayores que la zona urbana afectada. La irregularidad del basamento fracturado que subyace a las secuencias sedimentarias determina en gran medida la ubicación del fracturamiento que se propaga desde profundidad hacia las secuencias sedimentarias someras retomando planos de debilidad preexistentes. En zonas urbanas afectadas por sistemas de fallas regionales se debe considerar la asociación espacial de las mismas con variaciones estratigráficas, de manera que una falla puede actuar como canal preferencial o como barrera de flujo formando gradientes piezométricos importantes (Rojas-González, et al., 2002; Carreón-Freyre, et al., 2005; Carreón-Freyre, et al., 2006; Kreitler, 1977).
2. Como escala intermedia se considera a los sistemas de fracturamiento que afectan principalmente la parte superior de la secuencia sedimentaria fluvio – lacustre frecuentemente interestratificada con materiales piroclásticos y volcánicos. En esta escala



uno de los principales mecanismos de fracturamiento es la deformación diferencial, ya que los materiales presentan una distribución heterogénea de propiedades hidráulicas y mecánicas. Hay que considerar que el fracturamiento es sólo debido al abatimiento de los niveles piezométricos del agua subterránea implica una simplificación del fenómeno, ya que los abatimientos mayores no se relacionan de manera directa con los desplazamientos verticales en las zonas de fracturamiento. Para una adecuada evaluación de las condiciones de propagación del fracturamiento en esta escala, se deben estudiar las variaciones verticales de las propiedades hidráulicas del sistema acuífero y las variaciones laterales de la compresibilidad de los materiales (Zeevaert, 1953; Orozco y Figueroa, 1991; Carreón-Freyre, et al., 2003; Carreón-Freyre, et al., 2006).

3. La escala local se refiere al fracturamiento en zonas restringidas y puede variar de unos cuantos a algunas decenas de metros; ésta es la escala en la que se llevan a cabo la mayor parte de los estudios de mecánica de suelos. Como ejemplos de fracturamiento local se tienen (Lugo-Hubp, et al., 1991; Carreón-Freyre, et al., 2006):
 - a. Las fracturas anulares de tensión que se generan en las zonas transicionales de los piedemontes de lomeríos y que se relacionan con deslizamientos gravitacionales.
 - b. Las grietas superficiales generadas por la evaporación – desecación en extensiones planas arcillosas, generadas por los cambios en las condiciones climáticas y en la presión de poro de las capas sedimentarias inferiores.
 - c. Las fracturas por tensión que se generan por las fuerzas de filtración ocasionadas por el bombeo localizado (Juárez-Badillo, 1962).

El principal disparador de fracturas en sedimentos fluvio – lacustres es el desequilibrio mecánico, ya que las propiedades de estos sistemas pueden variar en tiempos muy cortos. Existen fenómenos naturales que actúan como mecanismos disipadores de fracturas, con son la actividad sísmica y las inundaciones causadas por lluvias torrenciales; sin embargo, los mecanismos más importantes son de origen antropogénico. El desequilibrio mecánico inducido por sobrecarga estática y dinámica, y la despresurización del medio geológico debido a la extracción de los recursos naturales del subsuelo, ya sea agua, petróleo o gas, son los factores disipadores más importantes del fracturamiento en zonas urbanas. Es importante remarcar que las variaciones espaciales y temporales en el descenso piezométrico dentro de una cuenca fluvio – lacustre pueden ser causadas por heterogeneidades a diferentes escalas: mineralógicas, estratigráficas o estructurales y la asociación de los diferentes factores determina la formación, el tipo y la propagación de fracturas (Carreón-Freyre, et al., 2006).

Identificación de amenazas.

La condición amenaza que tiene el consenso de expertos en Geo – temas y en Ingeniería es el efecto adverso del descenso del nivel de aguas freáticas por el bombeo del recurso para uso humano a profundidades específicas (García, et al., 2019).

Como se mencionó anteriormente, es importante conocer la evolución del estado de esfuerzos a lo largo del tiempo. Para ello, los Ingenieros Geotécnicos en la Ciudad de México han estudiado sistemáticamente el subsuelo de la ciudad por muchas décadas. Cuando comenzó la expansión urbana de la Ciudad de México en el siglo XVI, el antiguo lago fue desecado progresivamente y hoy en día casi ha desaparecido por completo. La desecación del lago, principalmente por desviar los



ríos que desembocaban ahí y por la reclamación de tierras, indujo un proceso de consolidación regional que se vio aumentado a mediados del siglo XIX cuando el agua comenzó a ser bombeada de los acuíferos que subyacen los suelos arcillosos, mientras aumentaba la población. De 1900 a 1920 la velocidad de asentamiento en el centro de la Ciudad de México fue 3 cm/año; para 1940 la velocidad era 13 cm/año y al principio de la década de los 50's alcanzó 26 cm/año (Tamez, et al., 1995). Los pozos en el centro de la Ciudad de México fueron clausurados en la década de los 60's y la velocidad de asentamiento disminuyó a 5 cm/año. A finales de la década de 1970 e inicios de la década de 1980 nuevos pozos fueron puestos en operación en las afueras, principalmente cerca de las montañas que rodean a la ciudad al norte y en el sur. Las velocidades de asentamiento incrementaron de nuevo y en el centro de la Ciudad de México aumentaron a 7-10 cm/año, pero en algunos sitios cercanos a los nuevos pozos se excedieron 30 cm/año. El hundimiento total en los últimos 100 años respecto a un punto de referencia fuera de la zona del lago es ahora de más de 8 metros en algunas áreas. El agua bombeada de los acuíferos provee cerca de dos tercios de la demanda y es muy poco probable que el bombeo disminuya o se detenga en el futuro, dada la tendencia de expansión urbana observada en las últimas décadas (Ovando-Shelley, et al., 2006; Mazari, 1996; Tamez, et al., 1997).

El bombeo intensivo para extraer agua del subsuelo de la Ciudad de México ha sido el responsable del hundimiento regional. El bombeo de agua produce consolidación regional, lo cual incrementa el actuar de los esfuerzos efectivos en el subsuelo, modificando las propiedades dinámicas y estáticas; al cambiar estas propiedades del suelo, entonces también cambia la respuesta dinámica (Ovando-Shelley, et al., 2007).

La subsidencia asociada a la extracción excesiva de agua subterránea se puede catalogar como un proceso destructivo para el entorno urbano con tres manifestaciones importantes (Santoyo, et al., 2005; Carreón-Freyre, et al., 2006; Cerca et al., 2012; Carreón-Freyre, et al., 2014; Hernández-Espriú, et al., 2014):

- El hundimiento de tipo regional; que distorsiona y desestabiliza a un enorme número de edificios y monumentos del patrimonio arquitectónico.
- El abatimiento del nivel del agua subterránea; con la consecuente reducción de la reserva hídrica.
- La contaminación del acuífero; con la infiltración de aguas negras o residuales provenientes de drenajes rotos, lixiviados de los rellenos de residuos sólidos sin protección.

Como se mencionó en el apartado de Mecanismos de fracturamiento, son diversos los factores que influyen en la generación de grietas. Sin embargo, la mayor influencia en la generación de grietas son las características geométricas y geológicas del basamento, aunadas al hundimiento regional debido al bombeo intensivo de agua subterránea. En la Figura 25 se ilustran y sintetizan las descripciones mencionadas anteriormente de Mecanismos de fracturamiento.

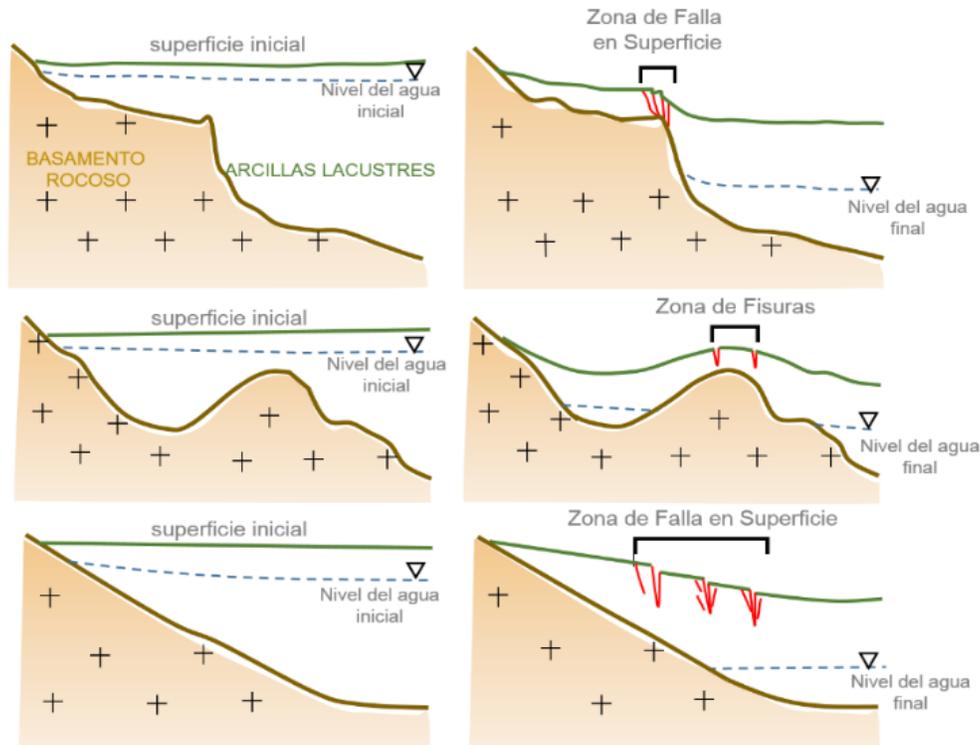


Figura 25. Escenarios posibles de origen (causas) del agrietamiento (Con permiso de impresión de García, et al., 2019).

IV.III Vulnerabilidad.

La Vulnerabilidad resiliente es una nueva noción (noción que puede parecer sorprendente porque es un neologismo) que introduce la idea que la resiliencia puede ser contingente, y no necesariamente tener un efecto negativo, y que la vulnerabilidad puede tener un efecto positivo cuando el cambio dirija hacia una transformación positiva. Esta noción se aplica al estudio de riesgos y desastres. Los riesgos y desastres han sido evocados en una gran cantidad de investigaciones dentro de tres conceptos: amenaza, vulnerabilidad y resiliencia; o el análisis de la vulnerabilidad de poblaciones, de áreas geográficas y territorios ocupados por el ser humano (Provitolo, 2012).

Múltiples definiciones de vulnerabilidad y resiliencia existen dentro de la literatura. No se ha aceptado una definición única. A pesar de que vulnerabilidad y resiliencia aparentemente pueden ser entendidas en relación con cada una, estos dos conceptos permanecen con múltiples definiciones que tienden a oscurecer su significado. Por ello, se deben presentar algunos de los distintos significados de vulnerabilidad y resiliencia teniendo en cuenta el contexto científico en el que aparecieron (Serre, et al., 2012).

Si el riesgo ha sido restringido al estudio de las amenazas, un cambio se hizo evidente en los años 50's con la aparición de la noción de vulnerabilidad. Desde entonces, esta noción de vulnerabilidad se ha vuelto cada vez más afirmada, mejorada y compleja. Las amenazas solas no pueden explicar la ocurrencia de un riesgo y las consecuencias de un desastre (Veyret, 2004).

Detrás del concepto de vulnerabilidad se encuentran tres enfoques. El primero examina la vulnerabilidad desde la perspectiva de la evaluación de daños (humanos, materiales, especies,



herencia); el segundo ve a la vulnerabilidad en términos de las capacidades de respuesta de un sistema sujeto a una amenaza (por ejemplo, sociedades humanas experimentando un disturbio); la tercera identifica áreas estratégicas y apuestas territoriales. En el primer caso, la vulnerabilidad es el resultado del impacto de las amenazas sobre el sistema. La comunidad científica habla acerca de la vulnerabilidad biofísica. En el segundo y tercer caso, las vulnerabilidades sociales y territoriales son identificadas y evaluadas independientemente de la amenaza (Serre, et al., 2012).

Basado en los diferentes enfoques de vulnerabilidad: biofísica, social y territorial, Provitolo, 2012, muestra que más allá de estos conceptos, la vulnerabilidad ha abierto el camino al concepto de resiliencia. A continuación, se examinan mejor los tres enfoques de vulnerabilidad para mostrar la postura en este tema de Provitolo, 2012.

Vulnerabilidad Biofísica

El término vulnerabilidad biofísica sugiere una componente física, una componente biológica para un sistema natural o una componente social para un sistema humano (Veyret, 2004). Tres factores influyen la vulnerabilidad biofísica de un sistema: la exposición de los elementos al evento, su resistencia y su sensibilidad. El nivel de exposición es aún defendido hoy en día por la naturaleza, magnitud y frecuencia de la amenaza y la proximidad de sociedades y territorios al área de amenaza. La resistencia es la posibilidad de un sistema de absorber o contener los efectos de un disturbio sin sufrir daño. Esto puede envolver la resistencia física de la infraestructura (el agua de una inundación golpeando un dique) o la resistencia física o mental de una persona o un grupo de individuos. La sensibilidad es el grado al cual las personas y lugares pueden ser dañados, más ampliamente la sensibilidad es entendida como el daño con el cual el sistema es obligado a incurrir. Por lo tanto, la vulnerabilidad biofísica se basa en la estimación del daño en términos de pérdidas, y raramente en términos de ganancias. Este enfoque subestima la dimensión social de la vulnerabilidad (Adger, 2006; Provitolo, 2012; Serre, et al., 2012).

Vulnerabilidad Social

La vulnerabilidad social es considerada como la capacidad de los sistemas vivos a anticipar, lidiar, manejar el evento y recuperarse. Es un estado que existe dentro de un sistema antes de que se confronte con una amenaza. Como tal, la vulnerabilidad social es inherente a un sistema y no depende de la exposición al disturbio ni a su intensidad. La investigación también ha sido hecha en identificar los factores determinando la vulnerabilidad social. La vulnerabilidad social depende del nivel de recursos (ingresos, capital, redes sociales) y del nivel de accesibilidad a créditos e información, factores culturales e institucionales, factores técnicos y de organización. Por lo tanto, involucra un acercamiento cualitativo que se enfoca en la identificación de factores de vulnerabilidad intrínsecos al sistema social estudiado. Sin embargo, el enfoque de la vulnerabilidad social no incluye el funcionamiento de territorios, los elementos estratégicos, tales como redes de áreas metropolitanas. Por ello, la literatura propone el concepto de vulnerabilidad territorial (Pigeon, 2005; Adger, 2006; Provitolo, 2012; Serre, et al., 2012).

Vulnerabilidad territorial

El objetivo de la vulnerabilidad territorial es identificar, caracterizar y priorizar áreas de las cuales la vulnerabilidad es generada y diseminada en un territorio. Es una pregunta de identificar ambas



áreas frágiles, busca saber del daño serio en caso de un desastre, y también los lugares probables que propaguen su vulnerabilidad en un territorio. La vulnerabilidad está ligada a los riesgos territoriales y no a la exposición de amenazas (Adger, 2006; Provitolo, 2012; Serre, et al., 2012).

Las ciencias humanas y sociales, y grupos interdisciplinarios de investigación desarrollaron el concepto de vulnerabilidad mostrando que los tres enfoques antes mencionados no son conflictivos. La vulnerabilidad tiene dos lados – es intrínseca al sistema, pero también varía con la capacidad del sistema a incurrir en un disturbio, a absorberla y reanudar el funcionamiento normal. Por ejemplo, las sociedades humanas son capaces de adaptarse a la amenaza, aprender, y por lo tanto modificar su exposición a la misma. Los reportes del 2001 y 2007 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) siguen la misma línea de pensamiento al definir a la vulnerabilidad como el grado en el cual un sistema es susceptible a, e incapaz de lidiar con, efectos adversos del cambio climático, incluyendo los extremos de variabilidad climática; la vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y velocidad del cambio climático y la variación a la cual un sistema es expuesto, su sensibilidad y su capacidad de adaptación. Esta noción de vulnerabilidad plantea el camino hacia la resiliencia (Provitolo, 2012).

Exposición

De acuerdo con el modelo de agrietamiento de García, et al., 2019, la exposición es la condición de desventaja debido a la ubicación, posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo. Los sistemas de infraestructura civil y las comunidades están sujetas continuamente a cambios en los ajustes urbanos y ambientales, evolucionando las expectativas y preferencias del público, ajustando los presupuestos, y circunstancias políticas impredecibles a lo largo de su vida útil. Es por lo que los sistemas de infraestructura civil y las comunidades tienen distinto grado de exposición al riesgo (Lee, et al., 2018).

La decisión de dónde vivir dentro de las ciudades es manejada por las compensaciones entre lo que es asequible, relacionado a las oportunidades de ganancias o ingresos, y donde los individuos podrían tener su círculo social. Típicamente, las áreas accesibles para los pobres son aquellas en las que otros consideran indeseables para motivos residenciales, o inutilizables para otras actividades urbanas. Los barrios marginales han resultado del allanamiento en las tierras vacantes o subdesarrolladas, o del deterioro de los vecindarios existentes tales como ciudades interiores y zonas industriales. Muchas, pero no todas, de las zonas urbanas pobres viven en barrios marginales que tienen la mayor concentración visible de gente pobre, con baja calidad en vivienda y servicios (Baker, 2012).

Las zonas marginales pueden ser inseguras y con falta de servicios, dos condiciones generadas por la falta de seguridad de tenencia. Estas zonas pueden estar en terrenos frágiles, peligrosos, o contaminados, que son propensos a inundaciones; en suelos inestables, tales como pie de talud o rellenos; en zonas cercanas a amenazas físicas o ambientales como desechos tóxicos urbanos e industriales, corredores de ferrocarril y líneas de alta tensión. Las viviendas son típicamente pequeñas, sobrepobladas, de calidad deficiente, pobres en condiciones estructurales, y localizadas en áreas altamente densas con diseños irregulares o al azar que carecen de servicios básicos. La inseguridad de tenencia pone a los pobres en un constante riesgo de desalojo, residentes



obstaculizando la inversión en mejoras a la vivienda y esfuerzos para proveer servicios (Serre, et al., 2012).

Exposición al agrietamiento en la zona de Iztapalapa

En el estudio realizado por García, et al., 2019, se identificaron las regiones cuyo basamento rocoso tuvieran pendientes significativas que pudieran agravar la concentración de esfuerzos en capas más superficiales. Es importante resaltar las zonas en las que estos cambios de espesor son muy drásticos, pues significan las peores manifestaciones.

En el mapa presentado en la Figura 26, las regiones en mayor exposición son aquellas en las que se transita de espesores muy menores a potentes estratos de suelos plásticos en pocos metros, estas regiones más expuestas son las superficies verdes. Particularmente, se señala en el mapa el sujeto en estudio que se presenta en el Capítulo V; se observa que está ubicado en una zona verde, donde se tiene registrada una grieta de antes del sismo del 19 de septiembre de 2017.

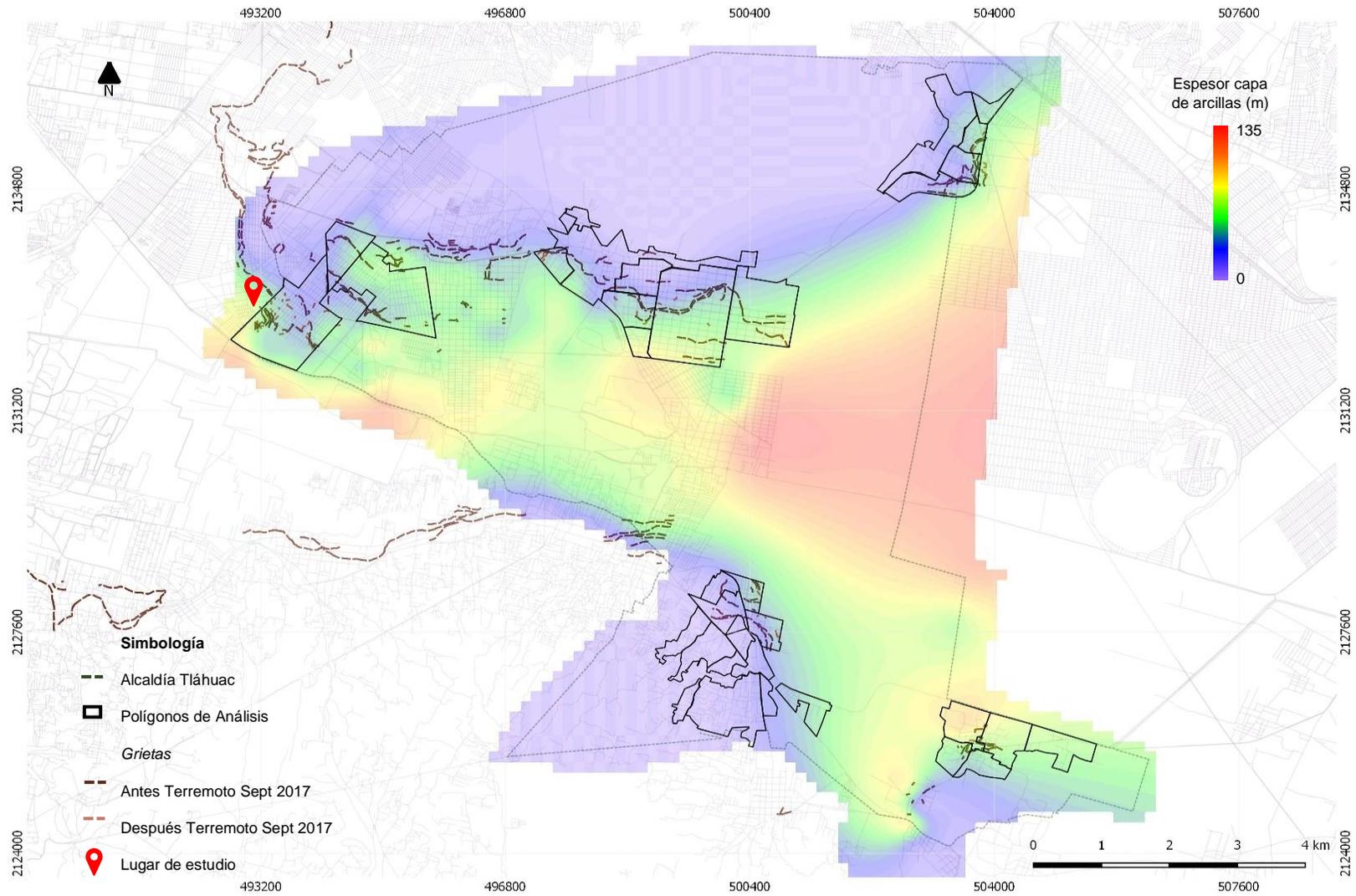


Figura 26. Información sobre espesor de los estratos de arcillas (Con permiso de impresión de García, et al., 2019).



Susceptibilidad

La susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso.

De acuerdo con las experiencias y conocimientos generados en el estudio de García, et al., 2019, la confición heterogeneidad (fuente parametrizada con materiales, contenidos de agua y arreglos estratigráficos – geometría) fue elegida la particularidad a definir. Asimismo, se decidió que las características y las circunstancias de las regiones involucradas en el estudio que incrementan la vulnerabilidad al agrietamiento están contenidas en los escenarios de la heterogeneidad de los paquetes más superficiales de los suelos de cimentación. Los arreglos, además de ser heterogéneos en los geométrico (las capas de suelo no son horizontales ni continuas), como sistema son configuraciones cuyas mineralogías y contenidos de agua elevan la susceptibilidad a agrietarse. Se detectaron los siguientes mecanismos:

1. Grietas por fractura hidráulica (zonas de encharcamientos).
2. Grietas por transición abrupta.
3. Grietas por contactos (heterogeneidad).
4. Grietas por evapo-transpiración.
5. Grietas por estructuras sepultadas.

García, et al., 2019, establecieron que, si se reconoce que los materiales son potencialmente “agrietables”, es importante señalar en el espacio cuáles son las regiones donde esta condición “Exposición” y “Susceptibilidad” responde en escalas mayores ante el efecto dañino de la amenaza (o amenazas). Como parte del estudio, se construyeron mapas de susceptibilidad al agrietamiento, para esto se estudiaron respuestas y simulaciones en árboles de clasificación y regresión (CART) que permitieran calificar o cuantificar el grado de fragilidad interna de los sujetos.

En la Figura 27, se muestra uno de los mapas de susceptibilidad elaborado en el estudio de García, et al., 2019. El mapa muestra la susceptibilidad por exposición – transición/basamento, el cual completa la información presentada en la Figura 26 sobre las regiones con mayor exposición, que se relacionan con las regiones con mayor susceptibilidad al agrietamiento.

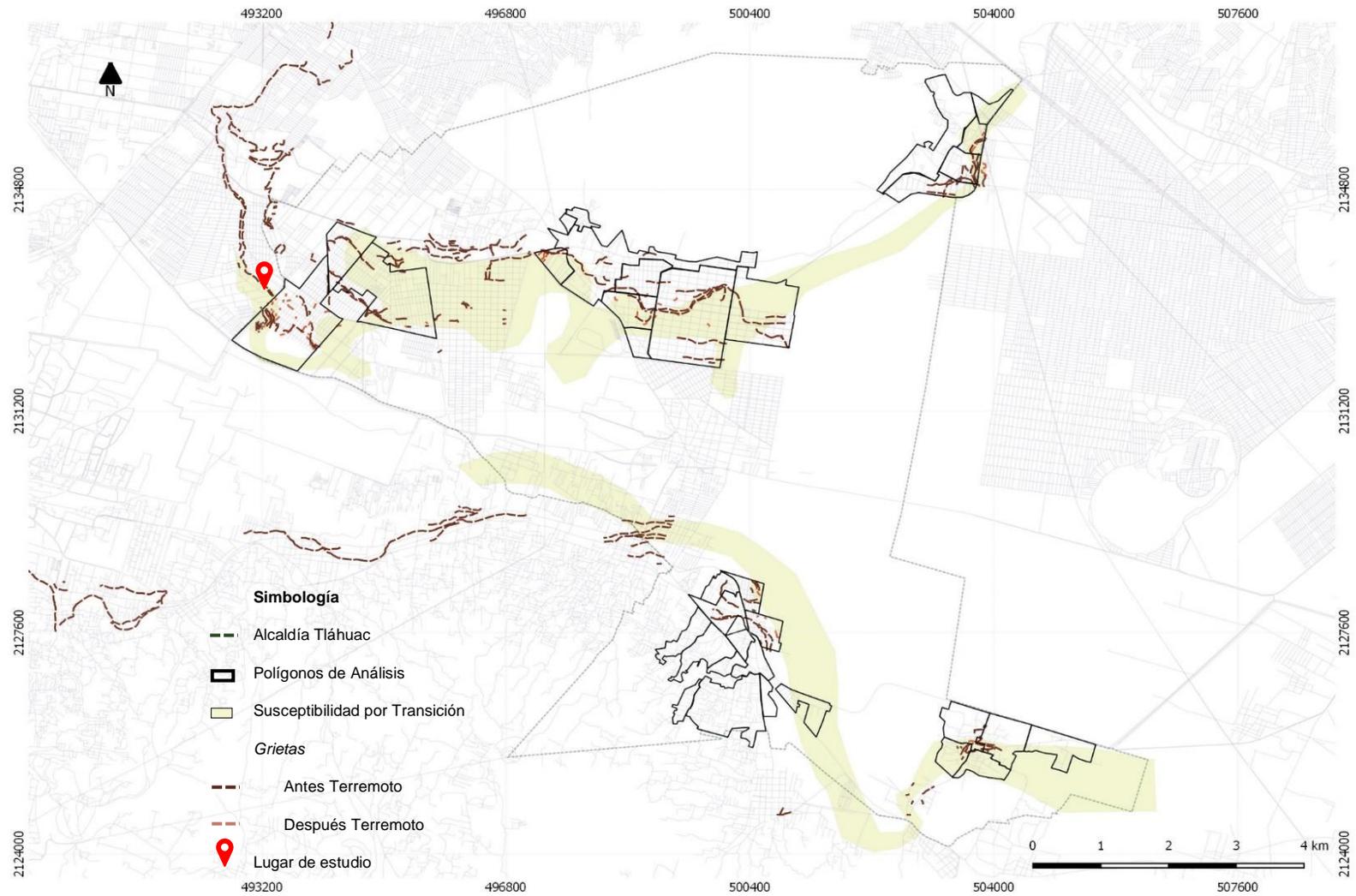


Figura 27. Mapa de Susceptibilidad por Exposición - Transición/Basamento (Con permiso de impresión de García, et al., 2019).



Resiliencia

La resiliencia es un concepto de la física que ha sido transferido a las ciencias sociales a través de la ecología. En el curso de estas transferencias entre ciencias, el concepto se ha diversificado y ahora tiene más de un significado (Provitolo, 2012).

Múltiples actividades necesitan ser tomadas en consideración para mejorar la resiliencia a las amenazas naturales. Algunas son estratégicas (planes de inversión a largo plazo), otras apuntan a la preparación y respuesta (por ejemplo, planes, capacidad y preparación para respuesta a emergencias, alertas), o capacidad de absorción de impactos, por ejemplo, adaptar las características tecnológicas y modo operacional de la infraestructura crítica a las condiciones cambiantes en su vida útil (Baker, 2012).

Desde el punto de vista de la ecología, la resiliencia es un concepto clave para analizar ecosistemas. En 1973, Holling la definió como la capacidad de un ecosistema de integrar un disturbio sin modificar su estructura cualitativa. Por lo tanto, la resiliencia expresa tanto la capacidad de un sistema de resistir durante el disturbio, como su capacidad de confrontarlo, de recuperarse y regenerarse (por ejemplo, el crecimiento de un bosque después de un incendio o tormenta). La definición anterior es similar al concepto de vulnerabilidad social presentado anteriormente. Esta capacidad dual de resistir y recuperarse, sin cambio alguno en la estructura, puede en efecto ser aplicada a diferentes sujetos de estudio, ya sean poblaciones, sociedades, o ciudades por ejemplo (Provitolo, 2012; Serre, et al., 2013).

Desde la década de los 80's, dos enfoques han entrado en conflicto. Uno de ellos – un sistema resiliente es un sistema estable que está cerrado en un estado permanente de equilibrio. La resiliencia es la capacidad de un sistema que incurre un choque brutal o presión continua para sostenerse sin cambios; es medida por su resistencia y la rapidez del regreso al equilibrio, esto es conocido como Ingeniería de Resiliencia. El segundo enfoque – un sistema resiliente es aquel que mantiene sus funciones esenciales y estructuras al moverse a través de diferentes estados de equilibrio (estable e inestable), esto es Resiliencia de Ecosistema o Resiliencia Ecológica (Pimm, 1984; Provitolo, 2012; Serre, et al., 2013).

El concepto de Resiliencia de Ecosistema se adapta mejor al estudio de sistemas adaptativos complejos, ya que puede ir más allá del paradigma del equilibrio único. De hecho, un sistema complejo es un sistema abierto a su ambiente (en el significado sistémico del término) que puede teóricamente moverse hacia un equilibrio, pero también puede cambiarse hacia soluciones estacionarias estables o inestables que están lejos del equilibrio. Por supuesto, todos los sistemas complejos no son adaptativos, pero todos aquellos que involucran sociedades vivas lo están. Esta es la razón por la que la investigación en las humanidades y ciencias sociales o en campos interdisciplinarios ha permitido mejorar el concepto de resiliencia (Cutter, et al., 2008; Dauphiné & Provitolo, 2007; Gallopin, 2006; Maret & Kadoul, 2008; Provitolo, 2012).

Resiliencia Sistémica

Las investigaciones transdisciplinarias preocupadas con las interacciones sociedad/naturaleza, presiones sociales y ambientales, son desarrolladas en la Alianza de Resiliencia. La Alianza de Resiliencia es un grupo de investigación multidisciplinario que estudia la dinámica de sistemas



complejos adaptativos, y ha avanzado particularmente el concepto de resiliencia a través del desarrollo de la idea de la Resiliencia Sistémica. Esto se aplica a todos los sistemas físicos y sociales. La Resiliencia Sistémica va más allá de la mera idea de la resistencia al cambio y la preservación de las estructuras existentes, prefiriendo las ideas de renovación de sistema, reorganización y emergencia de nuevas trayectorias (Berkes & Folke, 1998; Berkes, et al., 2003; Gunderson & Holling, 2002; Holling, 2001; Kasperson, et al., 1995; Klein, et al., 1998; Smith & Wandel, 2006).

La Resiliencia Sistémica es interpretada por modelos estilizados del ciclo adaptativo y panorámico. Estos modelos se enfocan en las diferentes trayectorias seguidas por un sistema. El modelo panorámico es una representación estilizada para entender las transformaciones multinivel en sistemas naturales y humanos. Es un modelo de transición entre diferentes estados estacionarios: las conexiones entre niveles son hechas vía dos trayectorias: la primera es “revuelta”, representando la transición de la fase del colapso a la fase de conservación; la segunda es la trayectoria del “recuerdo”, es la trayectoria directa de la fase de conservación a la fase de reorganización. Dentro del modelo panorámico, las estructuras y procesos están vinculados a través de escalas. El enfoque multiescala de este modelo heurístico implica que la desaparición de un subsistema puede revelar la capacidad resiliente de un metasistema (Gunderson & Holling, 2002; Walker, et al., 2004; Cutter, et al., 2008).

Por lo tanto, la Resiliencia Sistémica es un concepto bien adaptado al manejo de riesgos, con una dimensión física y social. Sin embargo, de nuevo la definición no es claramente distinta a la de Vulnerabilidad expuesta anteriormente. Estudiar la vulnerabilidad de una población o sistema es también analizar su capacidad para recuperarse de una situación. Y, sin embargo, la renovación de un sistema, su reorganización, o incluso la aparición de nuevas trayectorias (todas las nociones relacionadas al concepto de resiliencia) son propiedades de recuperación (una propiedad relacionada a la idea de vulnerabilidad). Surge un área de superposición entre los conceptos de vulnerabilidad, resiliencia y sus determinantes (como exposición, resistencia, sensibilidad, capacidad de adaptación, adaptación, etc.) (Provitolo, 2012; Serre, et al., 2013).

Por último, esta noción de Resiliencia Sistémica complementa el concepto de Vulnerabilidad Resiliente presentada al inicio del presente apartado IV.III, del actual capítulo. Con las nociones de ambos conceptos Provitolo, 2012, desarrolló un modelo sistémico de riesgo basado en la Vulnerabilidad Resiliente; asimismo, su modelo surge de cuestionar la relación del trío Vulnerabilidad-Evento-Resiliencia.

En la Figura 28, se observa un esquema del modelo planteado por Provitolo, 2012. El objetivo del autor al plantear el modelo es proveer un marco de referencia conceptual que pueda ser usado para un análisis global de la Vulnerabilidad Resiliente de elementos puestos en juego por los diferentes eventos. El modelo conceptual distingue la parte fáctica que describe el contexto (los elementos y eventos) y representando lo que sucedió (por ejemplo, 30 personas fallecieron en un edificio), de la parte de la Vulnerabilidad Resiliente, que describe los potenciales, capacidades y reacciones de un sistema para protegerse de un desastre por un ambiente completamente temporal (antes y durante el evento, y después del impacto del desastre). Esta Vulnerabilidad Resiliente varía con el tiempo, de un país a otro, dependiendo del medio ambiente, contextos geográficos, espaciales, institucionales, políticos y sociales (Provitolo, 2012).

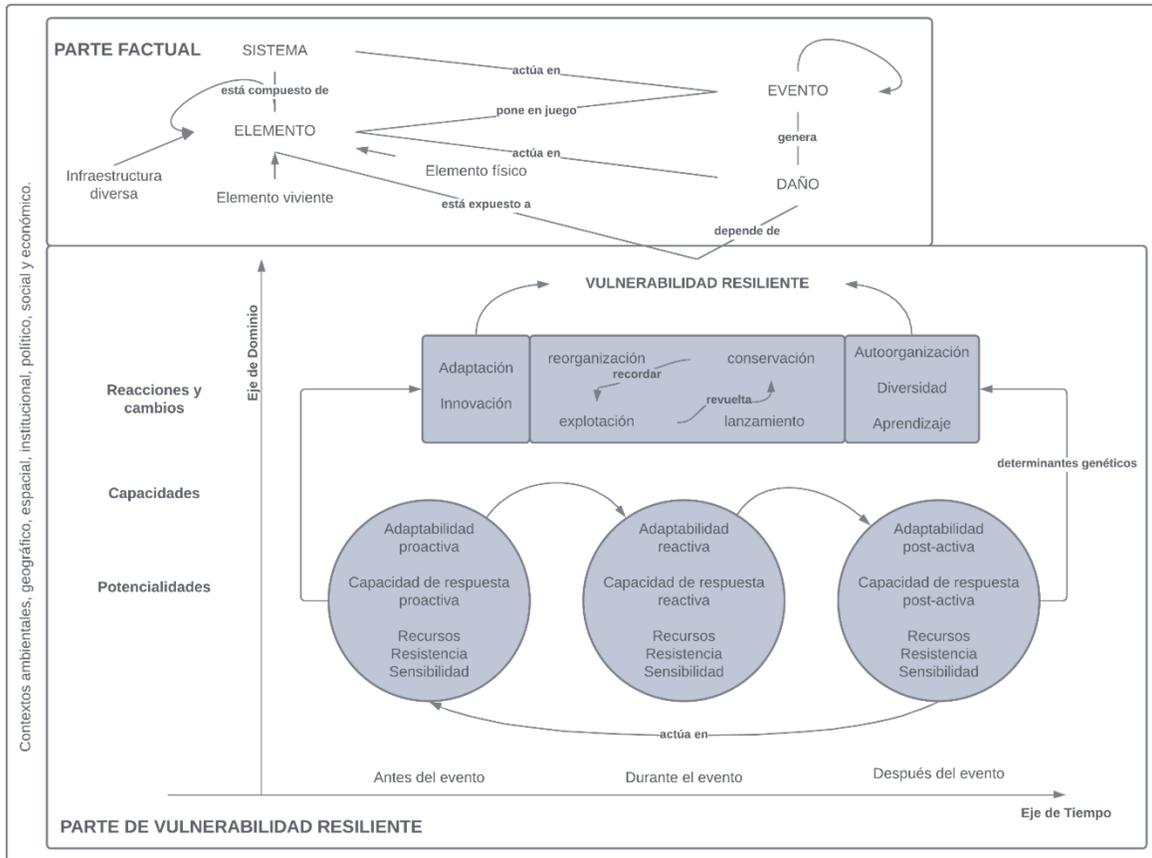


Figura 28. Modelo sistémico de Riesgo basado en la noción de Vulnerabilidad Resiliente (Obtenido de Provitolo, 2012).

Es importante explicar los dos ejes que componen la parte de Vulnerabilidad Resiliente del modelo: el eje temporal y el eje dominante. El eje temporal distingue tres ambientes temporales: antes, durante y después del evento. El eje dominante describe tres fases: los potenciales, capacidades y reacciones de un sistema para protegerse de un evento en un ambiente completamente temporal. Este modelo hace la distinción entre lo que está disponible, lo que puede ser hecho y lo que está realmente hecho. Las tres fases (potenciales, capacidades y reacción) están estrechamente unidas, en el sentido que las reacciones y cambios están limitados por las capacidades (por ejemplo, lo que se puede hacer) y los potenciales (por ejemplo, recursos disponibles). Las capacidades son actualizadas cuando corresponden a reacciones de un sistema (Provitolo, 2012).

La revisión de la literatura consultada revela que existen diferentes definiciones y tipos de vulnerabilidad y resiliencia. Las definiciones de los conceptos tienen implicaciones importantes en la elección de marcos de referencia, teorías, metodologías y herramientas, así como en los resultados de evaluación de vulnerabilidad y resiliencia de territorios. El modelo de riesgo por agrietamiento utilizado en el estudio de García, et al., 2019, puede ser explicado con el Modelo Sistémico de Riesgo planteado por Provitolo, 2012, pues los conceptos presentados se basan en la noción de Vulnerabilidad Resiliente, útiles para el modelo de riesgo por agrietamiento.



CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En los capítulos anteriores se presentó el Marco Teórico, orientado a las condiciones geotécnicas que se encuentran en la Alcaldía Iztapalapa, principalmente en la zona sur de ésta. El objetivo del presente capítulo es introducir el caso de estudio, que se encuentra en esta Alcaldía de la Ciudad de México. El caso es una unidad habitacional ubicada en la colonia La Planta, en la Alcaldía Iztapalapa. La problemática que afecta a la unidad es un sistema de grietas en el suelo, mostrado en algunos mapas del capítulo IV, en el apartado de Susceptibilidad. A continuación, se presenta a la unidad habitacional desde sus generalidades geográficas, información arquitectónica, geotécnica y estructural.

Es importante mencionar que la información que se presenta fue proporcionada por el despacho “PG Ecotur, S.A. de C.V.”, a cargo del M.I. Francisco Javier Paniagua Medina, quien colaboró como encargado del proyecto geotécnico en el Proyecto de Rehabilitación de la Unidad Habitacional Molino 25 liderado por “PRO-GPIC & BROS S.A. de C.V.”. Dicho proyecto de rehabilitación fue presentado a la Comisión para la Reconstrucción del Gobierno de la Ciudad de México en el 2020, se cita en el apartado de Referencias.

V.I Generalidades

Ubicación

La Unidad Habitacional “Molino 25” se ubica al oriente de la Ciudad de México, en el extremo Sur de la Alcaldía de Iztapalapa. El predio que ocupa está delimitado al NE por el Andador Unión (peatonal), al SE por predios particulares y la cerrada Del Molino, al NW por un predio particular (taller), y al SE por la Calle Molino. La Unidad pertenece a la colonia La Planta, de la Alcaldía Iztapalapa. En la Figura 29 se presenta un croquis de localización del predio.

Coordenadas:

- 19°17'35.4"N, 99°03'54.2"W
- 19.293176, -99.065048



Figura 29. Ubicación de la Unidad Habitacional Molino 25 (Croquis con permiso de impresión de García, et al., 2019).

Características Arquitectónicas

La Unidad Habitacional Molino 25 está compuesta por 12 edificios, de 3 niveles, conformada en módulos que trabajan de manera independiente. Existen 3 tipos de módulos: el primero consta de 24 departamentos, el segundo cuenta con 12 departamentos, y el tercero tiene 6 departamentos. A continuación, se muestra un resumen de los módulos que conforman la unidad:

- Edificio 3C-4C-5C-6C
Módulo Tipo I con 16 departamentos por planta. Tres Niveles. 48 departamentos en total.
- Edificio 2A-1B-2B-4A
Módulo Tipo I con 16 departamentos por planta. Tres Niveles. 48 departamentos en total.
- Edificio 1A-3A
Módulo Tipo II con 8 departamentos por planta. Tres Niveles. 24 departamentos en total.
- Edificio 1C
Módulo Tipo III con 2 departamentos por planta. Tres Niveles. 6 departamentos en total.
- Edificio 2C
Módulo Tipo III con 2 departamentos por planta. Tres Niveles. 6 departamentos en total.

Total 132 departamentos.

En la Figura 30 se muestra la planta de conjunto de la unidad, donde se identifican los módulos que la componen; asimismo, se muestra la numeración de los 12 edificios. En la Figura 31 se muestra una imagen aérea de la unidad, con la identificación de sus edificios y colindancias.

- I Módulo Tipo I = 24 Dptos.
 - II Módulo Tipo II = 12 Dptos.
 - III Módulo Tipo III = 6 Dptos.
- 72 Dptos. en total



Figura 30. Planta de Conjunto de la Unidad Habitacional Molino 25, se observan los módulos que la conforman (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).



Figura 31. Vista aérea de la Unidad Habitacional Molino 25, se observan los módulos y las colindancias de la unidad (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Cortes arquitectónicos

En la Figura 32 se muestran las fachadas principales de cada módulo (se observan los 3 niveles que conforman cada edificio).

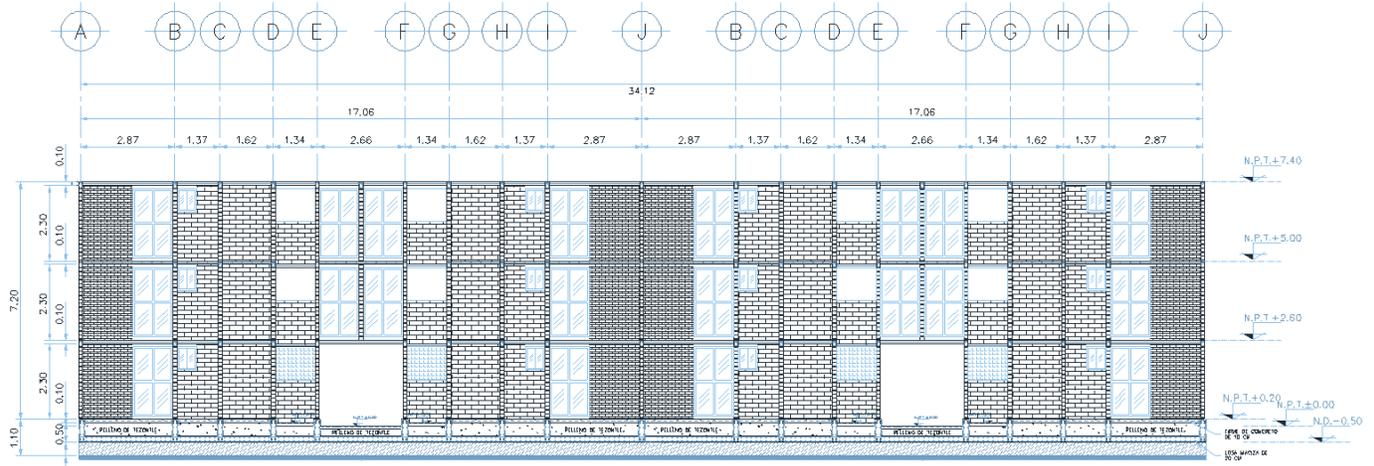


Figura 32. Fachada principal Módulo II (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

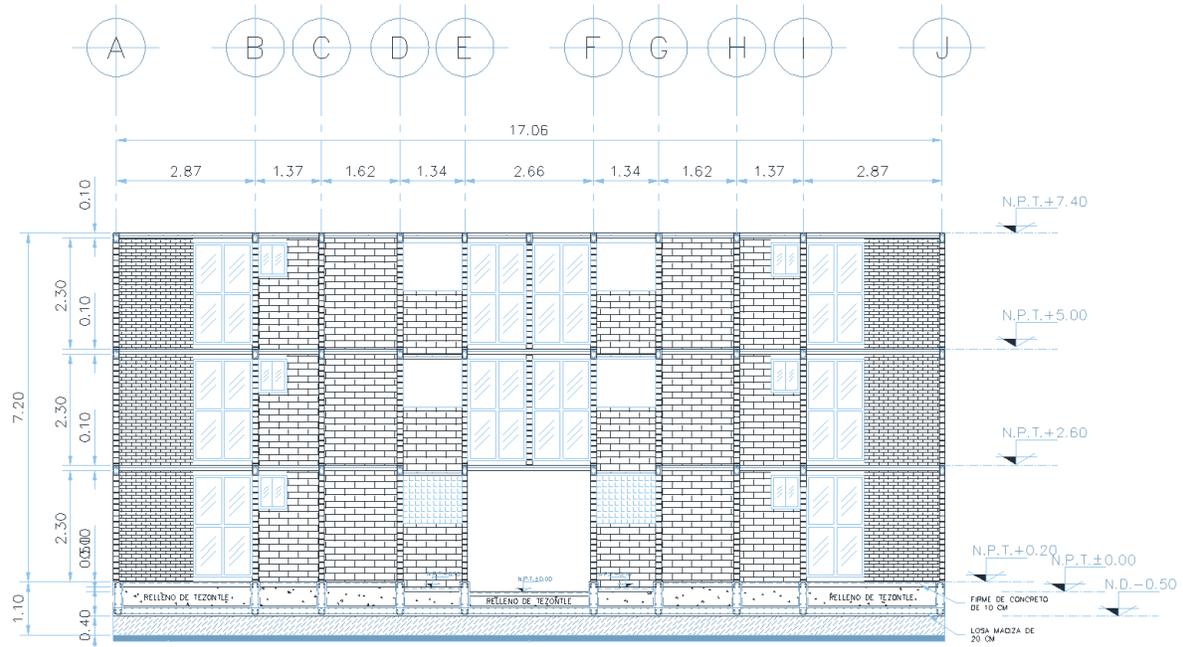


Figura 33. Fachada principal Módulo II (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

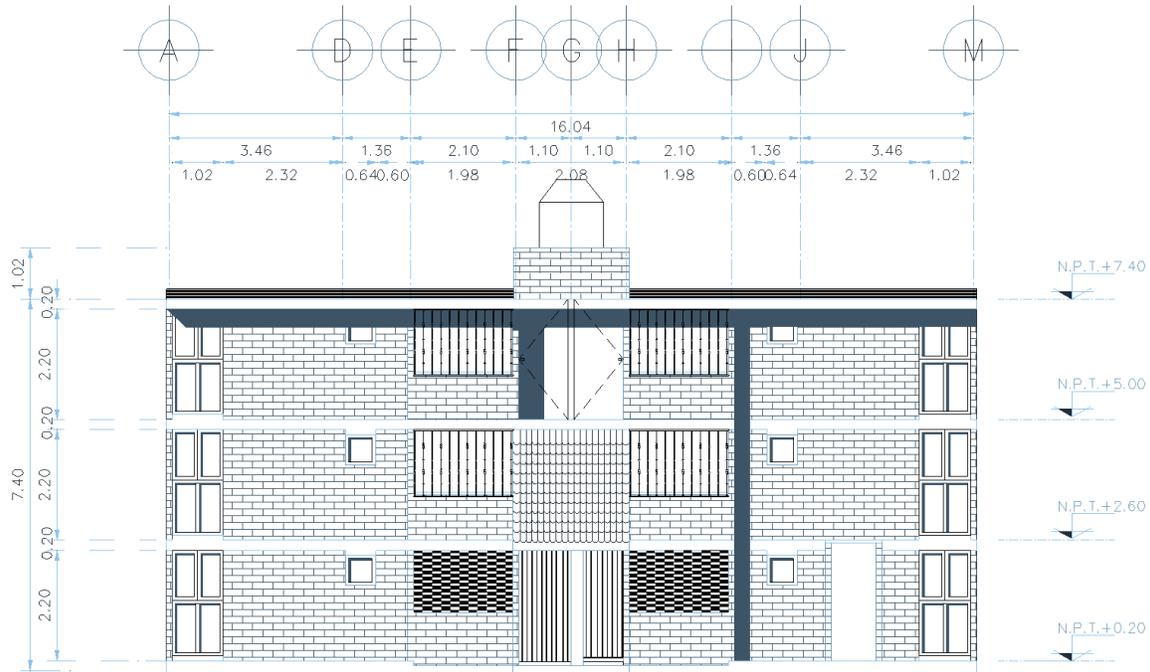


Figura 34. Fachada principal Módulo III (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

V.II Características Geotécnicas

En este apartado se definirán las características geotécnicas presentes en la Unidad Habitacional Molino 25, producto de la campaña de exploración geotécnica realizada por PRO-GPIC S.A. de C.V., 2020. Asimismo, se mencionan las características que establece el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, en las diferentes Normas Técnicas Complementarias, para establecer un marco de referencia.

Zonificación Geotécnica

De acuerdo con el Mapa de Zonificación Geotécnica, establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC-DCC), del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal 2017, que se reproduce en la Figura 35 con la ubicación de la unidad habitacional, la Unidad Habitacional Molino 25 se ubica en Zona de Lago o Zona III. De acuerdo con las NTC-DCC 2017, las características de la Zona del Lago son las siguientes:

- c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

- Losa tapa de concreto reforzado, de 0.10 m de espesor.
- Celdas rellenas con tezontle. Sobre dicho relleno se coló la losa tapa, reforzada con malla electrosoldada.

En la figura 36 se muestra un acercamiento de la fachada principal del Módulo II, donde se observan las características de la cimentación mencionadas previamente. Esta solución de cimentación fue empleada en los tres módulos que conforman la unidad

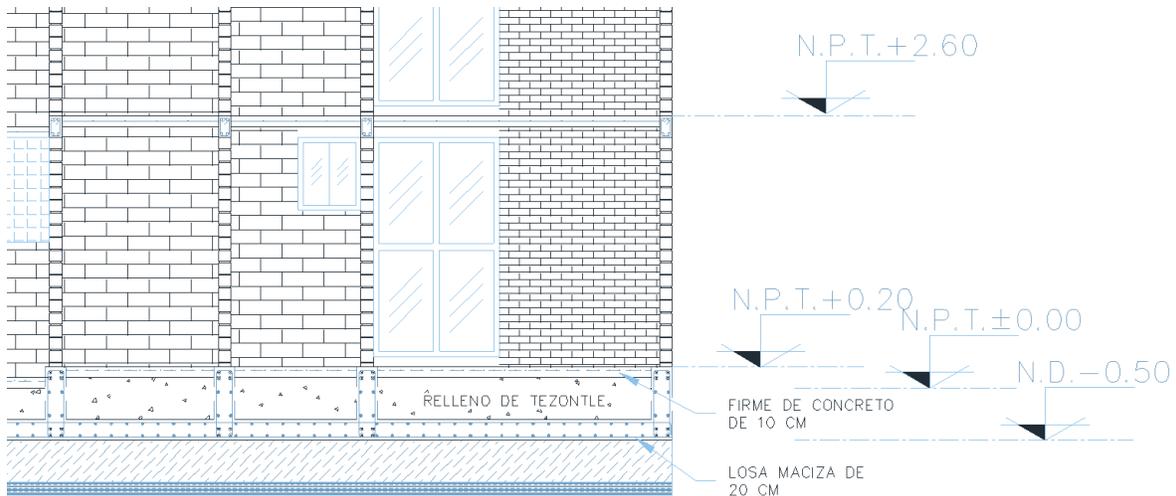


Figura 36. Acercamiento de la fachada principal del Módulo II, se observa la cimentación empleada en cada uno de los módulos (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Características Geotécnicas de los Cajones de Cimentación

Cuando se está en el proceso de diseño, el diseñador debe dimensionar los elementos estructurales que componen a la cimentación, de manera que se satisfagan algunos requisitos básicos. El requisito principal es que los esfuerzos que transmita la cimentación al terreno de apoyo deben ser compatibles con la resistencia al corte, dentro de un factor de seguridad. Por otro lado, también es importante que las deformaciones que sufran el terreno y la estructura por la aplicación de estos esfuerzos deben ser tolerables para la estructura misma y para las estructuras o instalaciones colindantes. Por lo tanto, se debe determinar la capacidad de carga admisible del suelo y también los asentamientos que sufrirá el terreno de apoyo.

Un cajón de cimentación utiliza una losa de cimentación reforzada con trabes, construyendo una cimentación celular o de marcos rígidos. El refuerzo de las contratrabes se utiliza para rigidizar la estructura de cimentación y evitar que se produzcan grandes asentamientos diferenciales. Los cajones de cimentación ayudan también a reducir el asentamiento de las estructuras situadas sobre depósitos muy compresibles (Figura 37). Bajo estas condiciones, la profundidad a la que está desplantada la losa se hace a veces tan grande, que el peso de la estructura más el de la losa está completamente compensado por el peso del suelo excavado. Entonces, el asentamiento de la estructura sería casi insignificante. Cuando resulta impracticable hacer una compensación total,

puede colocarse una losa menos profunda, si el aumento neto en la carga es suficientemente pequeño como para producir asentamientos tolerables (Tamez, 2001; Peck et al., 2004).

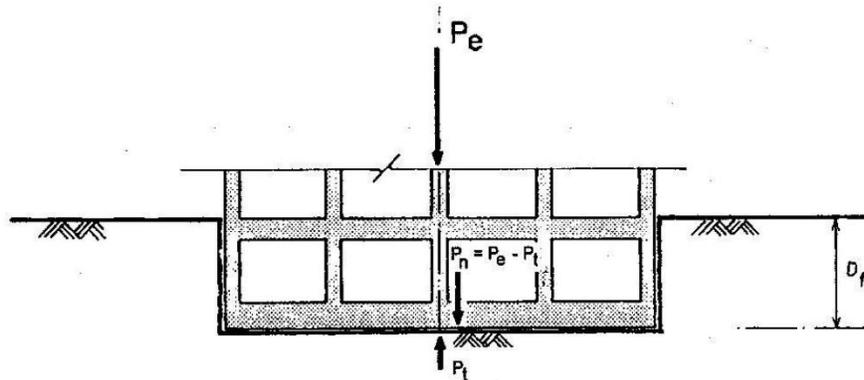


Figura 37. Cimentación sobre cajón (Obtenida de Tamez, 2001).

Modelo Geotécnico de la Unidad Habitacional

Como parte de los estudios del Proyecto de Rehabilitación de la Unidad Habitacional Molino 25, realizado por PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020, se realizó una campaña de exploración geotécnica dentro de la unidad, para conocer las propiedades y la estratigrafía del suelo, y así generar el modelo geotécnico. En la Figura 38 se muestra la ubicación de los sondeos realizados y la nomenclatura utilizada para diferenciarlos. La campaña de exploración geotécnica consistió en la ejecución de 5 sondeos, de los cuales son: 2 Sondeos de Penetración Estándar (SPE), 2 Sondeos de Cono Eléctrico (SCE), y 1 Sondeo Mixto (SMX) el cual combina la prueba de penetración estándar con el muestreo inalterado empleando tubos tipo “Shelby” hincados a presión.

Con los resultados de los sondeos ejecutados, PRO-GPIC S.A. de C.V., 2020, realizó los perfiles estratigráficos de cada sondeo. Posteriormente, realizaron algunos cortes estratigráficos en diferentes direcciones correlacionando los perfiles de los sondeos. Para efectos del presente capítulo, se tomaron solamente 2 cortes estratigráficos que se consideran los más representativos. En la Figura 39 se muestra la planta con la ubicación de los dos cortes estratigráficos.

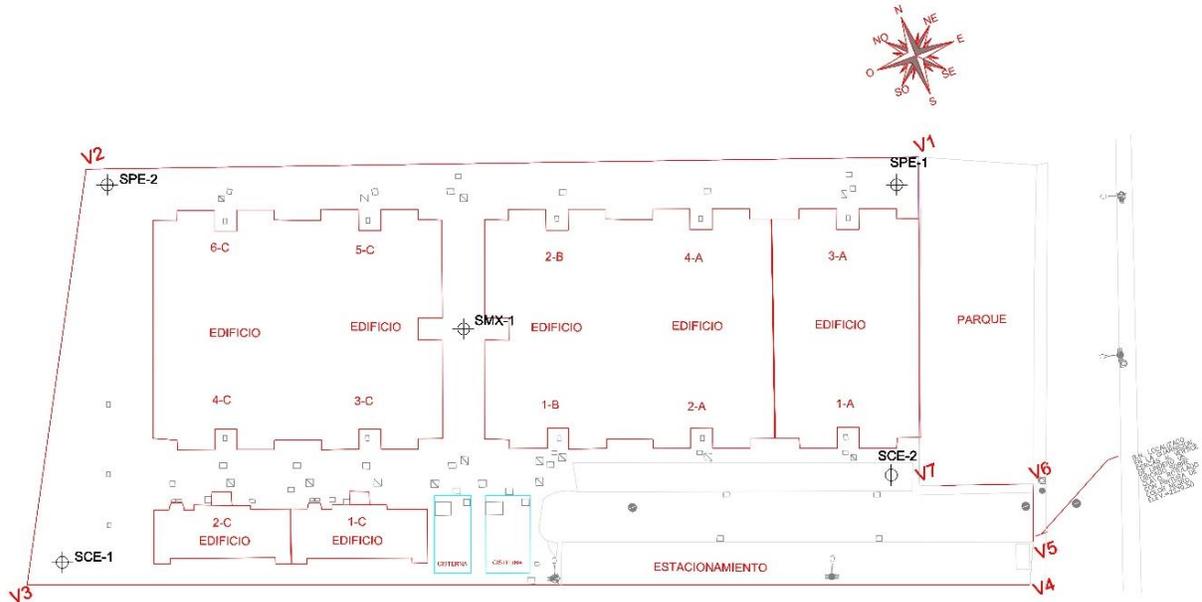


Figura 38. Planta de ubicación de los sondeos ejecutados en la Unidad Habitacional Molino 25 (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

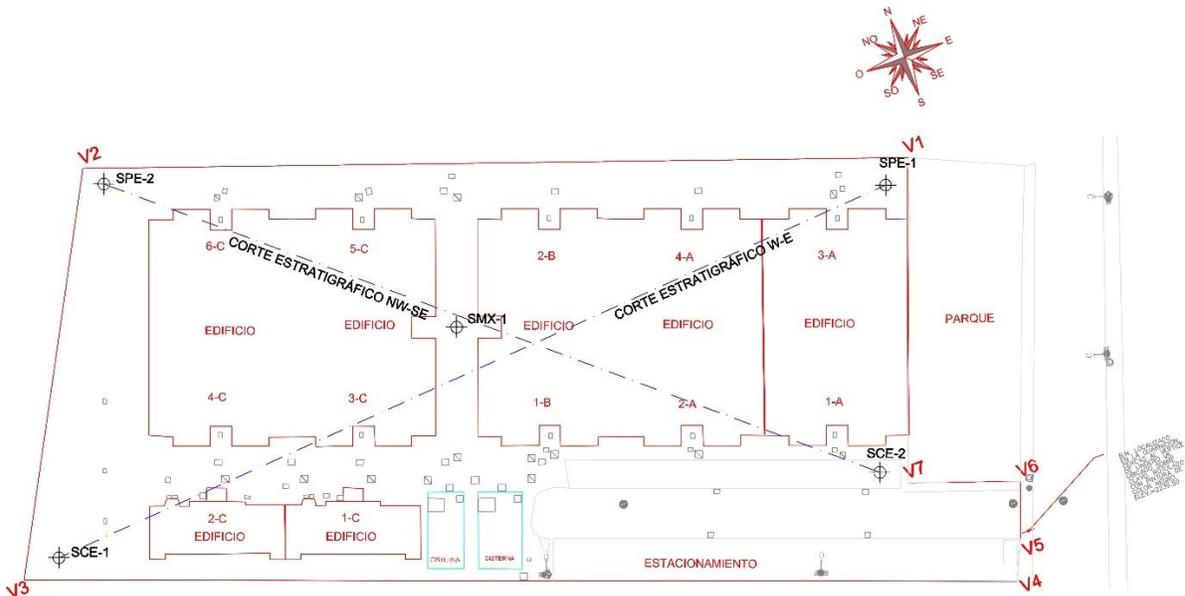


Figura 39. Planta de ubicación de los cortes estratigráficos más representativos (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Hasta la profundidad explorada en los estudios geotécnicos (64.0 m de profundidad) se detectaron 4 unidades estratigráficas principales:

- Formación Arcillosa Superior.
- Capa Dura.
- Formación Arcillosa Inferior.
- Depósitos Profundos.



Las dos formaciones arcillosas se correlacionan con la secuencia lacustre que corona la columna estratigráfica de la cuenca de México y está separada por la capa dura formada a partir de las últimas erupciones provenientes del cerro de San Miguel en la región central de la Sierra de las Cruces. Debido a la posición geomorfológica del basamento, en los puntos en donde se realizaron las perforaciones más profundas, no se encontraron definidos los materiales característicos, mientras que los depósitos profundos se correlacionan con la secuencia aluvial que rellena parcialmente la cuenca y que se formó a partir del cierre de ésta. Intercaladas con las formaciones arcillosas se encuentran horizontes más duros correlacionados con las emisiones volcánicas más recientes. Son cenizas y pómez, pero también pueden corresponder a capas arenosas-limosas aluviales; estos horizontes son más importantes a medida que se acerca a la zona de transición, al Norte de la zona estudiada.

El espesor de las formaciones arcillosas compresibles sobreyacen a los Depósitos Profundos, aumenta de Norte a Sur, y ligeramente en el sentido transversal aumentan de oriente a poniente, lo cual es consistente con el modelo estratigráfico conocido para la Cuenca de México, es decir, que los depósitos profundos se correlacionan con la secuencia aluvial en donde los espesores de las diferentes capas aluviales van creciendo en el sentido del depósito, y cómo éstas se formaron a partir de los aluviones arrastrados por los ríos desde las elevaciones montañosas circundantes, como son el Cerro del Peñón, y Cerro de la Caldera, principalmente. En la Figura 39 se muestra el corte estratigráfico realizado en la dirección W-E, se consideraron los perfiles estratigráficos de los sondeos: SCE-1, SMX-1, y SPE-1. Asimismo, en la Figura 40 se muestra el corte estratigráfico correspondiente a la dirección NW-SE, donde se tomaron los perfiles estratigráficos de los sondeos: SPE-2, SMX-1, y SCE-2.

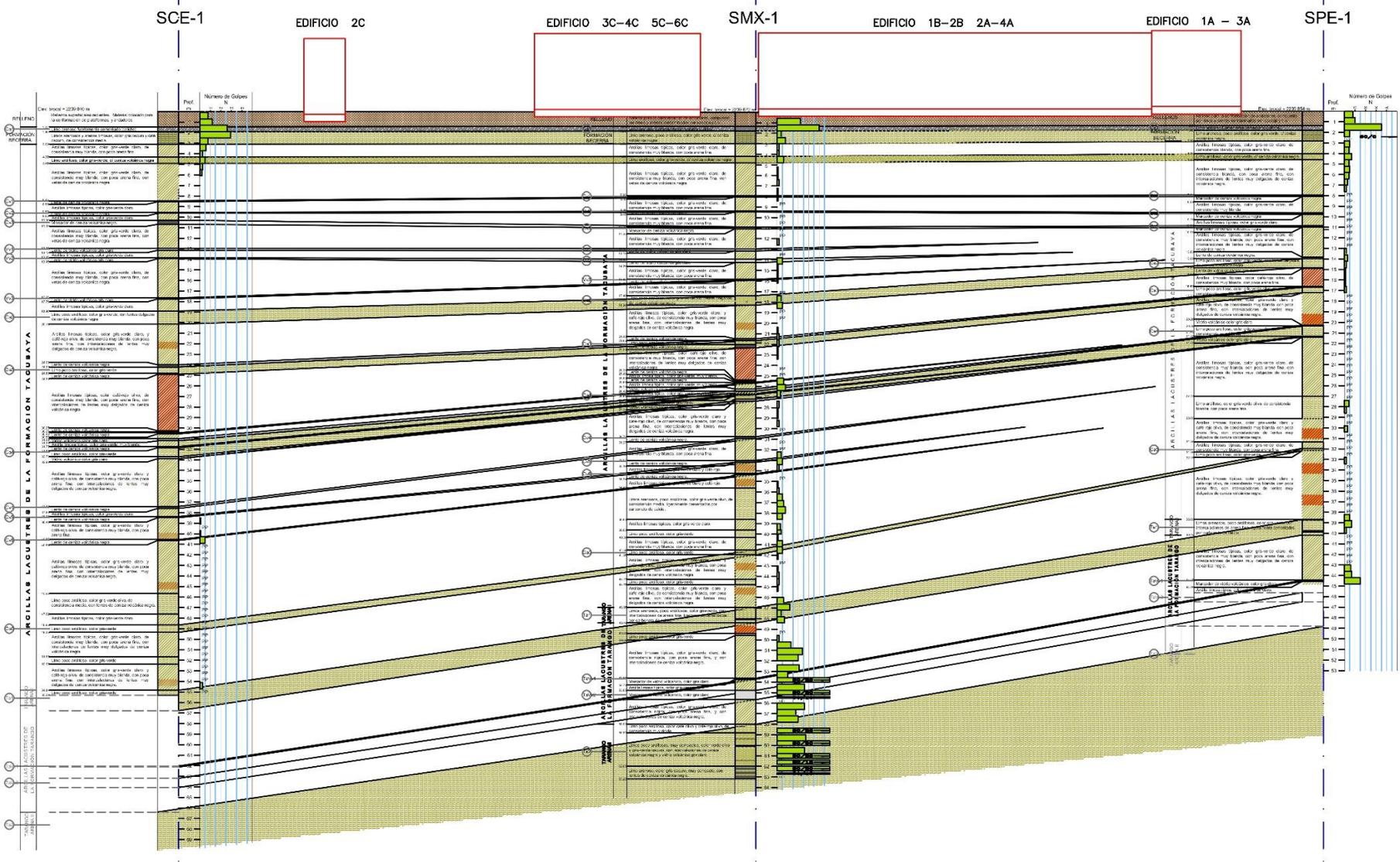


Figura 40. Corte estratigráfico de la Unidad Habitacional Molino 25 en la dirección W-E (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

V.III Características Estructurales

La Unidad Habitacional Molino 25 consta de 3 tipos de Módulos. Como se ha mencionado en el capítulo, los módulos cuentan con cimentación y estructura independiente. Cada módulo está conformado por 3 niveles destinados a uso habitacional.

Estructuración

De acuerdo con el levantamiento estructural realizado por PRO-GPIC S.A. de C.V., 2020, la superestructura de los módulos está conformada por muros de mampostería reforzada interiormente. En la Figura 41 se observa la configuración tipo de los muros, que consta de refuerzo horizontal y vertical; también se muestran los dos tipos de tabiques empleados: multiperforado estructural y de doble hueco, ambos tabiques tienen dimensiones estándar: 12x12x24 cm.

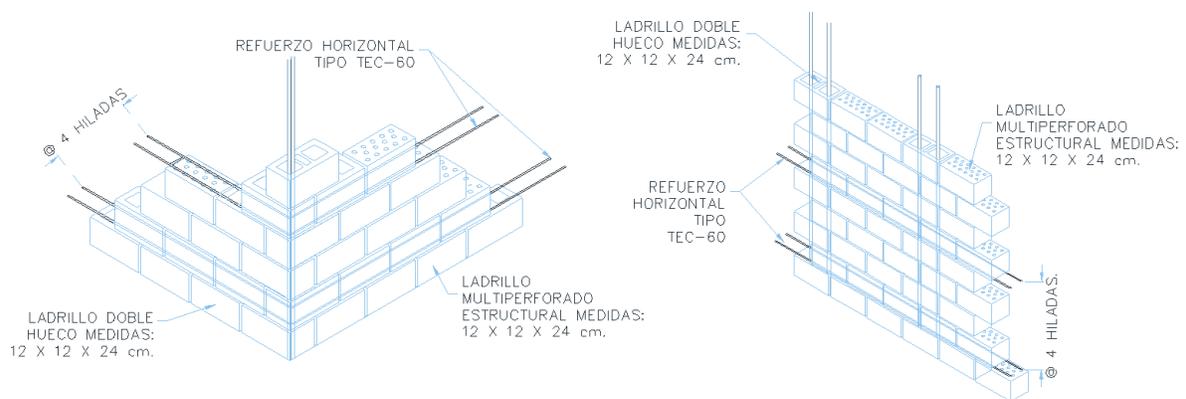


Figura 42. Corte tipo donde se muestra el refuerzo horizontal y vertical empleado en los muros; asimismo, se observan los dos tipos de tabiques que los conforman (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Características Estructurales de los Muros de la Unidad Habitacional Molino 25

En la actualidad se define a la mampostería como un material estructural compuesto, integrado por piezas de origen pétreo, naturales o artificiales, unidas entre sí por un mortero aglutinante. Los muros de carga, cargadores o portantes son los que se emplean como elementos estructurales para soportar todo tipo de solicitaciones, verticales y horizontales, tanto contenidas en su plano como perpendiculares a él (Gómez et al., 2021).

Como se mencionó anteriormente, la estructura está conformada por muros de mampostería reforzada interiormente. En la mampostería reforzada interiormente, el acero de refuerzo se distribuye tanto en la dirección vertical como en la horizontal, colocándolo dentro de las juntas entre hiladas y dentro de las celdas de las piezas, respectivamente. Las celdas que alojan el acero de refuerzo, cuando menos, se rellenan posteriormente con concreto fluido, elaborado a base de cemento, arena y gravilla con tamaño máximo de 10 mm. En este sistema, el comportamiento resulta comparable al de muros estructurales de concreto reforzado (Gómez et al., 2021).

En la Figura 43 se ilustran los requisitos que deben cumplir los muros de mampostería reforzada interiormente, establecidos en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, (2017).

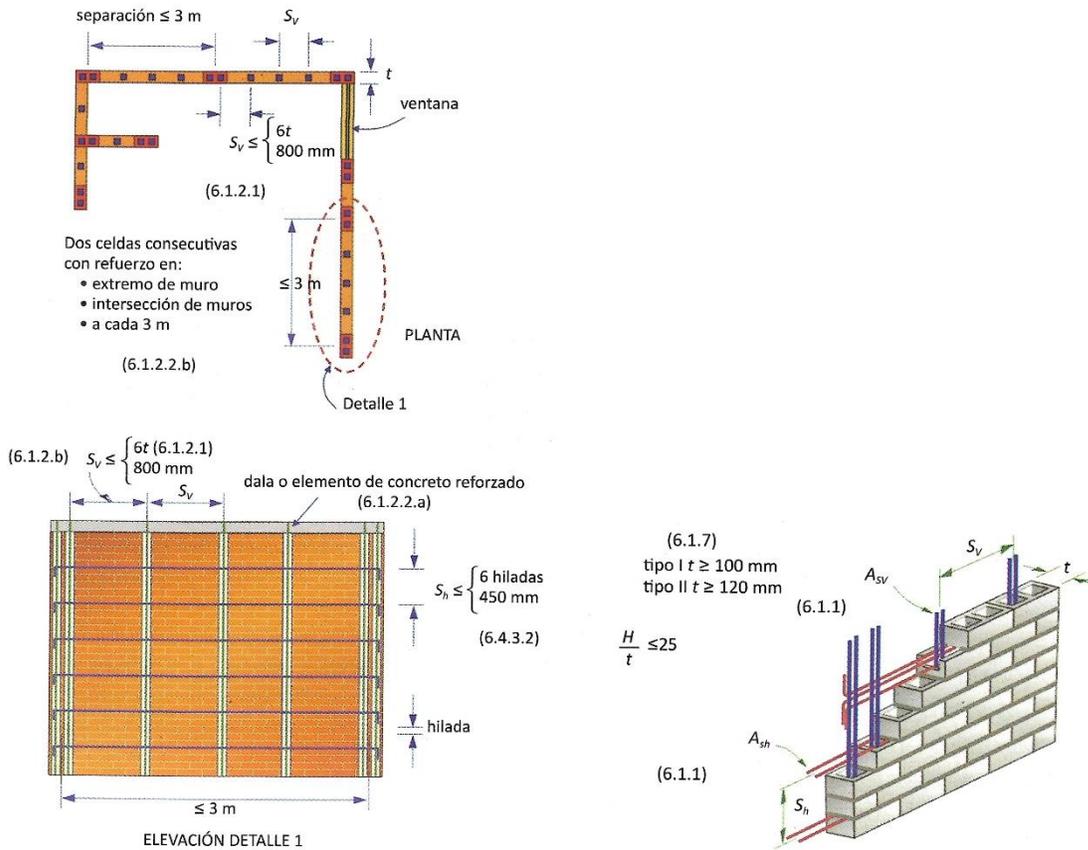


Figura 43. Sistema constructivo de mampostería reforzada interiormente (Obtenido de NTC-DCEM, 2017).

Sistema de Piso

El sistema de piso con el que cuentan los módulos es a base de losas macizas de 10 cm de espesor, armadas con varillas del #3 dispuestas en dos direcciones a cada 30 cm. En la Figura 42, se muestra un corte tipo de la losa de entrepiso.

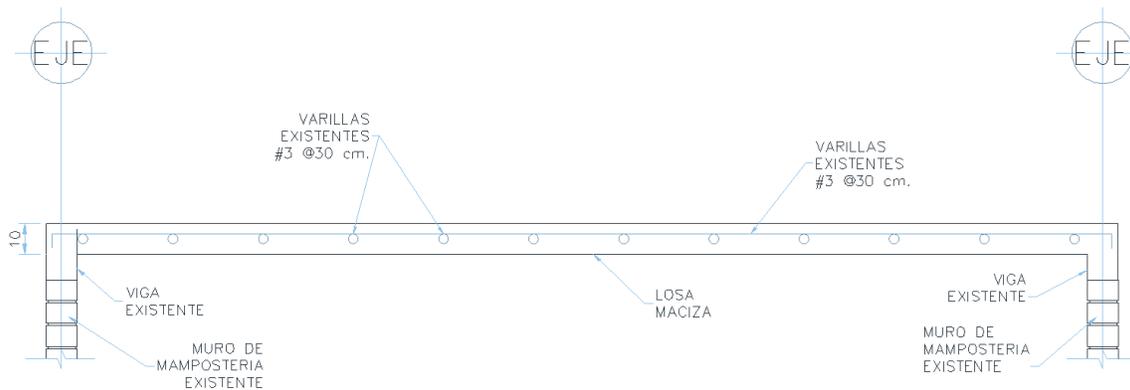


Figura 44. Corte tipo losa de entrepiso empleada en Unidad Habitacional Molino 25 (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).



CAPÍTULO VI. PLANTEAMIENTO Y COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS

En el capítulo IV se presentó el modelo conceptual de riesgo por agrietamiento propuesto por García et al., (2019). En el capítulo mencionado, se presentaron y describieron las componentes que integran a dicho modelo, mostrando la necesidad de cada una de las partes para poder realizar correctamente el análisis de riesgo por agrietamiento.

Ahora, en el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos con el modelo conceptual de riesgo por agrietamiento. Los resultados son mapas de la zona sur de la Alcaldía Iztapalapa, que muestran la distribución espacial de cada uno de los componentes del modelo de riesgo (amenaza, susceptibilidad y exposición). Asimismo, cada componente está integrado por subcomponentes, de los cuales se describe el procedimiento empleado para su obtención.

La construcción de estos mapas se realizó con redes neuronales, donde se introdujeron características espaciales (coordenadas x, y, z) de los puntos donde se contaba con información, y se obtuvieron las propiedades que se buscaban (Nivel de Aguas Freáticas, espesor de paquetes de suelo, profundidad del basamento, etc.).

A continuación, se presentan los componentes del modelo conceptual de riesgo, con sus respectivos subcomponentes. Se presentan en el siguiente orden: amenaza, susceptibilidad y exposición.

VI.I Amenazas

Como se mencionó en el capítulo IV, la principal amenaza para el agrietamiento del suelo en la zona sur – oriente de la Alcaldía Iztapalapa es el descenso del nivel freático. Esta es una amenaza antrópica, pues el fenómeno de descenso del nivel freático se origina por la extracción intensiva de agua del subsuelo para el abastecimiento de agua potable en la Ciudad de México. Por lo tanto, es importante estudiar el Nivel de Aguas Freáticas (NAF) en la zona.

Por otro lado, como se mencionó en el marco teórico, la zona del Valle de México es considerada de alta sismicidad, por lo que es importante tomar en cuenta la ocurrencia de sismos de magnitud considerable, algunos con focos en sitios cercanos al Valle de México. Es por ello que para los fines de esta tesis es importante establecer una capa con las aceleraciones registradas en los sismos más relevantes presentados en la zona: 19 de septiembre de 1985 M8, y 19 de septiembre de 2017 M7.1.

Nivel de Aguas Freáticas (NAF)

Para la obtención de la capa de Nivel de Aguas Freáticas, García et al., (2019) compilaron informaciones de campañas de exploración geotécnica ejecutadas post – terremoto 2017, así como las propias exploraciones derivadas de su investigación (pozos ejecutados entre 6 y 14 meses después de los eventos sísmicos). Con toda la información recopilada se generaron mapas de Nivel de Aguas Freáticas (NAF) en cada uno de los polígonos en estudio. En este caso, se estudian los polígonos cercanos a la colonia La Planta para completar las isocurvas generadas para la colonia (estudios ejecutados en el sitio de interés).

Como se mencionó en la introducción del presente capítulo, la realización de los mapas que se presentan fue con la aplicación de redes neuronales. En el caso particular de la capa de Nivel de

Para definir la sección crítica se observa la capa de la Figura 45 y las grietas reportadas por los vecinos, tanto antes del sismo de septiembre de 2017, como después de este. Después se revisan los extremos del mapa, es decir, la zona con mayor y menor profundidad del NAF. Si se observa con detenimiento la zona roja del mapa, no hay reportes de grietas. Esta zona tiene niveles de loma y el basamento, como se verá posteriormente, no tiene efecto (haciendo referencia a la Figura 25). Por otro lado, en la zona morada y azul, donde el nivel freático es casi superficial, prácticamente no se observan grietas de importancia. Las zonas verde-amarilla resultan ser las presentan mayor gradiente y por esto, la mayor amenaza.

Ahora, estableciendo una relación causa – efecto, si el nivel freático continúa descendiendo, el suelo que se encuentra en la zona verde tenderá a consolidarse por la disminución de la presión de poro; esta disminución del espesor del suelo en la zona verde resultará en que el suelo ubicado en la zona naranja y amarilla se “deslizará” hacia ésta gracias a la influencia de la pendiente del basamento. Por lo tanto, con este “deslizamiento” se generarán esfuerzos de tensión en el suelo que se encuentra en las zonas amarilla y naranja, lo que generará grietas en estas zonas. En la Figura 46 se señala la sección en donde se generan los esfuerzos de tensión y se producen los agrietamientos.

Lo explicado en el párrafo anterior se comprueba observando la ubicación de las grietas mostradas en la Figura 45, pues se encuentran en las zonas amarillas y naranjas. Por lo tanto, se comprueba que la sección crítica que tiende al agrietamiento, por la amenaza NAF, se encuentra en las zonas naranjas y amarillas.

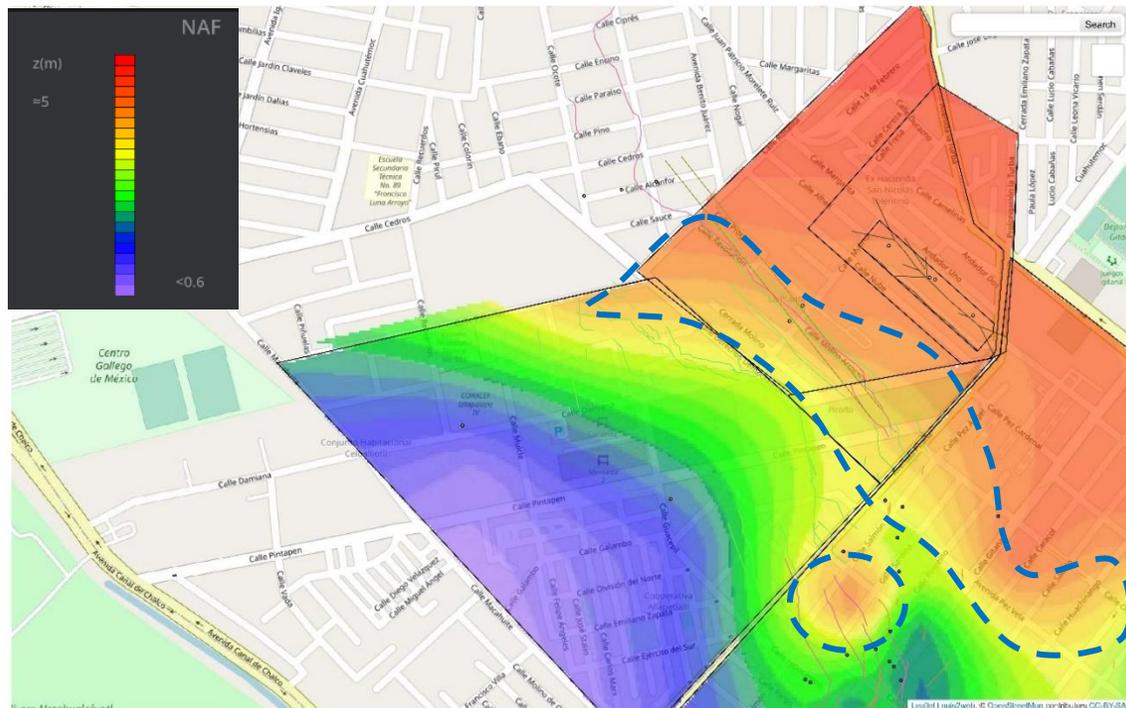


Figura 46. Capa de NAF de los alrededores de la zona de estudio, donde se muestra la franja considerada como sección crítica para el agrietamiento (Elaboración propia, con capa de NAF, con permiso de impresión de García et al., 2019).

En la Figura 46, se realiza un acercamiento de esta capa hacia la zona de la Unidad Habitacional Molino 25, en la que se superpone la planta general de la unidad; se observa la correspondencia de las grietas presentes en la unidad con la franja delimitada como “sección crítica”, lo que confirma la hipótesis de tendencia al agrietamiento en esta zona.

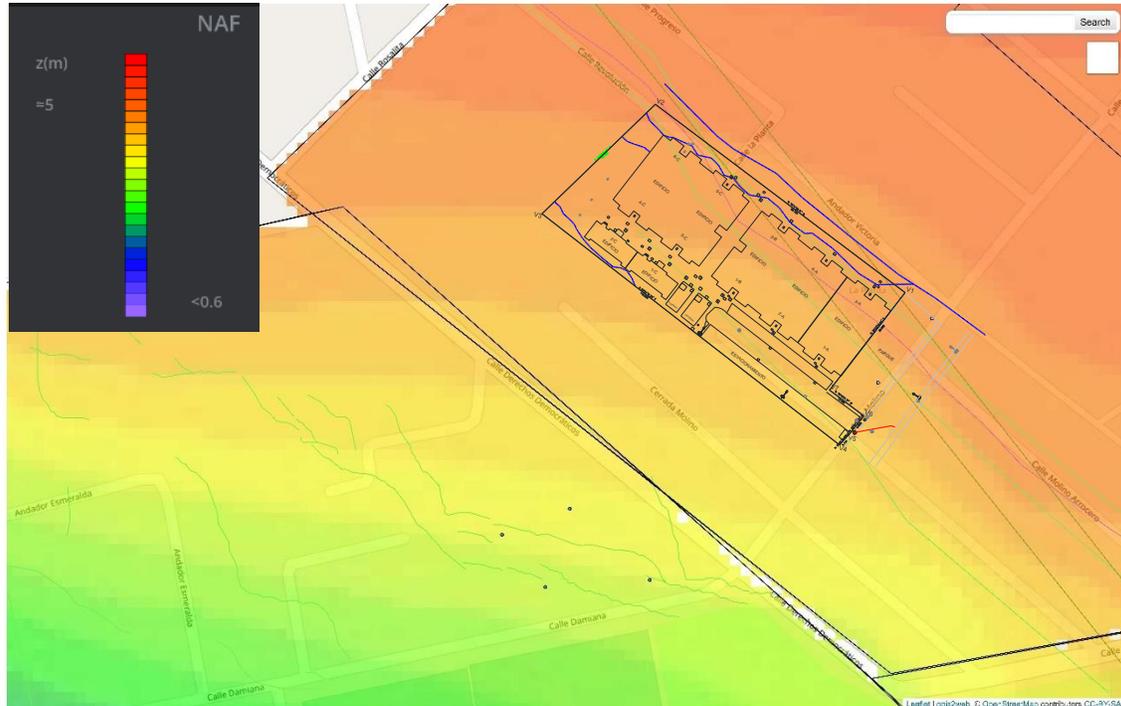


Figura 47. Acercamiento de capa de NAF, con la planta general de la Unidad Habitacional Molino 25 sobrepuesta (Elaboración propia, con capa de NAF con permiso de impresión de García et al., 2019, y Planta de la unidad habitacional obtenida de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Sismicidad en la zona

A pesar de ser fenómenos con una frecuencia de ocurrencia de media a baja, los sismos en el Valle de México son una amenaza presente. Como se ha mencionado, los sismos más significativos en la zona de Iztapalapa han sido los de septiembre de 1985 y 2017, aunque han ocurrido otros importantes con consecuencias menos desastrosas.

Los mapas que se presentan a continuación fueron realizados por García et al., (2019) con redes neuronales, alimentándolas con los registros de aceleraciones máximas en superficie de los distintos acelerógrafos que se encuentran en el Valle de México. Las entradas de las redes neuronales fueron las coordenadas x , y , condiciones topográficas, condiciones geotécnicas, y condiciones geológicas; la salida fue el valor de la aceleración máxima.

En la Figura 48 se muestra la capa con las aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 M8. Se observa que la zona que presentó las mayores aceleraciones fue el centro de la Ciudad de México, mientras que en Iztapalapa las aceleraciones máximas registradas fueron de altas a moderadas. Es importante mencionar que el epicentro de este sismo fue en las costas de Michoacán.

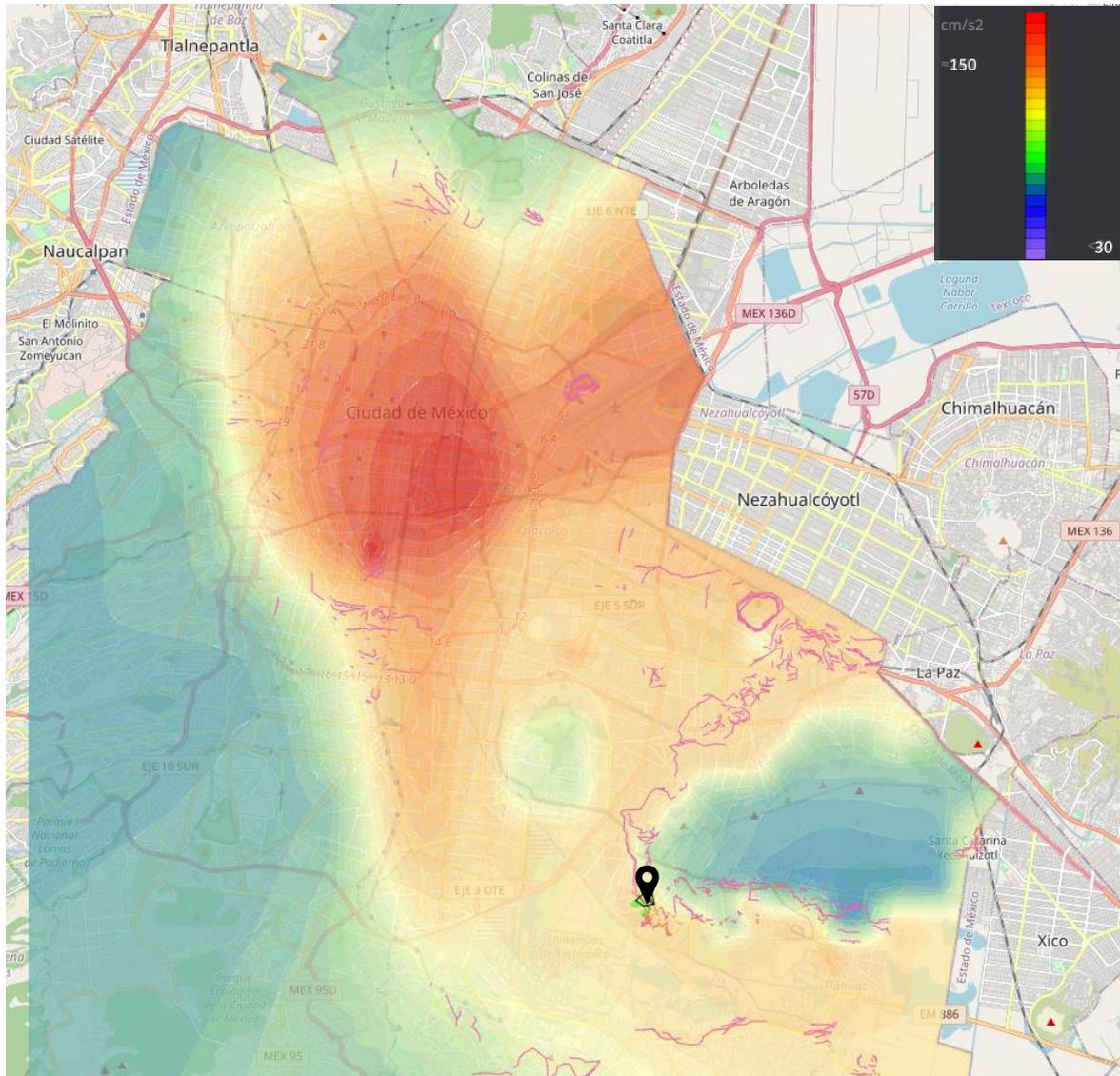


Figura 48. Capa de aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 1985, se señala la ubicación de la zona en estudio (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

Por otro lado, en la Figura 49 se muestra la capa con las aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 M7.1. Se observa una distribución totalmente diferente de las aceleraciones máximas registradas en comparación con las del sismo de 1985. La zona que registró las mayores aceleraciones (extraordinarias) fue una franja ubicada al suroriente de la Ciudad de México, ubicada en las Alcaldías de Coyoacán, Iztapalapa y Tláhuac. Por lo que, la zona donde se encuentra la Unidad Habitacional Molino 25 resultó severamente afectada por este sismo.

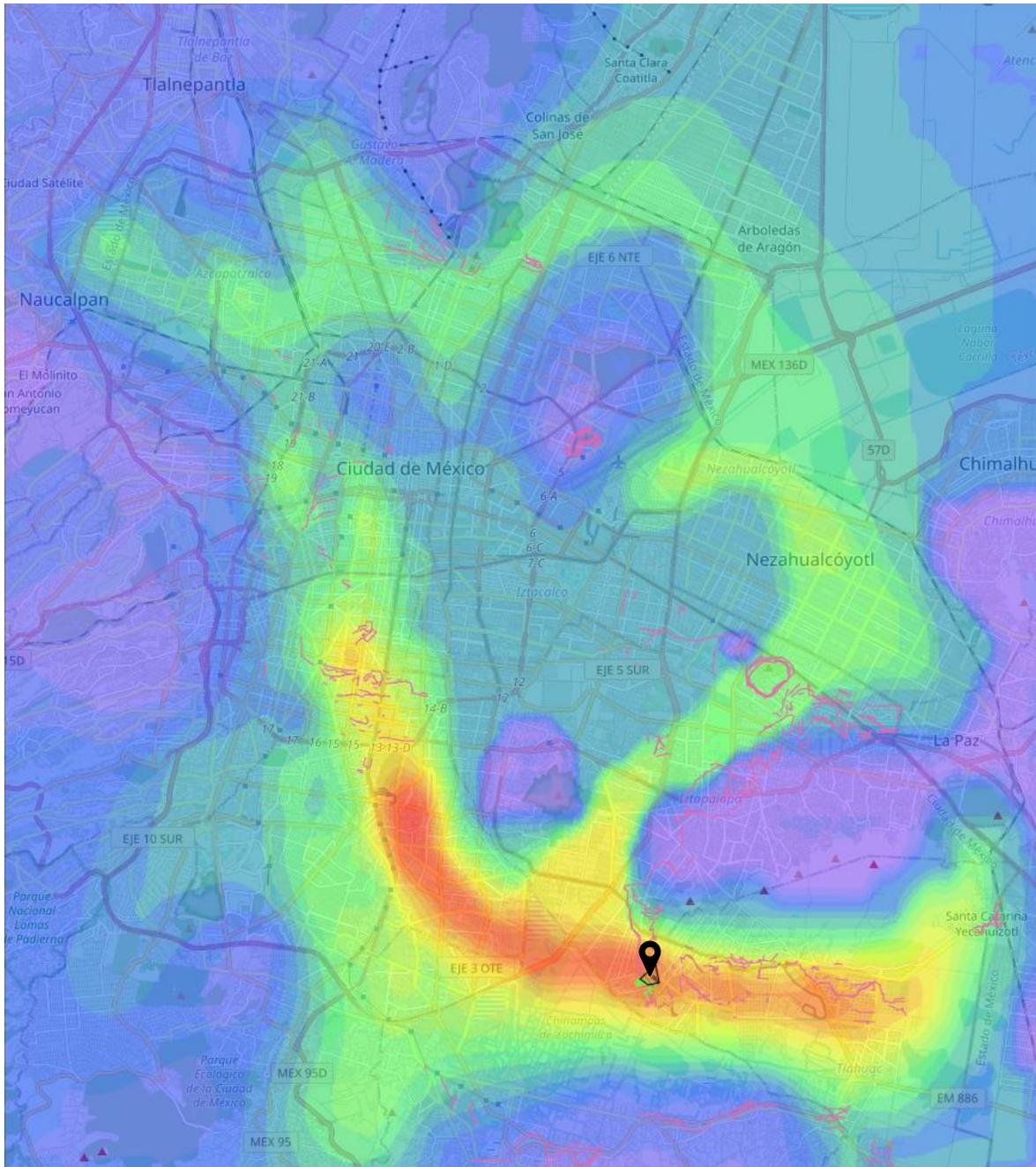


Figura 49. Capa de aceleraciones máximas registradas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, se señala la ubicación de la zona en estudio (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

Es importante señalar que en 1985 se contaban con menos estaciones sismológicas que en el 2017, por lo que sobre la capa de aceleraciones máximas del sismo de septiembre de 2017 se tiene más confianza que sobre la elaborada para el sismo de 1985.



VI.II Susceptibilidad

Sin duda un aspecto fundamental para entender las manifestaciones es reconocer la condición de heterogeneidad en el área (parametrizada con tipos de materiales, contenidos de agua y continuidad estratigráfica).

Así se decidió que las características y las circunstancias de las regiones bajo estudio que incrementan la vulnerabilidad al agrietamiento están contenidas en los escenarios de la heterogeneidad, sobre todo en los paquetes más superficiales de los suelos de cimentación. Los arreglos además de ser heterogéneos en lo geométrico (las capas de suelo no son horizontales ni continuas), como sistema son configuraciones cuyas mineralogías y contenidos de agua elevan la susceptibilidad a agrietarse (García et al., 2019).

Entonces, para definir lo sitios potencialmente “agrietables”, es importante señalar en el espacio cuáles son las regiones donde la condición “Susceptibilidad” responde en escalas mayores con los efectos dañinos de las amenazas.

Para comenzar con el análisis de susceptibilidad es importante tener presente las componentes principales de una masa de suelo: sólidos, agua y aire. Cuando un suelo se encuentra saturado y es sometido a una carga, entonces la consolidación producirá que se reduzca el volumen de agua en la masa de suelo; por lo tanto, el contenido natural de agua del suelo tiene una relación directa con el volumen de agua que va a expeler el suelo cuando se le coloque una carga.

Por otro lado, el contenido de agua de un suelo es una propiedad índice que permite determinar grosso modo la clasificación del suelo; pues a contenidos de agua elevados corresponden suelos arcillosos (muy blandos), mientras que a contenidos de agua bajos corresponden suelos granulares o gruesos (generalmente con alta resistencia al esfuerzo cortante). Este indicador es el que se utilizará para hacer un análisis macroscópico de la susceptibilidad al agrietamiento en la zona en estudio, para identificar los paquetes de suelo con contenidos de agua bajos que han sido desecados por el descenso del nivel freático, contra los paquetes de suelo con contenidos de agua más elevados, que aún se encuentran saturados.

Se comenzará con el análisis de los paquetes de suelo con contenidos de agua bajos, posteriormente se analizarán los paquetes de suelo con contenidos de agua más elevados.

Paquetes de suelo con Contenidos de Agua (W%) mínimos

En campo se observa i. que el suelo disminuye su volumen y ii. que en algunos sitios además se agrietan. Algunas fracturas responden a sus ciclos climáticos por lo que están ligadas al fenómeno de evapotranspiración. En el estudio de García et al., (2019), se modelaron los estratos superficiales con bajos contenidos de agua, reportados en los perfiles estratigráficos.

Para modelar espacialmente el paquete de suelo con contenidos de agua mínimos se utilizó una red neuronal cuyas entradas fueron las coordenadas x, y, y la salida fue el espesor del paquete de suelo con contenidos de agua mínimos.

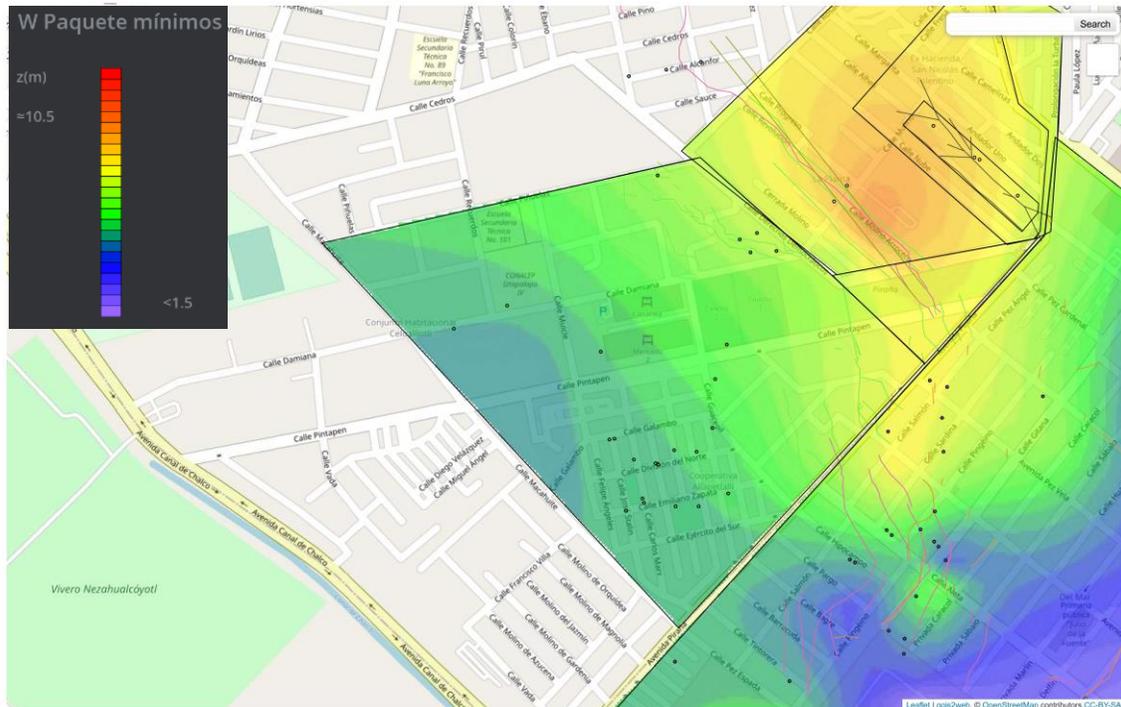


Figura 50. Capa con espesores de paquetes de suelo con contenidos de agua mínimos (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

En la Figura 50, se muestra el espesor del paquete de suelo que tiene contenidos de agua (W%) mínimos. Las zonas más importantes cuando se estudian las manifestaciones de rotura de escala mayor son las franjas en las que el suelo transita de espesores mínimos a máximos en planos superficiales muy pequeños, es decir, las zonas amarillas y naranjas. Este contacto heterogéneo genera un alto potencial del suelo a agrietarse.

De igual manera, en la Figura 50 se observa que la tendencia es que, hacia la zona sur cercana a la Avenida Canal de Chalco, los espesores de paquetes de “suelo seco” (por su contenido de agua mínimo) son muy bajos, mientras que hacia el norte aumenta el espesor de los paquetes de suelo seco. En la zona crítica, se observa cómo el espesor de suelo seco pasa de 10.5 m en la zona roja a 5 m en la zona amarilla, en una superficie muy pequeña.

Si se relaciona esta capa de susceptibilidad con la capa de amenaza NAF, entonces se confirma que las grietas se encuentran en las zonas con mayor amenaza y susceptibilidad por heterogeneidad. Otra hipótesis que surge de los análisis es que el espesor del suelo que se agrieta puede llegar a ser el del suelo con contenido de agua mínimo.

Inicio de Paquetes de suelo con Contenidos de Agua (W%) máximos

Por debajo de los suelos con contenidos de agua (W%) mínimos, se encuentran suelos saturados, con contenidos de agua mucho mayores. Estos suelos están constituidos por limos y arcillas, saturados y sin presencia de grietas dado el estado de saturación en el que se encuentran. Sin

presentados en este apartado fueron construidos con redes neuronales, en las que las coordenadas x , y fueron las entradas, y las coordenadas en z (espesor de estratos blandos) fue la salida.

Los principales elementos que componen la exposición al agrietamiento son la profundidad del basamento y la topografía de la superficie.

Cotas de terreno

La información para elaborar esta capa se obtuvo de un levantamiento topográfico realizado por SACMEX de octubre a noviembre de 2020.

En la Figura 52, se muestra la capa de cotas de terreno. Es interesante relacionar esta capa con la capa presentada anteriormente de Nivel de Aguas Freáticas, pues se observa la relación entre el descenso del terreno hacia la zona de la Avenida Canal de Chalco, con la del aumento hacia la superficie del nivel de aguas freáticas en la misma zona. De igual manera, se observa que en la zona de la Unidad Habitacional Molino 25 comienza el ascenso de la topografía, siguiendo la configuración topográfica del basamento.



Figura 52. Capa de cotas de terreno, se señala la localización de la Unidad Habitacional Molino 25 (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

Profundidad del Basamento

Las profundidades de basamento (o espesor de estrato arcilloso-blando) que obtuvieron García et al., (2019) en su estudio se realizaron mediante pruebas Geofísicas de microsismos. Los resultados obtenidos en los puntos de exploración fueron la entrada de las redes neuronales para construir la capa de profundidad del basamento.

Como se ha mencionado a lo largo del documento, la profundidad del basamento es uno de los datos más importantes, pues la configuración de este condicionará en gran medida los sitios donde se presentarán los agrietamientos. Esta capa da el cierre al modelo de riesgo por agrietamiento, pues relaciona las amenazas y susceptibilidades, mostrando claramente las zonas donde existe el mayor riesgo de agrietamiento.

La capa de profundidad del basamento se muestra en la Figura 53, donde se observa que hacia Avenida Canal de Chalco se mantiene relativamente constante, a una Z de aproximadamente 70 metros. Por otro lado, en la zona de la Unidad Habitacional Molino 25, se observa un cambio brusco de profundidad en una superficie pequeña, lo que muestra que existe una pendiente considerable en el basamento de esta zona.

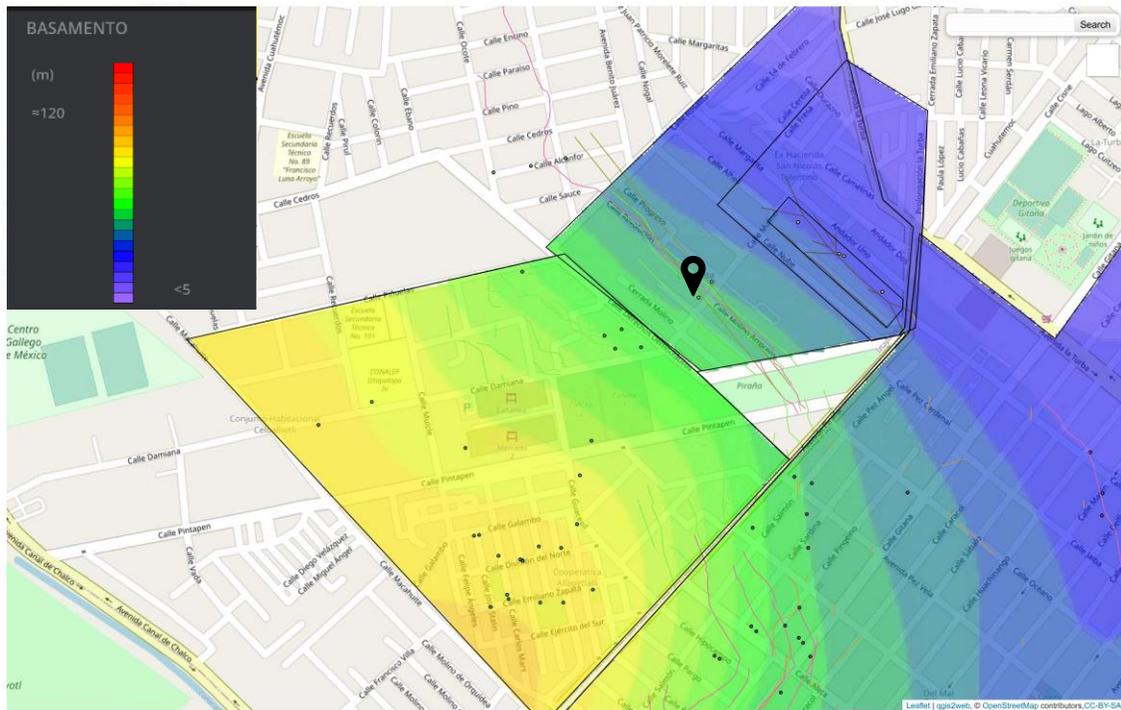


Figura 53. Capa de profundidad del basamento, se señala la localización de la Unidad Habitacional Molino 25 (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

La zona con la mayor pendiente del basamento se encuentra en las zonas azules y verde. Esta misma zona coincide con la llamada “sección crítica” establecida en el apartado de Amenazas, en la capa de Nivel de Aguas Freáticas, que a su vez coincide con las zonas de mayor susceptibilidad al agrietamiento presentadas en la capa de espesores de paquetes con contenido de agua mínimo. Por último, se confirman las diferentes capas expuestas en el presente capítulo con los reportes de grietas presentes en la zona.

VI.IV Lineamientos y Recomendaciones para la Reconstrucción Segura

En la Figura 54, se presenta la patología que demandó la intervención de expertos y administradores del gobierno después de los terremotos del 2017. Como se observa, existe una clara tendencia de los cuerpos mayores de perder vertical hacia uno de los lados largos (V1-V2) del perímetro de la Unidad Habitacional. Los cuerpos menores (Edificios 1C, 2C), por su parte, están perdiendo vertical hacia el lado del estacionamiento, el otro lado largo del perímetro (V3-V4). Debe señalarse que las cisternas de abastecimientos de agua potable están alineadas con los módulos menores y no hay reportes de daños en estos elementos enterrados.

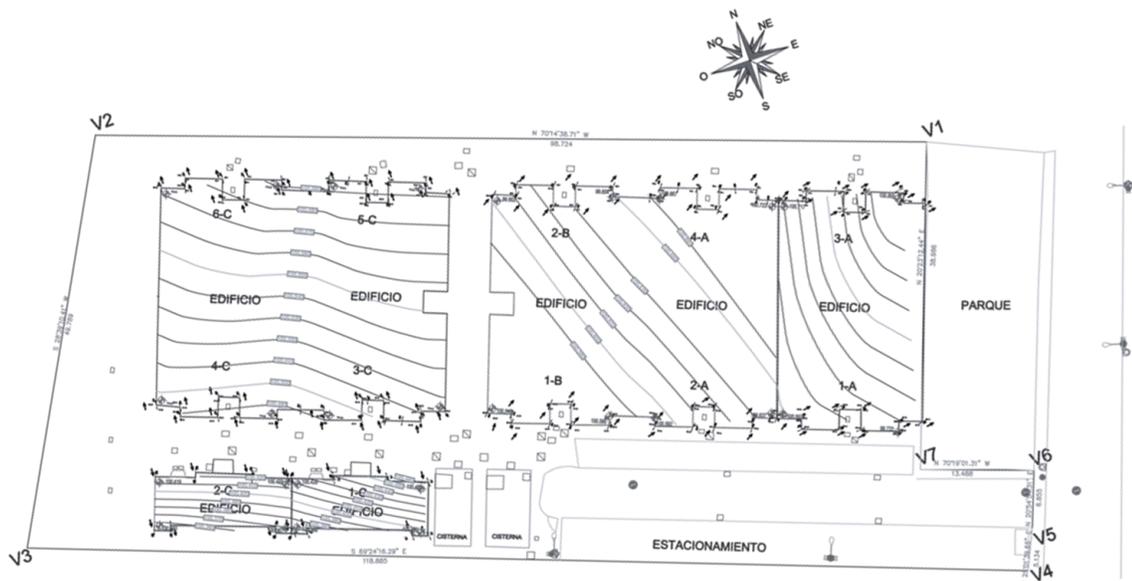


Figura 54. Medición topográfica de desplomes de los módulos que conforman la Unidad Habitacional Molino 25 (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Aunada a esta patología, se encuentra un sistema de grietas presentes en la Unidad Habitacional. En la Figura 55, se observa la planta de la unidad con la ubicación y configuración de éstas. De manera general, se encuentran 3 grietas principalmente: dos grietas que corren en el sentido este-oeste al norte de la unidad (paralelas al lado V1-V2), y una al sur de la unidad que pasa por atrás de los edificios 2-C y 1-C (paralela al lado V3-V4).



Figura 55. Configuración y ubicación de las principales grietas que se encuentran en la Unidad Habitacional Molino 25 (Obtenido de PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020).

Por otro lado, sobre el mapa de variación espacial del NAF (Fig. 56), presentado en el subtema anterior, se pueden distinguir dos situaciones particulares presentes en la Unidad Habitacional:

- El trazo de los posibles rompimientos que se alinean con el lado largo V1-V2 están en el contacto de la zona de mayor descenso.
- El otro lado largo, el V3-V4, también está afectado por una manifestación, pero ésta corre sobre las isocurvas que marcan el límite entre valores superficiales y profundos.

En la Figura 56, se hace un acercamiento a la capa de variación espacial del NAF y se coloca la planta de la Unidad Habitacional Molino 25 con la ubicación y configuración de las grietas. Con ello, se observa la alineación de los rompimientos con la zona de mayor descenso del NAF.

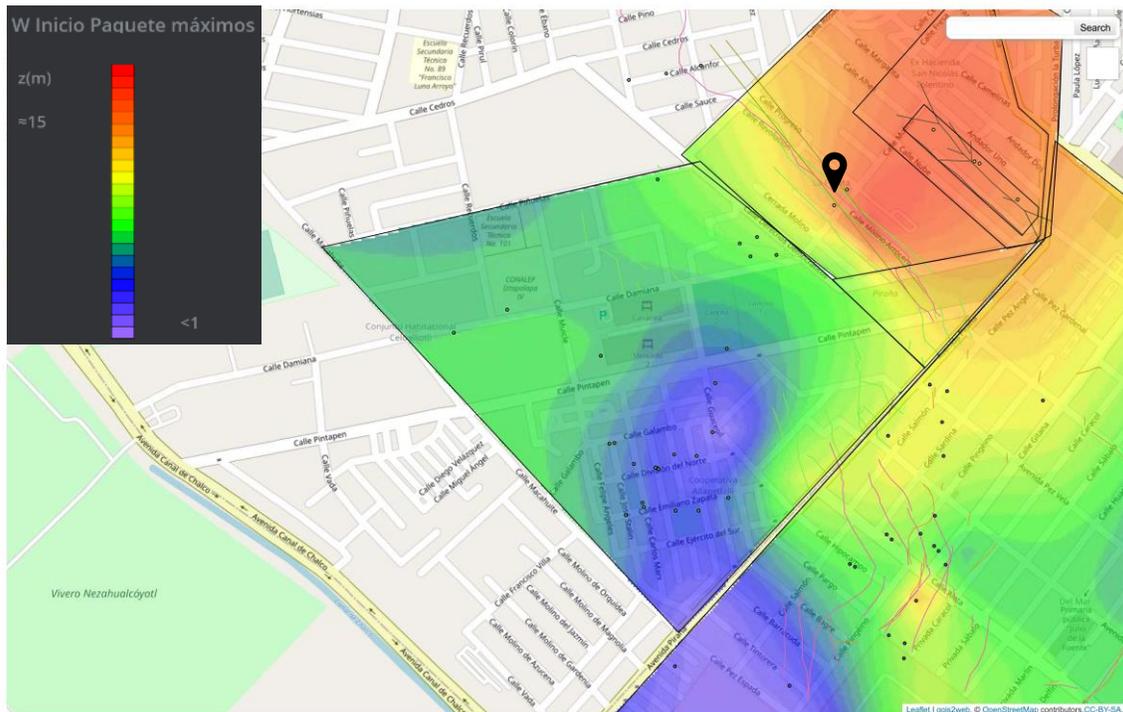
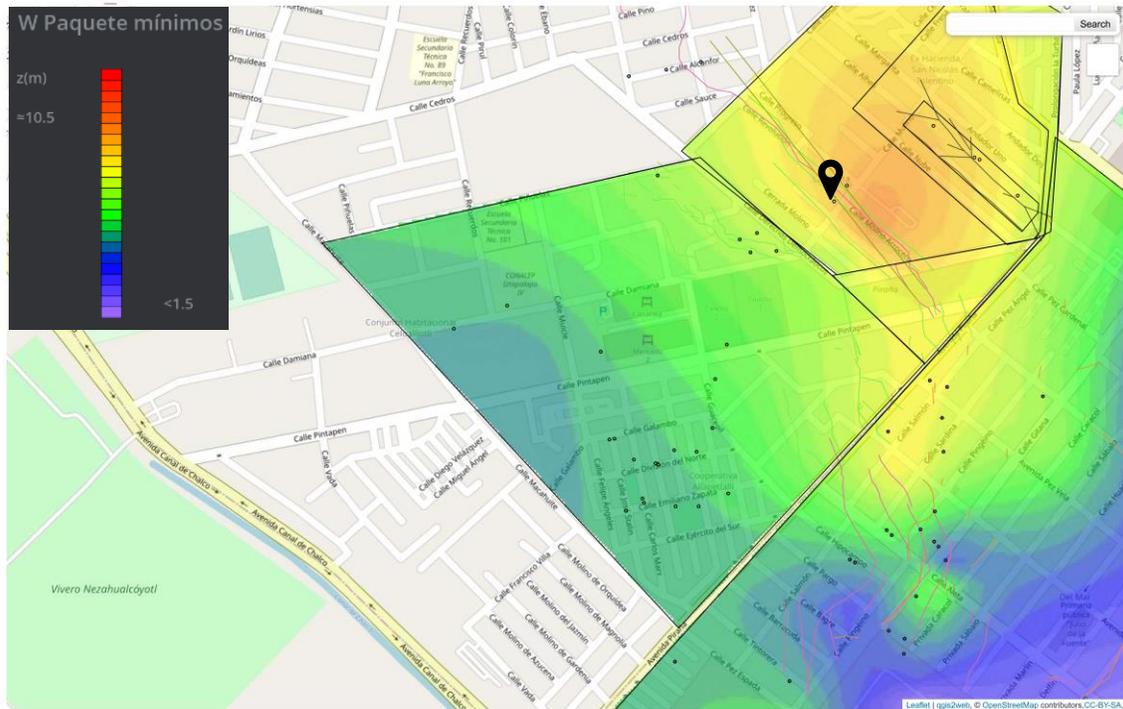


Figura 57. Capas de heterogeneidad, donde se muestran los paquetes de suelo con contenidos de agua (W%) bajos y altos. Se señala la ubicación de la Unidad Habitacional Molino 25 (Con permiso de impresión de García et al., 2019).



Figura 58. Capas de exposición (profundidad del basamento y cotas de terreno), donde se muestra la alta exposición que tiene la Unidad Habitacional Molino 25 al agrietamiento (Con permiso de impresión de García et al., 2019).

Por último, sobre la forma del basamento que subyace y los niveles de terreno (capas de exposición) (Fig. 58) se concluye que:



- La superficie de contacto de la cimentación de toda la unidad está en la región del descenso abrupto de la base, sin embargo, parece que el lado corto está en la mayor pendiente y que las unidades del lado largo están apenas sobre el inicio de la loma. La configuración de los niveles de piso no descarta esta hipótesis.
- La alineación de las manifestaciones con las isocurvas de profundidad de basamento es muy clara, sin embargo, debe recordarse que estas líneas son interpretaciones que, en un porcentaje muy grande de su trazo, fueron inferidas. Además, es necesario apuntar que los propios cuerpos moviéndose por el cambio de volumen de las capas que los sostienen, provocan manifestaciones de rotura en el medio, condiciones agravadas por las constantes fugas de tuberías que conducen líquidos.

Entonces:

1. El movimiento de la potente capa de arcilla que cambia de volumen por efecto del bombeo será una constante que dirigirá el rompimiento de las capas de suelo. La tasa (de aparición) y la geometría serán menores conforme pasen los años.
2. La dirección del cambio de volumen parece no ser la componente que impacta sobre las unidades mayores que han perdido la vertical. La dirección del cambio volumétrico parece sumar a la pérdida de los elementos menores, sin embargo, al no reconocerse rutas de deformaciones o roturas más allá de los propios cuerpos construidos, esta hipótesis pierde fuerza.
3. Las heterogeneidades se consideran los elementos más importantes para la activación de la patología señalada, no sólo por las condiciones ligadas al contenido de agua natural sino a la propia secuencia estratigráfica, la cual pierde continuidad dentro de la unidad.
4. Si salimos de la escala local de la unidad y se relacionan los eventos con las manifestaciones en la zona, particularmente en la Unidad Molino 35, pudieran conectarse los movimientos con las reconocidas interacciones entre cuerpos pesados *versus* ligeros. En esta situación los bloques más pesados, y sobre la loma, ejercerán el control de la deformación de las capas superficiales (que pueden ser las únicas que rompan) y con esto la dirección de los movimientos de la Unidad Molino 25.
5. Debe señalarse que la costra-relleno es altamente erosionable, es muy importante reconocer si pudieron existir grietas menores en esta capa que se exacerbaron por efecto de las fugas de agua y pudieran constituir un elemento de riesgo adicional.
6. Los arreglos/mantenimiento a la cimentación deberán considerar que los puntos 1 al 5 suceden y en la vida útil de los edificios seguirán sucediendo.
7. Los procesos para renivelar los edificios deberán contar con
 - i. Controles de piso (delimitar el movimiento de la superficie),
 - ii. Controles de vertical, y
 - iii. Bitácoras transparentes. Esto con el fin de encausar un programa de mantenimiento científico, no invasivo y económico.
8. La restructuración de los cajones (cambiar geometría y/o rigidez) deberá sostenerse en memorias de cálculo que soporten el efecto de hacerlo, delimiten las causas a las que ataca, y defina el futuro esperado de las unidades así recimentadas. Si se eligen soluciones redundantes u onerosas, al experimentar las unidades el mismo efecto (en unos años), la confianza de la ciudadanía en la actuación del experto puede verse menoscabada.



9. Deben considerarse sistemas inteligentes de drenaje en toda la planta, pero sobre todo en los puntos que han presentado rompimientos. La conservación de las áreas verdes y la salud de los pavimentos será fundamental para el equilibrio de las unidades. Es preferible el plantado de especies vegetales contra erosión que el cambio del entorno a un medio concreto-concreto.



CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

Sobre las herramientas de modelado espacial, basadas en inteligencia artificial (redes neuronales):

1. Las Redes Neuronales están conformadas por elementos que se comportan de manera análoga (imitación burda) a las neuronas biológicas y están organizadas y aprenden de forma similar al proceso del cerebro humano. Tal como lo haría la lógica humana, un problema se organiza y jerarquiza, se define lo que se busca resolver, y se procede conforme la manera más simple de lograr su solución.
2. El resultado de las herramientas de modelado espacial (mapas de componentes de riesgo, en distintas capas) es suficientemente bueno si la información proporcionada para el entrenamiento es suficiente y pertinente. Parte de los problemas de estudiar con Inteligencia Artificial es que las bases de datos deben tener características que no siempre pueden cumplirse, incluso que es difícil de definir: ¿cuál es el número de parámetros de entrada óptimo?, ¿cuántos ejemplos deben presentarse a la red?, ¿cuál es el mejor etiquetado de las variables?, ¿cómo se trabajan los sesgos por lecturas/monitoreo?, por mencionar algunos.
3. Gracias a la información general de la zona se pudieron hacer interpretaciones espaciales adecuadas sobre la Unidad Habitacional Molino 25. Los mapas de componentes de riesgo son, para el caso del agrietamiento, el instrumento más útil y simple para determinar las causas de las manifestaciones.
4. Si bien desde hace varias décadas ha sido estudiado el problema geotécnico presente en esta zona de las Alcaldías Tláhuac e Iztapalapa, no se contaba con un enfoque macroscópico que ayudara a facilitar el entendimiento sobre el problema geotécnico en la zona. Con la aplicación de estas técnicas de inteligencia artificial, se puede generar información para comprender, de una mejor manera, la problemática.
5. De la mano con el punto anterior, las herramientas de inteligencia artificial permiten generalizar de ejemplos anteriores a ejemplos nuevos; por lo que, una vez validada por expertos la red neuronal (es decir, *entrenada*), se puede ampliar la aplicación a otras zonas afectadas. Esto permitirá que exista una mayor zona de cobertura para evaluar riesgos y plantear soluciones.

Sobre el análisis de las unidades desde una visión integral, multidisciplinaria:

1. Como se mencionó a lo largo del documento, la finalidad de las investigaciones realizadas es contribuir al diseño de las medidas de mitigación sobre agrietamiento y pérdida de verticalidad de los edificios en la Unidad Molino 25. Brindar documentos a los habitantes, como el aquí presentado, en los que se aclare y sostenga la actuación del personal técnico, cimienta la confianza de la gente en las acciones de gobierno.
2. Se debe trabajar en conjunto: especialistas, sociedad y gobierno, para enfrentar las amenazas a la zona. Es importante aclarar que, como se mencionó en el capítulo IV, las amenazas seguirán presentes, por lo que la única manera de mejorar las condiciones es minimizar la susceptibilidad estructural y aumentar la resiliencia social.
3. El riesgo al agrietamiento es MUY ALTO en la zona y muy probablemente esta etiqueta no cambie en el futuro cercano. Sin embargo, se pueden plantear soluciones que mejoren las



condiciones actuales. Por ejemplo, estabilizar las fuerzas que activan el avance de las grietas y rediseñar, estructuralmente, a las instalaciones enterradas (públicas y privadas).

4. Es de suma importancia supervisar e inspeccionar los trabajos de rehabilitación en las estructuras que lo requieran. Siempre deberán sustentarse con bases técnicas y científicas las decisiones tomadas para reforzar y/o recimentar edificaciones. Obligadamente deberá comunicarse lo que se espera que suceda en el futuro cercano y lejano. Esto suma a los puntos anteriores sobre la importancia de generar confianza en la sociedad. Se perderá credibilidad en el gremio si se toman decisiones que no estén sustentadas en la ciencia y fracasen en tiempos relativamente cortos.
5. Por último, es importante entrenar a los profesionales involucrados en trabajos de construcción y rehabilitación en la zona sobre cómo construir conclusiones sobre las relaciones entre la topografía, el basamento (forma y profundidad) y las capas heterogéneas compresibles.



REFERENCIAS

- Arce, J.L., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.C., Morales-Casique, E., Benowitz, J., Escolero, O., Lenhardt, N. 2015. *Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México*. Sociedad de Geología
- Adger, W.N., 2006. *Vulnerability. Global environmental change*. P. 268-281
- Baker, J., 2012. *Climate change, disaster risk, and the Urban Poor. Cities building resilience for a Changing World*. The World Bank. 322 pp.
- Banco Mundial y Naciones Unidas, 2010. *Natural Hazards, Unnatural Disasters*. Washington, DC: World Bank.
- Berkes, F., Folke, C., 1998. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press. 476 pp
- Berkes, F., Colding, J., Folke, C., 2003. *Navigating Social-Ecological Systems: building resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press. 416 pp
- Carreón Freyre, D. C., Cerca, M., Hernández, M., 2003. *Correlation of near – Surface stratigraphy and physical properties of clayey sediments from Chalco Basin, Mexico, using Ground Penetrating Radar*. Journal of Applied Geophysics 53. P. 121-136
- Carreón Freyre, D. C., Cerca, M., Hernández, M., 2005. *Propagation of fracturing related to land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico*. Proceedings of the 7th International Symposium on Land Subsidence SISOLS 2005, Shanghai, P.R. China. ISBN 7-5323-8209-5. Vol. I. P. 155-164
- Carreón Freyre, D. C., Hidalgo – Moreno, C. M., Hernández – Marín, M., 2006. *Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, número especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, núm. 2. P. 237-250
- Carreón Freyre, D. C., González Hernández, M., Cerca, M., Gutiérrez Calderón, R., Jiménez Sánchez, A., 2011. *Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial*. Pan-Am CGS Geotechnical Conference. 8 pp
- Carreón Freyre, D. C., Cerca, M., Solís, S., Vega, M., Millán, B., González, M., Flores, O., Gutiérrez, R., 2012. *Análisis geomecánico de los sedimentos lacustres de la Delegación Iztapalapa, México D.F.* XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. 10 pp
- Carreón-Freyre, D. C., González-Hernández, M., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., Zacarias, S., 2014. *Capítulo 4. Subsistencia – Una amenaza de origen natural y antropogénica poco conocida – ejemplos de México*. P. 133-143
- Carreón-Freyre, D. C., González-Hernández, M., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara-Durán, C., Centeno-Salasm F., 2017. *Posible influencia de la subsistencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017*. Reporte preliminar. 13 pp
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D., López-Quiroz, P., Ovando-Shelley, E., Doin, M.P., Gutiérrez-Calderón, R., González-Hernández, M., Jiménez-Sánchez, A., Blancas-Domínguez, D., 2012. *Engineering geology approach to the effects of land subsidence in México City*. The Southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide 25, p. 115-134



- Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., Webb, J., 2008. *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*. Global environmental Change 18. P. 598-606
- Dauphiné, A., Provitolo, D., 2007. *La résilience: un concept pour la gestión des risques*. Annales de Géographie 654 (2). P. 115-125
- De Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, M., Mota-Palomino, R. 1988. *Estructura Geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*. Instituto de Geología, UNAM, Boletín 104. P. 10-47
- Delegación Iztapalapa, 2011. *Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa, México, D.F.* P. 12-23
- Díaz-Rodríguez, J. A., 2016. *El subsuelo de la Ciudad de México*. Tercera conferencia Leonardo Zeevaert Wiechers, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica.
- Díaz-Rodríguez, J. A., 2006. *Los suelos lacustres de la Ciudad de México*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e infraestructura Civil, Vol. 6(2). 20 pp.
- Etinay, N., Egbu, C., Murray, V., 2017. *Building Resilience for Disaster Risk Management and Disaster Risk Reduction*. 7th International Conference on Building Resilience; Using scientific knowledge to inform policy and practice in disaster risk reduction, ICBR2017, 27 – 29 November 2017, Bangkok, Thailand. 8 pp
- Faccioli, E., Ramírez, J., 1975. *Respuestas sísmicas máximas probables en las arcillas de la Ciudad de México*. Instituto de Ingeniería, UNAM. 35 pp.
- Gallopin, G.C., 2006. *Linkages between vulnerability, resilience, and adaptative capacity*. Global Environmental Change 16 (3). P. 293-303
- Gómez, B., Perrilliat, R. J., Pérez, J. A., Treviño, E., 2021. *Edificaciones de mampostería*. 2° edición. Limusa, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. 419 pp.
- González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., Martiny, B., 2015. *Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte – central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 67, núm. 2. P. 285-297
- Gutiérrez, R., Carreón, D., González, M., Cerca, M., Jiménez, A., López, P., Blancas, D., 2012. *Zonificación geotécnica de la Delegación Iztapalapa, México D.F.* XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. 6 pp
- Gunderson, L., Holling, C.S., 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in human and Natural Systems*. Washington, DC.: Island Press. 536 pp
- Hernández-Espriú, J.A., 2013. *Modelo DRASTIC-Sg: una nueva herramienta para mejorar la gestión del acuífero de la Ciudad de México*. Academia de Ingeniería. P. 1-41
- Holling, C.S., 2001. *Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems*. Ecosystems 4. P. 390-405
- Juárez-Badillo, E., 1962. *Mecanismos de grietas de tensión en el Valle de México*. Tesis doctoral, UNAM.
- Kasperson, J.X., Kasperson, R. E., Turner, B.L. 1995. *Regions at risk: Comparisons of Threatened Environments*. Tokyo: United Nations University Press. 582 pp
- Klein, R.J., Smit, M. J., Goosen, H., Hulsbergen, C. H., 1998. *Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics of Dutch Dikes*. The Geographical Journal 164 (3). P. 259-268



- Kramer, S., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Estados Unidos, 1ª edición. 672 pp.
- Kreitler, C. W., 1977. *Fault control of subsidence, Houston, Texas*. Ground Water 15. P. 203-214
- Lugo-Hubp, J., Pérez-Vega, A., Rojas, M., 1991. *Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México*. Geofísica Internacional 30. P. 87-95
- Maret, I., Kadoul, Th., 2008. *Résilience et reconstruction durable: que nous apprend La Nouvelle Orléans*. Annales de Géographie 117 (663). P. 104-124
- Mazari, M., 1996. *La isla de los perros*. El Colegio Nacional. 80 pp.
- Orozco, J. M., Figueroa V., 1991. *Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre el agrietamiento de terrenos*. Memoria, Simposio sobre agrietamiento de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. P. 1-12
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A., Romo, M. P., 2007. *The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 27. P. 333-343
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A., Santoyo, E., 2013. *Effects of regional subsidence and earthquakes on architectural monuments in Mexico City*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 65, núm. 1. P. 157-167
- Ovando-Shelley, E., Rodríguez-Rebolledo, J., Valderrama, Y., 2019. *Geotechnical Characteristics of Natural and Reconstituted Lacustrine Mexico City Clays*. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01103-9>. 14 pp.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., Thornburn, T. H., 2004. *Ingeniería de Cimentaciones*. Limusa. 535 pp.
- Pimm, S.L., 1984. *The complexity and stability of ecosystems*. Nature 307 (26). P. 321-326
- PRO-GPIC & BROS, S.A. de C.V., 2020. *Estudios de campo y análisis numéricos para la formulación del Proyecto de Rehabilitación de la U.H. Molino 25*.
- Provitolo, D., 2012. *Resiliency Vulnerability notion – looking in another direction in order to study risks and disasters*. UMR Géoazur, CNRS, Sophia Antipolis, Valbonne, France. 13 pp.
- Quinde, P., Reinoso, E., 2020. *Long duration and frequent, intense earthquakes: Lessons learned from the 19 September 2017 earthquake for Mexico City's resilience*. Instituto de Ingeniería, UNAM. 13 pp.
- Rogers, D. J., 2012. *Dams and disasters: a brief overview of dam building triumphs and tragedies in California's past*. California Colloquium on Water Lectures, Berkeley University of California. 158 pp.
- Rojas, E., Romo, M., Hiriart, G., 1989. *Modelo constitutivo para simular el comportamiento de la arcilla del Valle de México*. Series del Instituto de Ingeniería, No. 522. 91 pp.
- Rojas, E., Arzate, J., Arroyo, M., 2002. *A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline*. Engineering Geology 65. P. 245-260
- Sánchez-Sesma, F., Esquivel, J., 1980. *Ground motion on alluvial valleys under incident plane SH waves*. Boletín de la Sociedad Sismológica de América, Vol. 69, No. 4. P. 1107-1120
- Sánchez-Sesma, F., 1990. *Elementary solutions for response of a wedge – shaped medium to incident SH – and SV – waves*. Boletín de la Sociedad Sismológica de América, Vol. 80. P. 737-742
- Santoyo, E., Ovando-Shelley, E., Mooser, F., León, E., 2005. *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. TGC Geotecnia, México. 170 pp.



- Seed, H.B., Romo M. P., Sun, J. I., Jaime, A., Lysmer, J., 1988. *The Mexico earthquake of September 19, 1985 – Relationships between Spoil Conditions and Earthquake Ground Motions*. Earthquake Spectra, 4(4):687
- Serre, D., Barroca, B., Laganier, R., 2012. *Resilience and Urban Risk Management*. CRC Press. 193 pp.
- Smith, B., Wandel, J., 2006. *Adaptation, adaptive capacity and vulnerability*. Global Environmental Change 16 (3). P. 282-292
- Stone, W.C., Yokel, F.Y., Celebi, M., Hanks, T., Leyendecker, E.V., 1987. *Engineering aspects of the September 19, 1985, Mexico earthquake*. NBS Building Science Series 165, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 207 pp
- Tamez, E., Santoyo, E., Cuevas, A., Ovando–Shelley, E., 1995. *Diagnóstico y Proyecto geotécnico. Catedral Metropolitana: corrección geométrica, informe geotécnico*. Asociación de Amigos de la Catedral Metropolitana de México. P. 41-114
- Tamez, E., Santoyo, E., Ovando–Shelley, E., 1997. *Underexcavation of the Metropolitan Cathedral in Mexico City*. Proceedings of the XIVth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Vol. 4. P. 2105-2126
- Tamez, E., 2001. *Ingeniería de Cimentaciones: Conceptos Básicos de la Práctica*. TGC Geotecnia. 588 pp.
- Trifunac, M.D., Hudson, D.E., 1971. *Analysis of the Pacoima Dam accelerograms – San Francisco earthquake of 1971*. Boletín de la Sociedad Sismológica de América, Vol. 61, No. 5. P. 1393-1411
- Tuckwell, G. W., Lonergan, L., Jolly, R. J., 2003. *The control of stress history and flaw distribution on the evolution of polygonal fracture networks*. Journal of Structural Geology 25. P. 1241-1250
- Veyret, Y., 2004. *Les risques*. Paris, Breal. Dossiers des Images économiques du monde. 255 pp.
- Zeevaert, L., 1953. *Estratigrafía y problemas de ingeniería en los depósitos de arcilla lacustre de la Ciudad de México*. Memoria del Congreso Científico Mexicano Vol. 5. P. 58-70
- Zeevaert, L., 1988. *Sismo-geodinámica de la superficie del suelo y cimentación de edificios en la Ciudad de México*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 1ª edición. 240 pp.