



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MAPAS DE RIESGO POR SUBSIDENCIA Y SU FALLAMIENTO ASOCIADO MEDIANTE INSAR: CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:
ENRIQUE ANTONIO FERNÁNDEZ TORRES

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ENRIQUE CABRAL CANO
Instituto de Geofísica

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. ERIC MORALES CASIQUE
Instituto de Geología
DR. SERGIO RAÚL RODRIGUEZ ELIZARRARÁS
Instituto de Geología

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Julio de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Código de Ética	5
Resumen	6
Capítulo 1. Generalidades	9
1.1. Introducción	9
1.2. Planteamiento del problema	10
1.3. Motivación	10
1.4. Hipótesis	10
1.5. Objetivos	11
1.5.1. Objetivo General	11
1.5.2. Objetivos específicos.....	11
1.6. Materiales y Métodos	11
1.7. Antecedentes	11
Capítulo 2. Geología de la Ciudad de México	13
2.1. Contexto de la Cuenca de México	13
2.2. Estratigrafía de la Cuenca de México.	15
2.2.1. Mesozoico.....	15
2.2.2. Cenozoico	16
Capítulo 3. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para la estimación de la Velocidad de Subsistencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia en la Ciudad de México	25
3.1. Definiciones	25
3.1.1. Radar, SAR e InSAR.....	25
3.2. Metodología para la generación de los mapas de Velocidad de Subsistencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia.	27
3.2.1. Metodología para la generación de los mapas de Velocidad de Subsistencia.....	27
3.2.2. Metodología para la generación de los mapas de Gradiente Horizontal de Subsistencia.....	29
3.3. Resultados y discusiones de los mapas de Velocidad de Subsistencia y de Gradiente Horizontal de Subsistencia	32
Capítulo 4. Correspondencia entre las fallas asociadas a subsidencia medidas en campo y el Gradiente Horizontal de Subsistencia.	34
4.1. Definiciones	34
4.1.1. Fracturas y fallas.....	34
4.1.2. Fracturamiento y fallamiento en la Ciudad de México ocasionado por la subsidencia del terreno en la Ciudad de México	35
4.1.3. Zonificación Geotécnica del Valle de Mexico.....	36

4.2. Metodología para determinar la correspondencia entre las fallas asociadas a subsidencia medidas en campo (CENAPRED, 2017) y el Gradiente Horizontal de Subsidencia.....	37
4.3. Resultados y discusión de la correspondencia entre las fallas medidas en campo (CENAPRED, 2017) y el Gradiente Horizontal de Subsidencia.	42
Capítulo 5. Población, Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica en la Ciudad de México	45
5.1. Definiciones	45
5.1.1. AGEB, Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica.	45
5.2. Metodología para la generación de los mapas de Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica.....	45
5.2.1 Mapas de Población y de Densidad de Población por AGEBs.....	45
5.2.2. Mapas de Vulnerabilidad Socioeconómica	48
5.3. Resultados y discusión de los mapas de Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica.....	51
Capítulo 6. Mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado.	56
6.1. Contexto del mapa de riesgo.	56
6.2. Metodología para la generación de los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado.....	56
6.3. Resultados y discusiones de los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado.	63
Capítulo 7. Distorsión angular de las estructuras civiles en la Ciudad de México.	68
7.1. Contexto teórico de los mapas de Distorsión Angular	68
7.1.1. Distorsión Angular y desplazamiento vertical admisible	68
7.2. Metodología para la elaboración del Mapa de Distorsión Angular para la Ciudad de México y productos asociados.....	71
7.2.1. Mapa de Distorsión Angular	71
7.2.2. Mapas de Distorsión Angular admisible para Cimentaciones someras y profundas, Edificios de Armazón y Ladrillos.	73
7.2.3. Mapas de escenarios de Distorsión Angular para la Ciudad de México	81
7.2.4. Mapas de Distorsión Angular para las estructuras vitales de la Ciudad de México	89
7.2.5. Mapas de correspondencia entre las edificaciones dañadas durante el sismo del 19 de septiembre y los valores de distorsión angular de la Ciudad de México.....	97
7.3. Resultados y discusión	102
Capítulo 8. Conclusiones	109
Capítulo 9. Referencias Bibliográficas.....	112

Agradecimientos

Al Dr. Enrique Cabral Cano, por su excelente dirección durante el desarrollo de esta tesis.

Al CONACyT, por la beca otorgada para la realización de esta tesis.

A los Drs Eric Morales, Sergio Rodríguez, David Novelo y Penélope López por sus valiosas contribuciones y correcciones para el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial al Posgrado de Ciencias de la Tierra por brindarme el privilegio de ser parte de tan prestigioso programa.

A Sol Moreno, por su gran apoyo y por ser mi compañera de vida, en sus diferentes facetas de estudio, trabajo, proyectos y muchos más.

A mi mamá, papá, hermanos, abuela, tíos, primos, suegros y amigos por brindarme su apoyo incondicional y afecto.

A Sandra Guerrero, por su gran apoyo brindado para poder venir a estudiar en la UNAM.

Al Dr. Darío Solano, por brindarme su asesoría y permitirme usar sus datos procesados de InSAR.

A Ing. Luis Salazar, por su gran apoyo en el desarrollo de mi tesis.

Al proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México”, por darme acceso a la información de su base de datos, la cual fue de vital importancia para la generación de los mapas de riesgo.

Al proyecto DRASTIC-Sg, por permitirme tener acceso a su base de datos, lo cual fue parte importante para el desarrollo de este proyecto.

A Araceli Chamán, por su gran colaboración prestada en la realización de trámites administrativos antes y durante mi estancia en el programa de maestría.

Y a todos los que hicieron posible realizar mis estudios de maestría.

Código de Ética

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría.

Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Resumen

La subsidencia del terreno es un fenómeno presente en varias ciudades alrededor del mundo, y en muchas ocasiones está asociado a la sobreexplotación del agua subterránea y condicionado por las características estratigráficas del área. La Ciudad de México al tener una gran densidad de población, por las características del acuífero que la subyace y depender fuertemente del agua subterránea para satisfacer su demanda, no escapa de esta situación.

La presente investigación se basó en técnicas Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). Estas técnicas permiten tener una excelente caracterización espacial y temporal del proceso, posibilitando la estimación del campo de velocidades de subsidencia que es usado para la estimación del Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado en la Ciudad de México. Este proceso registra sus máximas velocidades y gradiente hacia la zona nororiental y suroriental de la ciudad a consecuencia de la confluencia entre grandes volúmenes de extracción de agua con materiales limo-arcillosos de naturaleza compresiva. Para este estudio se usó la estimación de la vulnerabilidad socioeconómica y distribución de la densidad de población los cuales se superpusieron con la subsidencia y gradiente de subsidencia del terreno, encontrándose que las zonas socioeconómicamente vulnerables y de mayor densidad poblacional de la ciudad coinciden espacialmente con las zonas de mayor velocidad y gradiente de subsidencia.

Este trabajo incluye la generación de varios escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado, de los cuales se escogió al escenario 2 como el mejor escenario debido a su robustez y el mismo indica que el total de área afectada por las categorías intermedio, alto y muy alto, debido a al mapa de riesgo socioeconómico y exposición poblacional son 119.51 km² y 64.31 km² respectivamente. Estas cifras corresponden a 1'644,421 y 1'358,873 habitantes respectivamente, por lo que un importante porcentaje de la población de esta ciudad está expuesto a sufrir afectaciones a causa de la subsidencia del terreno.

Otro producto obtenido por medio de este estudio son los mapas de distorsión angular asociados a la subsidencia del terreno. De esto se desprende que las zonas donde la distorsión angular en las estructuras civiles supera el valor recomendado de 0.002 radianes, afecta 97.49 km² del área urbana, dentro de la cual un aproximado de más de un millón de habitantes pueden ser perjudicados en su casa habitación o en la infraestructura urbana. Como parte de la evaluación de la distorsión angular asociada al proceso de subsidencia también se evaluó el comportamiento de las cimentaciones someras y profundas, así como de edificios de armazón o de ladrillos, encontrándose que la principal diferencia entre estos mapas se puede observar entre aquellos cuyos valores de corte son basados en el factor de seguridad de 1.5 con respecto a aquellos cuyo valor de corte derivan de un intervalo de confianza de 95%. Esto es debido a que estos últimos poseen valores límites para el intervalo admisible ligeramente menores.

A partir de los mapas de velocidad de subsidencia, se generaron proyecciones a 3, 10, 20 y 50 años, que indican que en los próximos 50 años entre 450 a 800 km² adicionales podrían ser alcanzados por la subsidencia de terreno, y afectar a entre 5 - 8 millones de personas adicionalmente.

Del análisis de la influencia de la distorsión angular en las estructuras civiles vitales se obtuvo que entre el 0% y 12.84% se encuentran en zonas de distorsión angular por encima del valor recomendado. Presentándose el caso más favorable para las radioemisoras AM/FM, ya que ninguna radioemisora se encuentra dentro de la zona desfavorable. Para el restante de las categorías de edificaciones vitales, se observa que su ubicación se encuentra preferentemente en la zona donde la distorsión angular no sobrepasa los valores admisibles, teniéndose un porcentaje que oscila entre 8% al 13% de edificaciones afectadas.

Finalmente se evaluó la correspondencia de la distorsión angular con la infraestructura vital y edificaciones dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 y se registró que entre el 6% y el 38% de estas edificaciones se encontraban por encima del valor recomendado de 0.002 antes de ser dañadas por este sismo.

Capítulo 1. Generalidades

1.1. Introducción

La subsidencia del terreno es un proceso natural y/o inducido que puede ser causado por varios factores tales como la actividad tectónica, deshielo de permafrost, minería subterránea, consolidación por extracción de fluidos, drenaje y oxidación de suelos orgánicos, procesos de hidrocompactación, compactación natural de los suelos, vulcanismo y formación de sumideros y cenotes (Galloway et al., 1999, 2011). De lo anterior se desprende que varios de los factores generadores de la subsidencia están ligados a los procesos hidrogeológicos (Galloway et al., 2016) y de políticas de uso y manejo de agua.

La región central de México constituye el área con la mayor densidad de población de todo el país (INEGI, 2011a), por lo que el consumo de agua para satisfacer las necesidades de la población es muy elevado y representa un gran reto para el desarrollo sustentable de esta región. Aproximadamente el 40% del agua utilizada proviene del bombeo de pozos de agua subterránea (CONAGUA, 2018), lo que ocasiona que, en muchas ciudades del centro de México, las tasas de extracción sobrepasen las de recarga natural. Esto trae a su vez como consecuencia el abatimiento de los niveles de agua de los sistemas acuíferos, causando la disminución en la presión de poro, ocasionando el aumento de la presión efectiva y generando de esta manera la consolidación del terreno (Carrillo, 1948). Es por esto que muchas ciudades de la parte central de México se vean afectadas por el proceso de subsidencia (Chaussard et al., 2014).

La caracterización del riesgo por subsidencia y fallamiento asociado en la Ciudad de México ha sido objeto de estudio de numerosas investigaciones (Carreón-Freyre 2006, 2011; Cabral-Cano, 2008, 2011, 2015; Solano-Rojas, 2013, 2018). En estas se ha logrado obtener la caracterización de la velocidad de subsidencia, las zonas más propensas a la formación de fallas asociadas y un estimado de la población y áreas que se encuentran en riesgo a consecuencia del proceso de subsidencia diferencial y a la densidad poblacional (Solano-Rojas, 2013).

La subsidencia del terreno en combinación con la heterogeneidad y condiciones del medio geológico y las características de las estructuras civiles, traen como consecuencia que estas últimas sufran un proceso de subsidencia diferencial, lo que se define como la diferencia entre la subsidencia medida entre dos puntos dados de la estructura civil (Ricceri y Soranzo, 1985). Este proceso ocasiona que un importante número de edificaciones y la infraestructura urbana sufran daños arquitectónicos, estructurales o ambos (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963; Burland y Wroth, 1974; Wahls, 1981, 1994). Para evaluar el grado de afectación de las estructuras civiles es de gran utilidad el concepto de distorsión angular, ya que este se puede expresar como la relación de la subsidencia diferencial δ y la distancia horizontal L entre dos puntos (Skempton y MacDonald, 1956).

Se considera que los daños a la infraestructura a consecuencia de la subsidencia diferencial del terreno han afectado una parte importante de la Ciudad de México, estando estos presentes principalmente hacia la zona centro y oriente de la zona urbana de la ciudad (Cabral-Cano, 2008,

2011, 2015; Solano-Rojas, 2018). Sin embargo, no se tiene hasta ahora una estimación de la afectación de este fenómeno a las estructuras civiles.

1.2. Planteamiento del problema

La Ciudad de México, al ser una ciudad con un alto número de habitantes, demanda una gran cantidad de agua potable para saciar las necesidades de sus habitantes. El agua que abastece a la ciudad proviene principalmente de la explotación del sistema acuífero que subyace a la Ciudad de México y el área conurbada del Estado de México. La extracción de agua del acuífero tiene su inicio en 1847, cuando Pane y Molteni perforaron los primeros pozos de hasta 105 metros de profundidad (Telléz, 1899). Desde entonces, la perforación de pozos ha aumentado en número y profundidad de extracción de agua por medio del bombeo, a la misma razón con la que crece la población y la infraestructura. Esta relación ha traído como consecuencia que se extraiga mucha más agua de la que entra al sistema acuífero, lo que genera sobreexplotación de éste y por lo tanto, la disminución de la presión de poro y un aumento en la presión efectiva, lo cual ha ocasionado la subsidencia del terreno (Carrillo, 1948; Galloway et al., 1999, 2011, 2016).

El estado de los esfuerzos debido a la sobreexplotación de agua subterránea conjugado con la heterogeneidad del medio geológico sobre el cual se asienta la Ciudad de México, trae como consecuencia el desarrollo de subsidencia diferencial. Esta circunstancia promueve el desarrollo de fallas someras asociadas a este proceso que dañan todo tipo de estructuras civiles e infraestructura urbana, y que generan grandes pérdidas económicas, que en algunos casos, son de gran valor histórico y cultural (Santoyo-Villa y Ovando, 2008; Auvinet et al., 2017).

1.3. Motivación

Aunque se han realizado estudios sobre el proceso de subsidencia en la Ciudad de México, el mismo es un proceso complejo que va evolucionando con el tiempo (Marsal y Mazari, 1959; Auvinet et al., 2017). Debido al aumento sostenido de la población y por consiguiente sus necesidades de bienes y servicios, es de vital importancia tener un monitoreo continuo, sistemático y cada vez con mayor detalle, de las zonas de generación de fallas asociadas a la subsidencia del terreno. Existen actualmente métodos indirectos que recurren a nuevas tecnologías para monitorear y evaluar los movimientos de grandes superficies; tal es el caso de las técnicas InSAR, las cuales han demostrado ser una excelente herramienta para el análisis y la variabilidad espacial del proceso de subsidencia en nuestro país (Cabral-Cano, 2002, 2011; López-Quiroz et al., 2009; Chaussard et al., 2014). Es por ello que es de gran importancia estudiar y determinar el riesgo por subsidencia y fallamiento asociado, ya que a partir de estos estudios se generarán productos que servirán en la planeación de ordenamiento territorial, uso de suelo y planeación de obras civiles, así como para la mitigación de los efectos del fenómeno de subsidencia del terreno.

1.4. Hipótesis

Las zonas de la Ciudad de México que tienen mayor desarrollo de fallas y fracturas son aquellas que contienen los mayores valores de gradiente de subsidencia. Y estas áreas a su vez coinciden

con las zonas de mayor vulnerabilidad socioeconómica y densidad de poblacional. Lo que ocasiona que un área importante de la ciudad se encuentre afectadas por el riesgo socioeconómico por subsidencia. Esta trae como consecuencia una importante afectación en la infraestructura de la Ciudad de México, lo que su vez la hace más vulnerables a fenómenos geológicos tales como sismos de gran magnitud.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Determinar la variabilidad espacial y temporal del riesgo socioeconómico y exposición poblacional por subsidencia y su fallamiento asociado en la Ciudad de México utilizando campos de velocidades obtenidos con técnicas InSAR y sus productos derivados e información de densidad de población, establecer las afectaciones potenciales en la integridad de estructuras civiles comprometidas por subsidencia diferencial y establecer escenarios que proporcionen un panorama del desarrollo de este fenómeno a futuro.

1.5.2. Objetivos específicos

- Caracterizar espacial y temporalmente el proceso de subsidencia diferencial en estructuras civiles.
- Generar un mapa de exposición poblacional por subsidencia y fallamiento asociado para la CDMX.
- Determinar el riesgo socioeconómico por subsidencia y fallamiento asociado.
- Generar estimaciones de distorsión angular y los estados límite de las edificaciones afectadas por la subsidencia diferencial a partir de productos InSAR.

1.6. Materiales y Métodos

Los insumos a utilizar serán el mapa de velocidad de subsidencia de la Ciudad de México y alrededores para el período noviembre 2014- noviembre 2017, obtenido por medio del procesamiento de escenas SAR provenientes de los satélites Sentinel-1 A y B, (Solano-Rojas et al., in press). La información de población, distribución de AGEBS, información geológica, edificaciones de interés y edificaciones dañadas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017, serán obtenidos de la base de datos del INEGI, el portal de datos abiertos de la Ciudad de México, del visualizador de inmuebles con daños en México del ERN, datos del proyecto DRASTIC-Sg (Hernández et al., 2016), datos del proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México” financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (Novelo-Casanova, comunicación personal).

1.7. Antecedentes

Una de las formas más económicas de resolver el problema de abastecimiento de agua potable ha sido la explotación del acuífero de la cuenca. La explotación de este recurso se inició con pozos artesianos, pero al poco tiempo tuvieron que ser remplazados por el bombeo de agua desde pozos más profundos a fines del siglo XIX (Auvinet et al., 2017). La sobre extracción de agua resulta en

el abatimiento del nivel piezométrico, lo que desencadena el aumento de los esfuerzos efectivos en suelo y subsuelo, induciendo deformaciones y eventualmente la subsidencia del terreno (Galloway y Buebey, 2011; Auvinet et al., 2017).

En el período 1937-1947 se opta por la perforación de más de 90 pozos profundos, produciéndose así un aumento significativo en la velocidad de la subsidencia de la ciudad. A partir de este momento, el problema de subsidencia en la Ciudad de México preocupa a las autoridades, por lo que éstas decretaron la primera veda para la apertura de pozos en la antigua traza de la Ciudad. Esto constituyó una solución provisional al problema de la subsidencia. Sin embargo, el crecimiento desmesurado de su población, obligo a la apertura de nuevos pozos profundos en diferentes zonas, lo que propició la subsidencia en áreas que antes no padecían de este problema (Auvinet et al., 2017).

Con estos antecedentes, la zona metropolitana de la CDMX ha experimentado un proceso intenso y prolongado de subsidencia del terreno y fallamiento superficial asociado como respuesta a la intensa extracción de agua subterránea y la deficiente administración de su acuífero y el recurso hidráulico. Como resultado, zonas bien delimitadas de la CDMX presentan daños en estructuras civiles, que van desde casas habitación hasta infraestructura urbana mayor. A partir del presente estudio, se han generado estimaciones de las áreas y población afectadas por este fenómeno, que se reflejan en mapas de exposición asociados a este proceso.

Capítulo 2. Geología de la Ciudad de México

2.1. Contexto de la Cuenca de México

La Cuenca de México se ubica dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Mexicana, que está controlada directa o indirectamente por la subducción de dos placas oceánicas (Placa de Cocos y Placa de Rivera) bajo la placa norteamericana, su magmatismo asociado y por un régimen tectónico esencialmente distensivo, que opera con diferentes magnitudes en la placa continental (Gómez-Tuena et al., 2005). El régimen tectónico convergente y por consiguiente el arco magmático han evolucionado de manera heterogénea por lo que ha sido objeto de discusión y controversia por muchos años (Gómez-Tuena et al., 2005).

La Faja Volcánica Mexicana (FVM) está constituida por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos (Demant, 1978 en Gómez-Tuena et al., 2005). La misma se extiende por aproximadamente 1,000 km de longitud y una amplitud irregular entre los 80 y 230 km y se encuentra orientada en dirección E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, ésta forma un ángulo cercano a los 16 grados con respecto a la trinchera Mesoamericana. La FVM puede ser dividida en tres sectores, con base en sus características geológicas y tectónicas (Demant, 1978; Pasquaré et al., 2002a en Gómez-Tuena et al., 2005) como se muestra en la Figura 2.1.

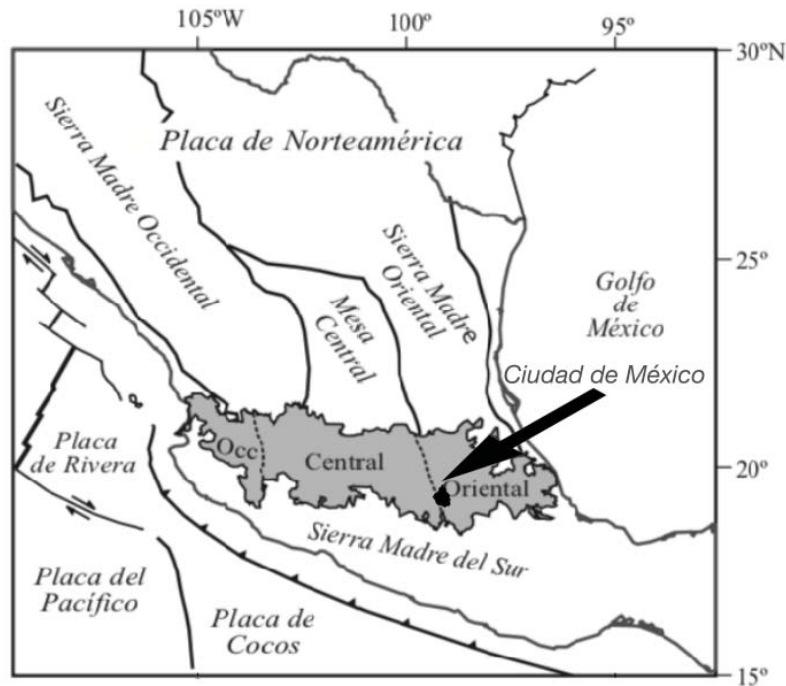


Figura 2.1. Ubicación de la Faja Volcánica Mexicana con sus tres sectores (en gris), mostrando las principales provincias geológicas de México y las placas tectónicas involucradas, de color negro se muestra la ubicación relativa de la Ciudad de México (Modificado de Gómez-Tuena et al., 2005).

La cuenca de México se encuentra ubicada en la porción Centro-Oriental de la FMV (Figura 2.1) y está delimitada por el sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (Alaniz-Álvarez et al., 2002a). La cuenca se encuentra rodeada al norte por la Sierra de Guadalupe, al este por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oeste por la Sierra de las Cruces (Figura 2.2 y 2.3). La Cuenca de México la constituye la Ciudad de México, porciones del Estado de México, Hidalgo y Tlaxcala. Esta posee un área de aproximadamente 9,600 km², su planicie central tiene una elevación que oscila entre 2,240 msnm al sur y 2,390 msnm al norte. El régimen endorreico y la subsecuente sedimentación lacustre es consecuencia del intenso vulcanismo que dio origen a la Sierra de Chichinautzin (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), hace aproximadamente 600,000 años, ya que la cuenca originalmente drenaba sus aguas al océano Pacífico (Santoyo-Villa et al., 2005). El origen de la planicie lacustre, sobre la cual se asienta hoy en día la Ciudad de México, se explica a partir del paulatino azolvamiento del vaso de la cuenca recién formado, que se originó a consecuencia del cierre de la cuenca.

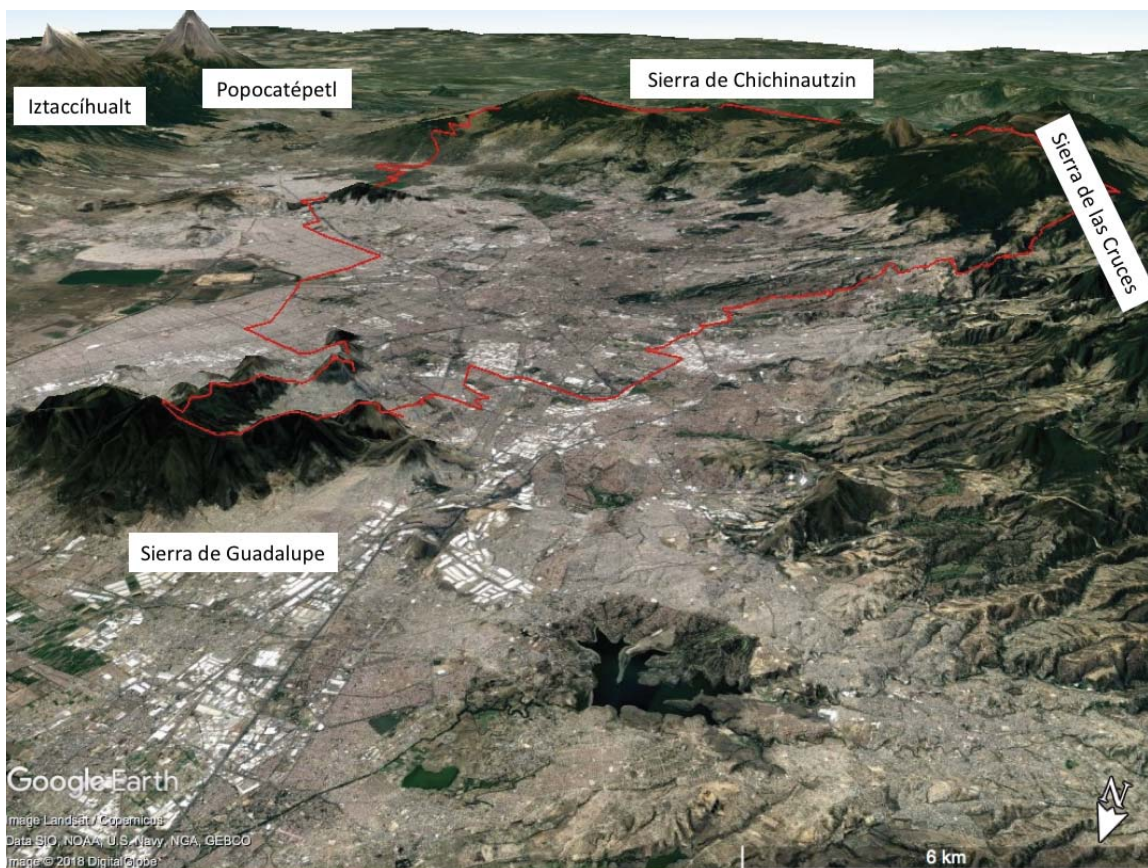


Figura 2.2. Vista de la Cuenca de México con sus características fisiográficas distintivas, la vista es desde el noroeste hacia el sureste, el polígono rojo indica la periferia de la CDMX.

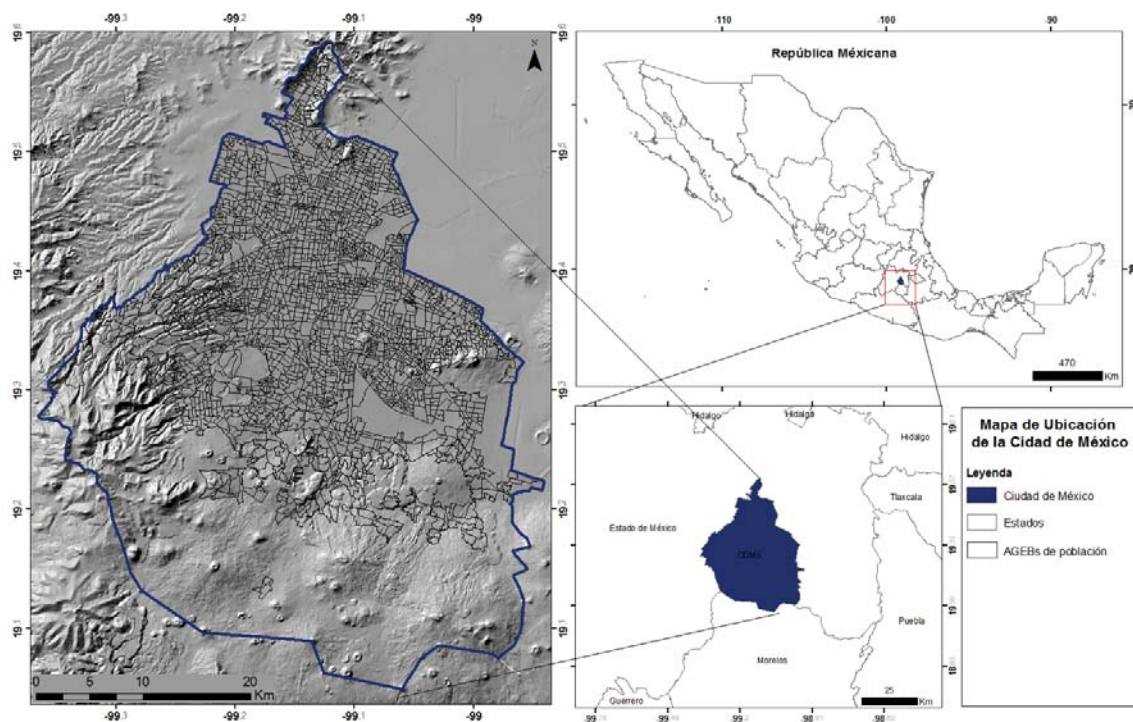


Figura 2.3. Mapa de Ubicación relativa de la Ciudad de México. El modelo digital de elevación que fue usado para todos los mapas de la presente investigación, proviene del Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2013).

2.2. Estratigrafía de la Cuenca de México.

Existen innumerables trabajos sobre la estratigrafía de la Cuenca de México, para esta investigación se usará las publicaciones de Mooser, 1975, Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989, Mooser, Montiel y Zuñiga, 1996 y Arce et al., 2019, esto debido a sus muy buenas descripciones y la mayoría de ellas son de amplia aceptación en la comunidad científica. Esto permitirá conocer de manera detallada la geología superficial y subterránea de la cuenca, así como la sucesión de eventos que allí han tenido lugar.

2.2.1. Mesozoico

2.2.1.1 Unidad Sedimentaria Marina

La sedimentación marina calcárea prevaleció casi durante todo el Mesozoico en lo que hoy en día constituye la Cuenca de México, desarrollándose la depositación de rocas carbonatadas del Aptiano al Turoniano Tardío. Esta sedimentación cambió a tipo flysch en el Coniaciano y el Campaniano Temprano (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989). Durante este período se depositaron las formaciones Xochicalco, Morelos, El Doctor, Cuautla y Mexcala (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), como se aprecia en la Tabla 2.1.

La depositación de calizas laminares, calcarenitas, nódulos de pedernal, dolomías diagenéticas y turbiditas son las características litológicas del Mesozoico. Los ambientes sedimentarios gradaron desde ambientes marinos relativamente profundos del Aptiano, pasando por plataforma marina, banco y litoral para finalizar con el desarrollo de ambientes turbidíticos como consecuencia del levantamiento y erosión del arco magmático del Cretácico (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Tabla estratigráfica del Mesozoico para la Ciudad de México construida con base en información del subsuelo, tomado de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989.

Era	Edad	Unidad	Formación	Litología
Mesozoico	Turoriano- Maestrichtiano	Unidad Sedimentaria Marina	Formación Mexcala	Turbiditas, limolitas y lutitas
	Cenomaniano Tardío- Turoniano Tardío		Formación Cuautla	Calcarenitas
	Aptiano Medio- Cenomaniano		Formación Morelos	Calizas y dolomías
	Aptiano		Formación Xochicalco	Calizas arcillosas y limosas

2.2.2. Cenozoico

Previo al Eoceno, el área que ocupa hoy en día la Cuenca de México, estaba ocupada por mares tropicales someros, que poco a poco se fueron retirando, debido al levantamiento y plegamiento sufrido por los sedimentos calcáreos, la transición a un ambiente de depósito continental y de influencia volcánica (Mooser, 1975). Este vulcanismo inició a finales de Eoceno y comprende siete fases (Mooser, 1975). En los depósitos del Eoceno, se puede encontrar cantos rodados de calizas, yesos y en algunos casos tobas volcánicas rellenas sinclinales. Las tobas volcánicas pertenecen a la primera fase vulcanismo de composición intermedia a ácida, y que no se observan en superficie (Mooser, 1975). Según las descripciones litológicas de los trabajos de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989 y Arce et al., 2019 esta fase se correlaciona a lo que estos últimos denominan como el Grupo Balsas y para Mooser et al., 1996 es conocido como Formación Balsas (Tabla 2.2).

La segunda fase de actividad volcánica corresponde a las rocas más antiguas que afloran en la cuenca. Esta fase está constituida por lavas intermedias y ácidas, con abundantes ignimbritas y tobas que también contienen depósitos fluviales. Afloran hacia el noroeste de la cuenca y pertenecen al Oligoceno Inferior y el Oligoceno Medio (Mooser, 1975; Tabla 2.2).

La tercera fase corresponde al Oligoceno Superior, se caracteriza por la presencia de rocas volcánicas de composición ácida, formando grandes depósitos de riolitas y dacitas principalmente. Las rocas pertenecientes a esta fase se encuentran fuertemente erosionadas y sobre ellas tiene desarrollo la base de lo que más tarde serán las Sierras Mayores localizadas al oeste de la actual

Cuenca de México. A esta fase pertenecen las pequeñas elevaciones aisladas del Peñón de los Baños, Tlapacoya y Chapultepec (Mooser, 1975; Tabla 2.2).

Según las descripciones del trabajo de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989, las fases 2 y 3 se correlacionan a las Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv; Tabla 2.2; Figura 2.4). Para Mooser et al., 1996, estas dos fases corresponden a las Vulcanitas del Oligoceno (Tov; Tabla 2.2; Figura 2.5 y 2.6;). Por su parte, según las descripciones litológicas de Arce et al., 2019 estas dos fases corresponden a la Formación Tilzapotla (Tabla 2.2). Arce et al., 2019, señala que estas rocas solo afloran al sur de la ciudad de Cuernavaca en los alrededores de la ciudad de Temixco.

La cuarta fase de vulcanismo se registra durante el Mioceno y está representada por el complejo principal de la Sierra de Guadalupe, caracterizado por lavas intermedias a ácidas. Los cuerpos rocosos que componen a esta fase están menos fracturados y erosionados que los de la fase tres y se caracteriza por la presencia de domos dacíticos (Mooser, 1975). Esta fase se correlaciona a las Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv) (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Figura 2.4) y a la Formación Tepoxtlán (Arce et al., 2019; Tabla 2.2 y Figura 2.7) debido a la similitud en las descripciones litológicas, ubicación y edades.

A finales del Mioceno se inicia la quinta fase volcánica, durante la cual se formaron las Sierras Mayores. Al este se formaron la Sierra Nevada y de Río Frío y al oeste se formaron la de Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. Estas sierras son el producto de efusiones andesíticas y dacíticas a través de estratovolcanes (Mooser, 1975). La quinta fase se correlaciona con los Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv; Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989; Tabla 2.2 y Figura 2.4) y al inicio del vulcanismo Plioceno-Holoceno (Arce et al., 2019; Figura 2.7) con base en la similitud entre las descripciones de los autores. Según el trabajo de Mooser et al., 1996, las fases 4 y 5 corresponden a las Vulcanitas del Mioceno (Tmv; Tabla 2.2 y Figuras 2.5 y 2.6). Mooser et al., 1996, considera que las Vulcanitas del Mioceno constituyen una unidad diferente de las vulcanitas del Oligoceno debido al comportamiento observado por las líneas sísmicas de reflexión ya que estas presentan un sistema de fracturamiento E-W, mientras que las rocas del Oligoceno presentan fracturamiento N-S.

La sexta fase se desarrolló durante el Plioceno-Pleistoceno con un vulcanismo andesítico-basáltico. Durante esta fase se desarrollan el grupo de las sierras menores que muestran menor tectonismo y aún conserva su forma cónica, aunque erosionadas, por su menor antigüedad. Durante esta fase se formaron grandes domos dacíticos y gran multitud de erupciones fenobasálticas y andesíticas. Entre los cerros que se formaron durante esta fase están: el cerro de la Estrella, el Peñón del Marqués, Chiconautla, y el Cerro Gordo (Mooser, 1975). Esta fase se correlaciona con la depositación de las Vulcanitas del Plioceno (Tpv; Tabla 2.2; Figuras 2.4 y 2.5; Mooser et al., 1996). En las líneas sísmicas de reflexión, se detectan depósitos lacustres Pliocenos debajo de la Ciudad de México, los cuales contienen intercaladas lavas de composición basáltica (Mooser et al., 1996). Sobrepuestos a los depósitos lacustres y a las vulcanitas, se desarrollan numerosos estratovolcanes, de composición intermedia, con la presencia de domos ácidos, y que constituyen las Sierras Menores (Tpv), entre ellas destacan la Sierra de Guadalupe (TpG) y Xochitepec (TpM; Figuras 2.4 y 2.5; Mooser et al., 1996).

La séptima fase inició hace aproximadamente 1 millón de años y se caracteriza por la formación de la Sierra del Chichinautzin, la cual es el resultado de la edificación de más de un centenar de conos, material piroclástico y derrames lávicos. Como resultado de la formación de esta sierra se produce el cierre de lo que ahora es la Cuenca de México, dando paso a la formación de un sistema lacustre al interior de esta (Mooser, 1975). Esta fase se correlaciona con el desarrollo de las vulcanitas del Cuaternario (Qc, Qiv, Qv y T; Tabla 2.2; Figuras 2.4 y 2.5; Mooser et al., 1996). Aunque Mooser et al., 1996, establece que el inicio del desarrollo de las Sierras Mayores fue desde el Mioceno hasta principios del Cuaternario, como ya se mencionó, fue en el Pleistoceno Superior que éstas alcanzaron su máximo desarrollo, dado que importantes elementos de éstas descansan sobre conos de las sierras menores. Así las primeras erupciones plinianas de la Sierra de las Cruces cubren los flancos bajos de la Sierra de Guadalupe.

Las fases 6 y 7 de Mooser, 1975, se correlacionan a las formaciones Otomí (Tpo), Las Cruces (Tpc), Zempoala (Tpz), El Pino (Qpp), Tláloc (Qt) y Chichinautzin (Qc) según Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989 (Tabla 2.2; Figura 2.4) y a la continuación del vulcanismo Plioceno-Holoceno según las descripciones de Arce et al., 2019 (Figura 2.7).

A partir del cierre de la Cuenca de México se generan las condiciones para que en el fondo de la cuenca se interdigiten distintos tipos de materiales, entre los que destacan limos y arenas, sedimentos lacustres (arcillas y limos) y arenas y cenizas volcánicas que al intemperizarse generan las arcillas altamente compresivas de la Cuenca de México (Mooser, 1975).

Los Depósitos Aluviales (Qal, Figuras 2.5 y 2.6; Mooser et al., 1996), pertenece también al período cuaternario y posee menor extensión que la Formación Depósitos Lacustres, se encuentra principalmente al pie de la Sierra Nevada, Sierra de las Cruces y de la Sierra del Chichinautzin. Esta formación es la consecuencia del relieve acumulativo aluvial originado en las desembocaduras de pequeños cauces. Debido al cierre de la cuenca, los depósitos lacustres sepultan la mayoría de los antiguos ríos y abanicos aluviales. Estos depósitos se caracterizan por la alternancia de capas de acumulación de piroclastos, material arenoso y limos que algunas ocasiones están interestratificados con lavas. La descripción de estos depósitos concuerda con los establecidos por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989 definidos como Depósitos aluviales (Qal; Figura 2.4).

La Formación de los Depósitos Lacustres pertenecientes al período Cuaternario (Ql, Figuras 2.5 y 2.6; Mooser et al., 1996), es el resultado de la acumulación de sedimentos finos a consecuencia de las condiciones de baja energía en la cuenca. Esta unidad está constituida por arcilla y limos con pequeñas intercalaciones de arenas, gravas y escasos horizontes de tobas. En profundidad esta unidad suele presentar una capa de materiales duros, constituidos principalmente por ceniza volcánica densa y cementada provenientes del volcán Cerro de la Palma (Santoyo-Villa et al., 2005). Estos depósitos se correlacionan con los Depósitos lacustres (Qla) descritos por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989 (Figura 2.4) debido a sus características litológicas y posición estratigráfica.

En el trabajo de Arce et al., 2019, se agrupan los depósitos Aluviales y Lacustres en una sola unidad denominados lacustres, y es descrito como rocas volcánicas interestratificados con sedimentos lacustres (Figura 2.7).

Entre las unidades litológicas que usa Mooser et al., 1996 (Figuras 2.5 y 2.6), están (Qtr) para referirse a los depósitos de travertino, (Qt) para delimitar los depósitos de tobas acumuladas por la intensa actividad volcánica del cuaternario y (TQt) para referirse a zonas de taludes de tobas que fueron formadas por cenizas más antiguas.

Tabla 2.2. Correlación cronoestratigráfica entre las 7 Fases volcánicas de Mooser (1975) y sus equivalentes laterales según los mapas geológicos de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), Mooser et al., (1996) y Arce et al., 2019.

Mooser, (1975)	Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989)	Mooser et al., (1996)	Arce et al., (2019)
Fase 7 (Pleistoceno-Holoceno)	Formaciones: Otomí, Las Cruces, Zempoala, El Pino, Tláloc y Chichinautzin (Plioceno Tardío al Holoceno)	Vulcanitas del Cuaternario	Vulcanismo Plioceno-Holoceno
Fase 6 (Plioceno-Pleistoceno)		Vulcanitas del Plioceno	
Fase 5 (Finales del Mioceno)	Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano	Vulcanitas del Mioceno	Formación Tepoxtlán
Fase 4 (Mioceno)	Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío		
Fase 3 (Oligoceno Superior)	Rocas Volcánicas del Oligoceno Tardío- Mioceno Temprano	Vulcanitas del Oligoceno	Formación Tilzapotla (Oligoceno)
Fase 2 (Oligoceno Inferior al Oligoceno Medio)			
Fase 1 (Eoceno);	Grupo Balsas (Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano)	Formación Balsas (Eoceno)	Grupo Balsas (Eoceno)

**MAPA GEOLÓGICO DE
LA CIUDAD DE MÉXICO
Y ALREDEDORES**
(Vázquez-Sánchez y
Jaimes-Palomera, 1989)

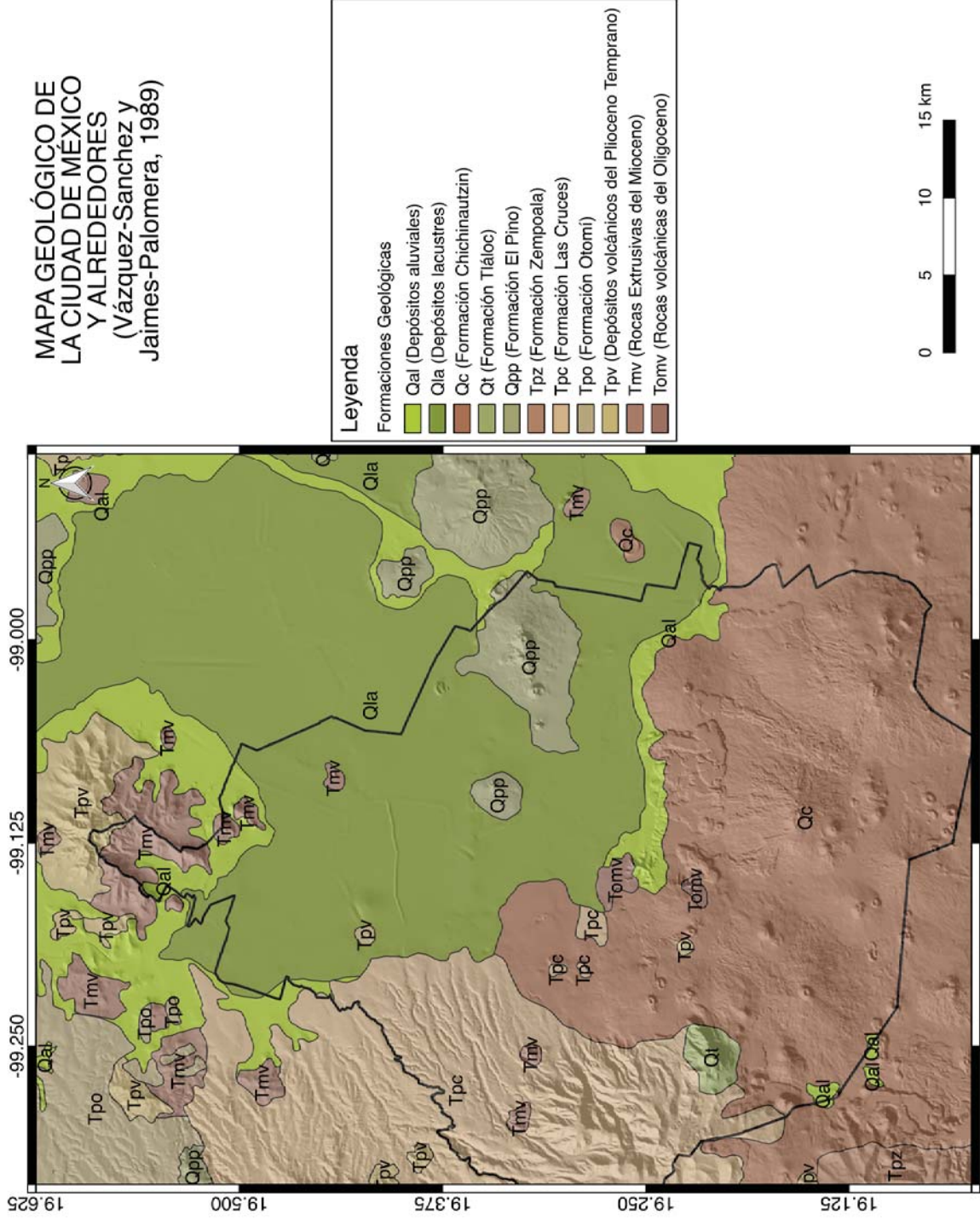


Figura 2.4. Mapa Geológico de la Ciudad de México y Alrededores (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

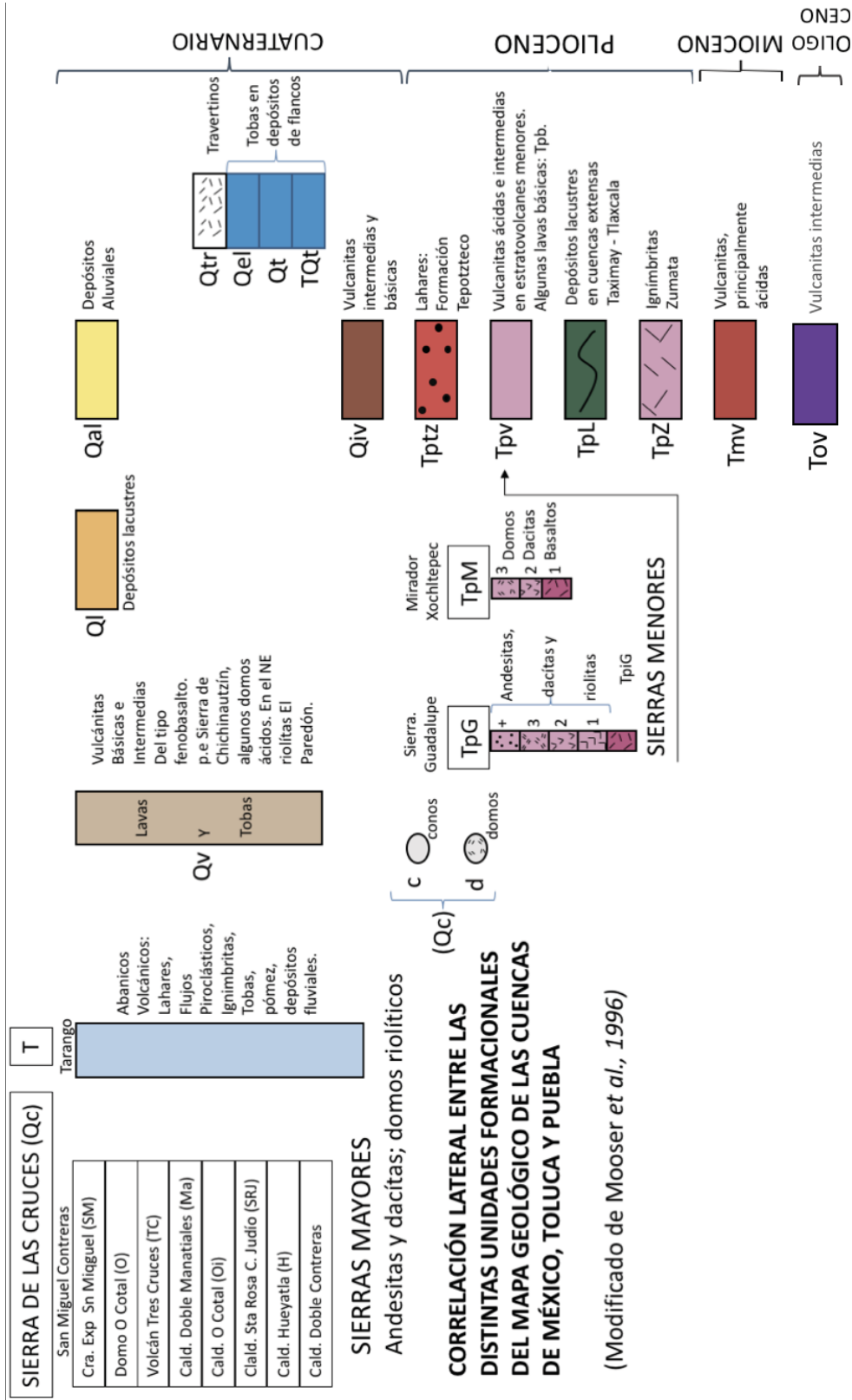


Figura 2.5. Correlación lateral entre las distintas unidades estratigráficas aflorantes de la Cuenca de México (Modificado de Mooser et al., 1996).

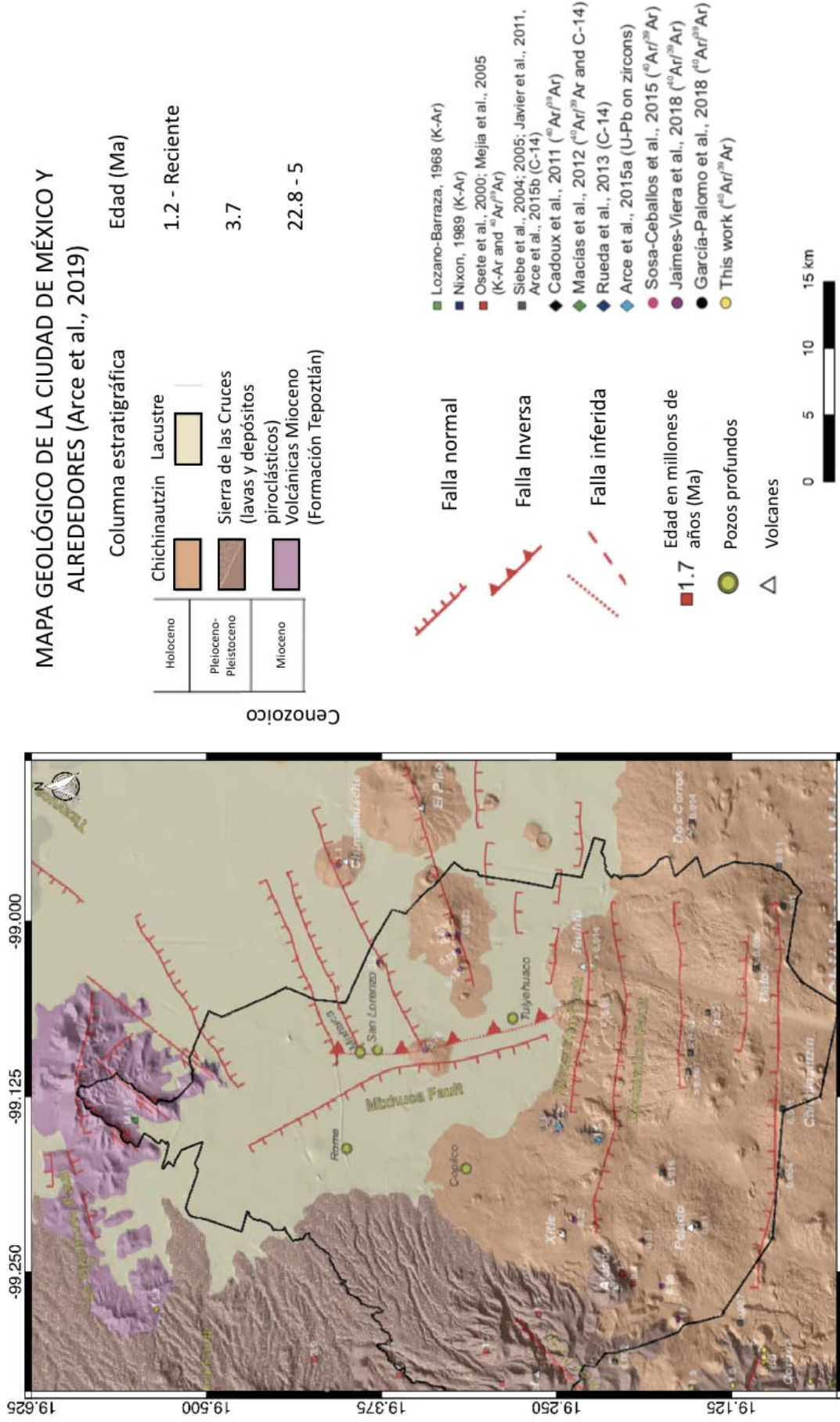


Figura 2.7. Mapa Geológico de la Ciudad de México y Alrededores (Arce et al., 2019).

Con base en las fallas mostradas en mapa geológico (Figura 2.7) Arce et al., 2019, señala que en la Cuenca de México puede ser reconocido la existencia de cuatro sistemas tectónicos. El más viejo es debido a la orogenia Laramide y afecta solamente las formaciones sedimentarias cretácicas y corresponde a fallamiento inverso en dirección N-S con buzamiento hacia el oeste. El segundo sistema es el que da origen al fallamiento normal Mixhuca. Este fallamiento fue identificado por datos sísmicos y está orientado en dirección NW-SE con buzamiento hacia el Oeste (Pérez-Cruz, 1988). Esta falla es la que da origen a la estructura tipo graben que es conocida como la Fosa Roma (Pérez-Cruz, 1988). El tercer sistema corresponde a un conjunto de fallas normales y dextrales, ambas orientadas en dirección NE-SW, debido a que este sistema afecta a la Sierra las Cruces puede ser considerado post Plioceno-Pleistoceno (García-Palomo, 2008 en Arce et al., 2019). El sistema más joven lo constituye un conjunto de fallas normales orientadas en dirección este-oeste, con presencia en la Sierra del Chichinautzin y a través de la Faja Volcánica Mexicana (FVM).

Por medio de los mapas geológicos mostrados (Figuras 2.4 a 2.7) y sus respectivas descripciones, se puede observar importantes similitudes entre estos. Principalmente en cuanto a sus características litológicas, lo que permite realizar una correlación cronoestratigráfica, entre las fases volcánicas que experimentó la Cuenca de México durante el Cenozoico Mooser, (1975) y sus equivalentes teniendo en cuenta los mapas geológicos de Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), Mooser et al., 1996 y Arce et al., 2019 (Tabla 2.2). A partir de esta correlación y los mapas mencionados (Figuras 2.4 a 2.7), se puede observar ciertas discrepancias en cuanto a los nombres de las formaciones, ubicación, edad y nomenclatura empleada. Estas diferencias pueden ser debidas a las metodologías utilizadas para designar los nombres de las formaciones y/o grupos, al diseño del levantamiento en campo, los análisis y técnicas de laboratorio que permitieron determinar las edades, entre otros factores.

Capítulo 3. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) para la estimación de la Velocidad de Subsistencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia en la Ciudad de México.

3.1. Definiciones

3.1.1. Radar, SAR e InSAR.

La palabra RADAR proviene del inglés (Radio Detection And Ranging) y consiste en el uso de sensores remotos para iluminar un objetivo en particular por medio de ondas electromagnéticas y usar la señal retrodispersada para obtener información de dicho objeto. Para ello se determina el tiempo de viaje, la amplitud, polaridad y fase de onda de la señal y de esta manera se pueden determinar distancias al objetivo y una imagen bidimensional del área que es barrida por el radar. El tipo de señal retrodispersada depende de la pendiente y rugosidad del terreno o elemento iluminado, así como de las propiedades dieléctricas del material de la superficie. Adicionalmente, la señal se ve afectada a su paso por la atmósfera (Bürgmann et al., 2000). Debido a las restricciones físicas en las dimensiones de las antenas en plataformas orbitales, la resolución del RADAR de apertura real está generalmente en el rango entre 5 y 10 km, dependiendo del tipo de sensor utilizado, por lo que su uso es limitado para aplicaciones de sensores remotos (Bürgmann et al., 2000; Pritchard, 2006). En contraste, los sensores de apertura sintética SAR (Synthetic Aperture Radar) permiten el mejoramiento de la resolución de la señal, que pasa desde una resolución kilométrica (RADAR) a métrica (SAR). La técnica SAR combina la información de las órbitas satelitales con técnicas de procesamiento de la señal, generando píxeles con resoluciones métricas y con coberturas de decenas a centenas de kilómetros.

Dos adquisiciones de datos SAR se pueden combinar para producir un interferograma, el cual puede revelar información del relieve del área o medir cambios de elevación muy sutiles de la superficie. La amplitud, es producto de la reflectividad o retrodispersión de la señal (e.g. Moreira et al., 2013). La técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) consiste en identificar las diferencias de fases contenidas en un interferograma. Para la generación de los interferogramas se requieren adquisiciones desde la misma posición del sensor o con una ligera diferencia y en distintos tiempos. Las imágenes obtenidas se representan como isolíneas de diferencia de fase entre ambas adquisiciones. Si entre ambas imágenes se tiene una variación en la superficie de la Tierra, se registra como una diferencia de fase, lo que implica una deformación en el terreno (Bürgmann et al., 2000). Si las adquisiciones SAR son tomadas desde puntos ligeramente diferentes se puede generar imágenes de la superficie del terreno.

La geometría básica que poseen los sensores SAR para las mediciones de amplitud y fase consiste en: Línea de Vista (LOS), ángulo de vista (Look angle), azimut y rango que proveen las direcciones con respecto al satélite (Figura 3.1). Los sistemas SAR operan en todas las condiciones de luz y condiciones atmosféricas. Las bandas más comunes y sus respectivas longitudes de onda en las que operan estos sistemas son: banda P (70 cm), banda L (23 cm), banda C (5.6 cm) y banda X (3.1 cm) (Solano-Rojas, 2018).

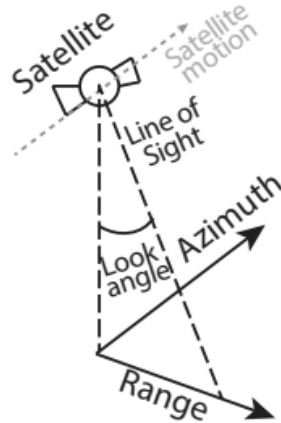


Figura 3.1. Geometría básica para la medición de sensores SAR (Solano-Rojas, 2018).

Existen diversos sensores SAR que son capaces de obtener información útil para un análisis interferométrico. Entre los principales sensores SAR actualmente en órbita para usos civiles están: ALOS, TerraSAR-X, COSMO-SkyMED y Sentinel-1. Cada uno de estos satélites ha sido lanzado con objetivos diferentes por lo que posee características particulares (Figura 3.2). La Tabla 3.1 muestra las características básicas de algunos de los sistemas satélites SAR.

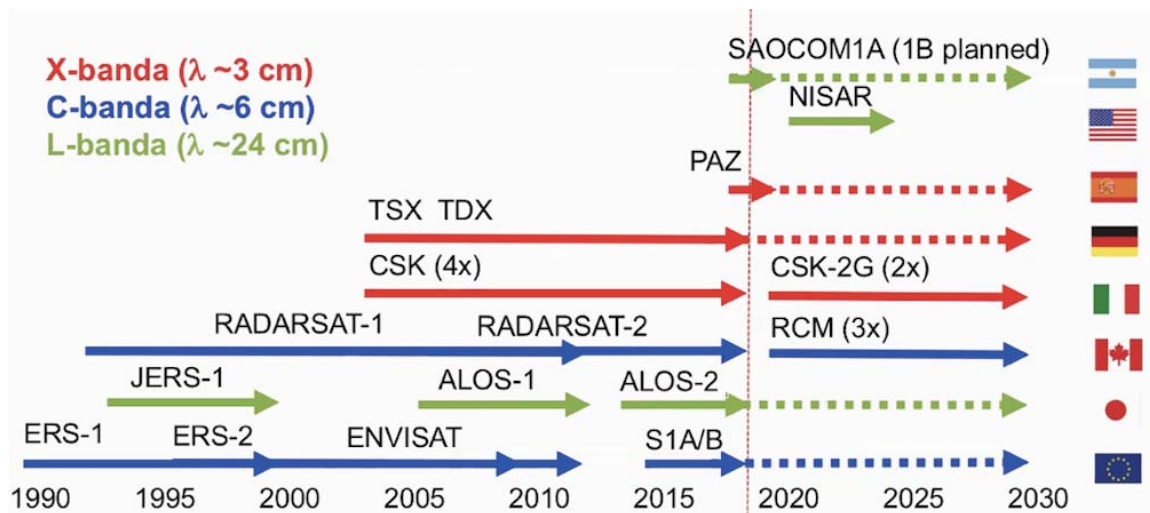


Figura 3.2. Sensores SAR, desde 1990, presente y misiones próximas. (Tomado de González, 2018, comunicación personal).

Tabla 3. 1. Resumen de las principales características de algunos de los principales sistemas satelitales SAR. (Modificado de Solano-Rojas, 2018).

Satélite	Agencia	Banda	Modo(s) de Adquisición	Rango de alcance-azimut(km)	Resolución espacial máxima (m)	Ciclos de repetición (días)	Duración de la misión
Sentinel 1 A/B	ESA	Banda C (5.6 cm)	Wide-swath	250x250	5	6	2014-presente
COSMO-SkyMED 1-4	ASI	Banda X (3.1 cm)	Spotlight, Strip map, ScanSAR	10x10, 40x40 y 100x100	<1,3,30	<1	20007-presente
TerraSAR-X	DLR	Banda X (3.1 cm)	Spotlight HS &SL, Strip map, ScanSAR	5x10, 10x10, 50x30 y 150x100	1.4,1.7,3,18	11	2007-presente
ALOS-2	JAXA	Banda L (24 cm)	Spotlight, ScanSAR, Strip map	55x70, 25x25 y 490x490	3,1,100	14	2014-presente

3.2. Metodología para la generación de los mapas de Velocidad de Subsistencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia.

3.2.1. Metodología para la generación de los mapas de Velocidad de Subsistencia

El procesado del mapa de velocidad de subsistencia usado para la presente investigación fue realizado por (Solano-Rojas et al., in press). El mismo lo obtuvo utilizando escenas de Radar de Apertura Sintética (SAR) adquiridas por los sensores Sentinel 1-A y B operando en la banda C-SAR para el período comprendido entre noviembre 2014 - noviembre 2017. Las escenas SAR fueron adquiridas usando la modalidad de Interferometric Wide Swath (IWS), que típicamente cubre áreas de 25x25 km (Solano-Rojas et al., in press). Una de las mayores ventajas del uso de este modo de adquisición, es la amplia cobertura espacial del sensor, lo cual hace posible cubrir de manera eficaz la totalidad de la Ciudad de México.

Solano-Rojas, et al., (in press), señala que los datos se procesaron en dos etapas.

1) La primera etapa consistió en el procesado interferométrico de pares de imágenes con líneas perpendiculares cortas (Rosen et al., 2012). En dicha etapa se removió la fase correspondiente a la topografía utilizando un Modelo de Elevación Digital; posteriormente, se realizó la inversión de los pares interferométricos (Fattahi y Amelung, 2013). La serie de datos obtenida se corrigió por error considerando de la calidad del Modelo de Elevación Digital y la atmósfera correlacionada a la topografía (Solano-Rojas et al., in press).

2) Habiendo obtenido la serie de tiempo, se estimó la tendencia de la subsistencia con respecto al tiempo para obtener la tasa de desplazamiento anual en la componente de la (LOS) del sensor. Dicha tasa de desplazamiento anual es lo que en este trabajo se refiere como la velocidad de subsistencia. Para el cálculo de la línea base de nula deformación, se utilizó la ubicación de la estación GPS UCHI siguiendo el mismo criterio de (Osmanoglu et al., 2011) para facilitar comparaciones con resultados anteriores (Solano-Rojas et al., in press).

Solano-Rojas et al., (in press), señala que es necesario realizar una interpolación al ráster de subsidencia original, cuya resolución es 160 x 160 metros, ya que se generaron artefactos debido a la heterogeneidad de la nube de puntos, a causa de las condiciones de correlación temporal de la fase de la señal SAR, y a otros insumos se presentan en diferentes formatos y resoluciones espaciales (e.g. base de datos de población del INEGI).

La interpolación realizada consistió en:

1) Utilizar la herramienta de Ráster to Point de QGIS v2.18, para convertir desde el formato ráster a puntos, para así poder exportarlo como un archivo de tipo *Valores Separados por Comas* (*.csv) y luego guardarlo como un *archivo de texto* (*.txt).

2) Se hace uso del software RStudio (versión 1.1.383) para realizar la interpolación. Para ello se programa una hoja que contenga los códigos necesarios para que llame al archivo (*.txt) que contiene la información de la velocidad de subsidencia y a las librerías que permitan hacer el análisis exploratorio de datos, para así conocer cómo se comportan los datos. Para este estudio, los datos de velocidad de subsidencia, resultaron tener una distribución log-normal.

3) Luego de conocer su distribución, se procede a hacer uso de diferentes interpoladores, para explorar cual expresa mejor la velocidad de subsidencia. En este caso el método del *Inverso de la Distancia Ponderada*, resultó ser el mejor interpolador. Esto debido a que la densidad de los puntos es buena y se encuentran distribuidos de manera más o menos uniforme. Esta interpolación permite generar celdas de 30 por 30 metros, que es la resolución utilizada para esta investigación, ya que se considera esta medida como un tamaño apropiado para poder operar con otros atributos tales como densidad de población por AGEBS.

Seguidamente, se llaman de nuevo los datos a QGIS v2.18 y se procede a recortar el ráster usando el archivo vector de AGEBS proveniente del Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2012a) como máscara.

A continuación, se ajusta la velocidad de subsidencia mínima. Para ello se calibró como velocidad de subsidencia cero a la velocidad de subsidencia promedio registrada en Ciudad Universitaria, ya que esta zona se considera como un área estable. Para esto se realizó lo siguiente:

1) Hacer uso del algoritmo *Estadísticas de zona* disponible en QGIS v2.18. Esto permitió conocer la velocidad promedio del polígono AGEBS de CU.

2) Se utilizó la *Calculadora Ráster* disponible en QGIS v2.18 para restar el valor promedio de velocidad de subsidencia obtenido a toda la capa ráster de velocidad de subsidencia.

Finalmente, se dividen la capa ráster obtenida en intervalos de clase haciendo uso de *Natural Breaks* (Jenks, 2007), obteniendo así el mapa de velocidad de subsidencia (Figura 3.3)

3.2.2. Metodología para la generación de los mapas de Gradiente Horizontal de Subsistencia.

El cálculo del Gradiente Horizontal de Subsistencia se realiza con la finalidad de encontrar las zonas más propensas a la generación de fracturas, aplicando la metodología propuesta por Cabral-Cano et al., (2008; 2014).

Para esto:

- 1) Se usa como capa de entrada el ráster de velocidad de subsidencia sin cortar, ya interpolada y con resolución de 30 x 30 metros, y se ingresa el algoritmo de *Pendiente* contenido en QGIS v2.18.
- 2) Se corta la capa usando como máscara el archivo vectorial de AGEBS de Población (INEGI, 2012a).
- 3) Se despliega la capa en cinco clases, usando como criterio inicial de clasificación el algoritmo de *Natural Breaks* (Jenks, 2007); ya que esto permite resaltar la variabilidad de los datos en los trabajos cartográficos (Figura 3.4).

Para conocer cuáles son las alcaldías que tienen los mayores valores de velocidad de subsidencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia, se procede a utilizar el algoritmo de *Estadísticas de zona* disponible en QGIS v2.18. Este permite calcular los parámetros estadísticos de la velocidad de subsidencia y Gradiente Horizontal de Subsistencia tales como valor mínimo, máximo, medio entre otros, ajustado al polígono de cada una de las alcaldías (Tablas 3.2 y 3.3).

MAPA DE VELOCIDAD DE SUBSIDENCIA DE LA CDMX AJUSTADO A LA VELOCIDAD DE SUBSIDENCIA DE C.U. PARA EL PERÍODO (NOV 2014- NOV 2017) (LOS)

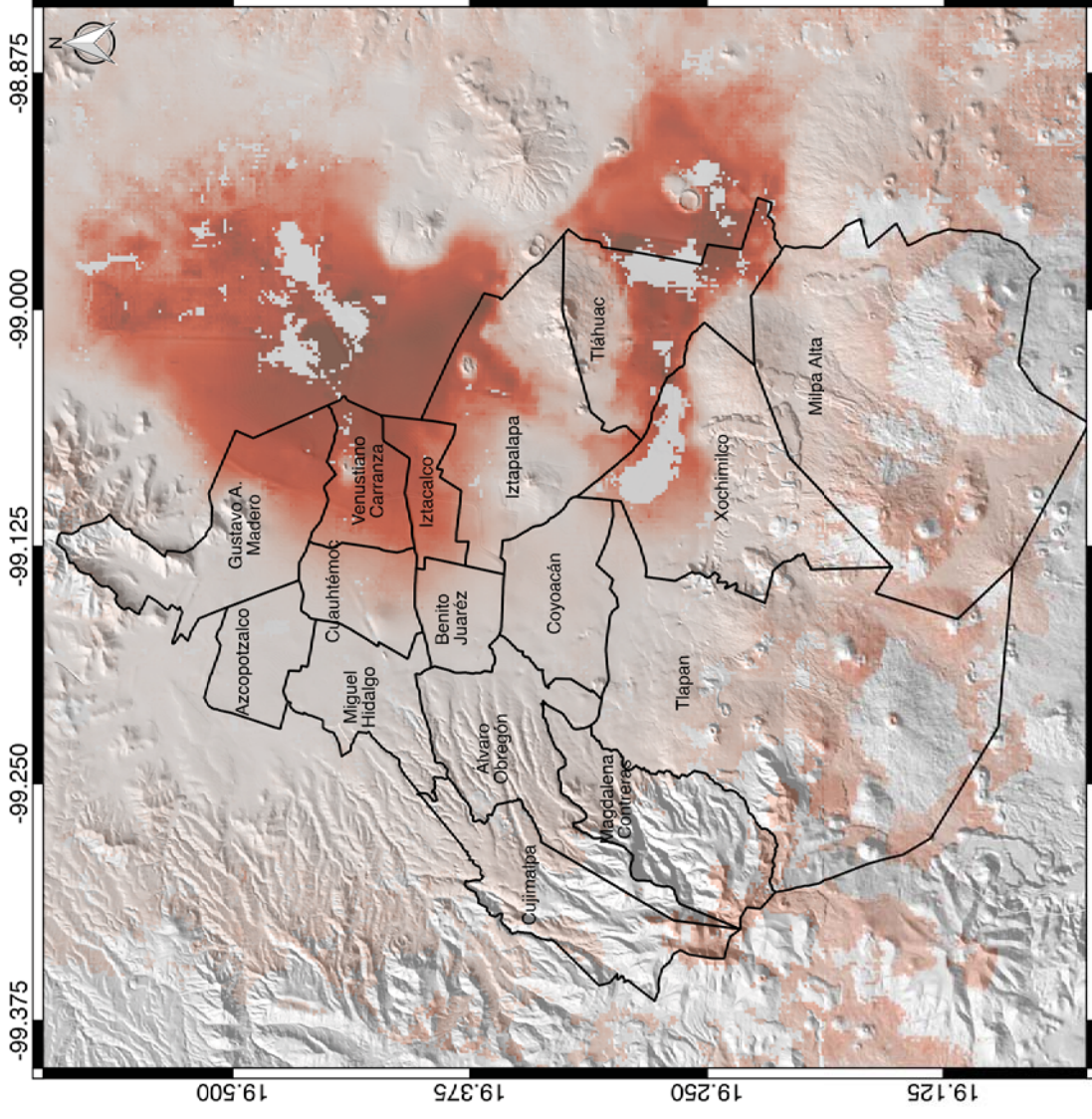


Figura 3.3. Mapa de Velocidad de Subsistencia de la Ciudad de México en m/año para el período 2014-2017 (LOS).

MAPA DE GRADIENTE
HORIZONTAL DE
SUBSIDENCIA DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

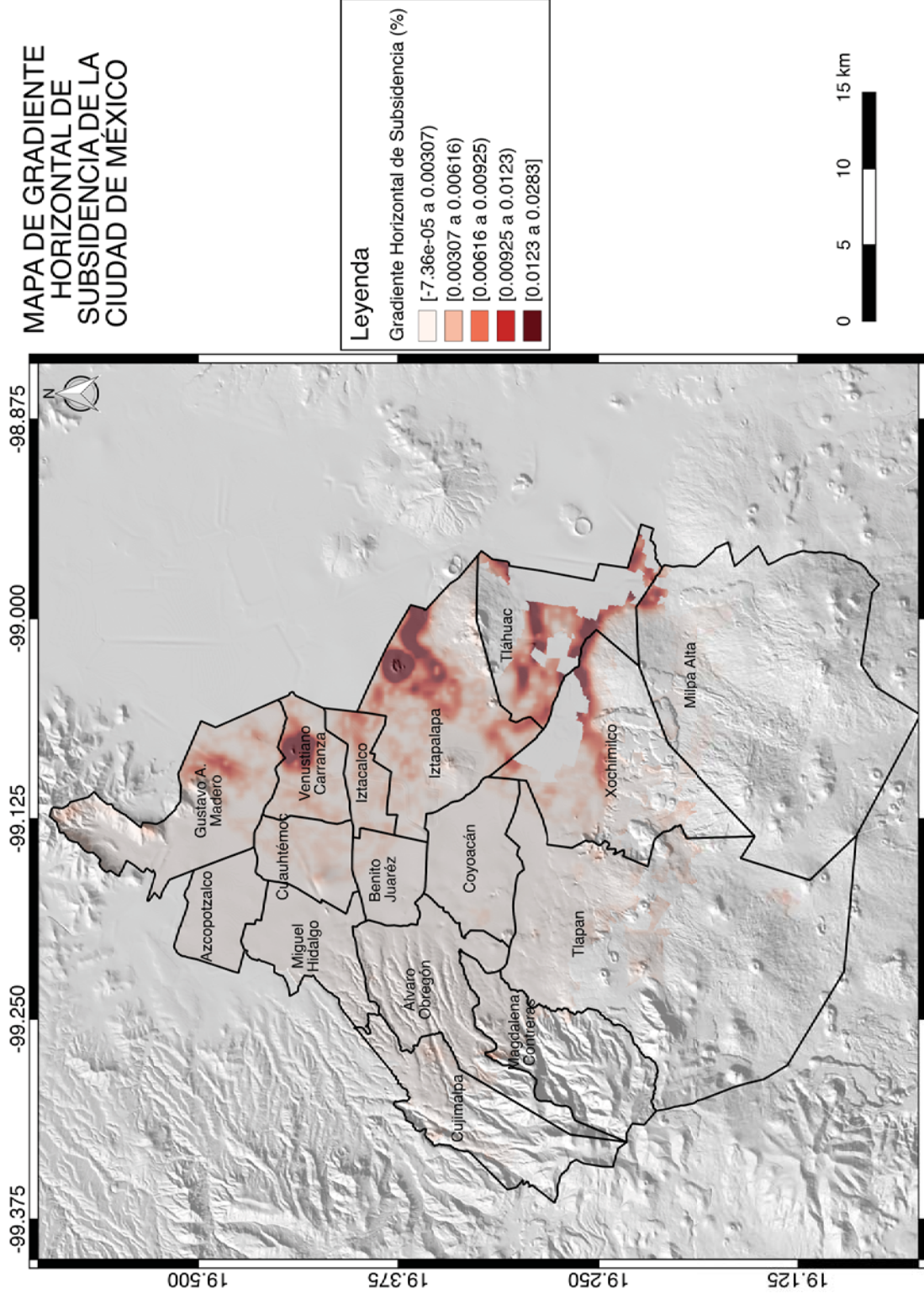


Figura 3.4. Mapa de Gradiente Horizontal de Subsidencia de la Ciudad de México.

Tabla 3.2. Estadística de Velocidad de Subsistencia para las alcaldías de la Ciudad de México, organizadas de mayor a menor a partir del valor de Velocidad de Subsistencia Máximo.

Alcaldía	Velocidad de Subsistencia (m/año) Máx.	Velocidad de Subsistencia (m/año) Min.	Velocidad de Subsistencia (m/año) Medio
Tláhuac	-0.27	0.01	-0.07
Iztapalapa	-0.26	0.02	-0.04
Xochimilco	-0.22	0.02	-0.02
Venustiano Carranza	-0.20	0.01	-0.11
Iztacalco	-0.18	-0.02	-0.10
Gustavo A. Madero	-0.17	0.02	-0.03
Milpa Alta	-0.13	0.02	-0.01
Cuauhtémoc	-0.08	0.02	-0.02
Tlalpan	-0.07	0.03	-0.01
Benito Jurez	-0.05	0.02	0.00
La Magdalena Contreras	-0.05	0.02	0.00
Cuajimalpa de Morelos	-0.05	0.02	0.00
Álvaro Obregón	-0.04	0.02	0.01
Coyoacán	-0.04	0.02	0.01
Miguel Hidalgo	0.00	0.02	0.01
Azcapotzalco	0.00	0.02	0.01

Tabla 3.3. Estadística de Gradiente Horizontal de Subsistencia (expresado en %) para las alcaldías de la Ciudad de México, organizadas de mayor a menor con respecto al valor de Gradiente Horizontal de Subsistencia Máximo.

Alcaldías	GHS (%) máx.	GHS (%) min.	GHS (%) media
Venustiano Carranza	0.02745	-0.00007	0.001076159
Tláhuac	0.02722	-0.00005	0.001316182
Iztapalapa	0.02603	-0.00007	0.001067817
Xochimilco	0.02548	-0.00003	0.001067541
Gustavo A. Madero	0.02038	-0.00005	0.00075085
Iztacalco	0.01755	-0.00004	0.000955091
Benito Juárez	0.0164	-0.00005	0.000470569
Milpa Alta	0.01519	-0.00004	0.000335024
Magdalena Contreras	0.01429	-0.00003	0.00038225
Cuauhtémoc	0.01384	-0.00007	0.00017719
Tlalpan	0.0125	-0.00004	0.000129343
Álvaro Obregón	0.01205	-0.00005	0.000242673
Coyoacán	0.00867	-0.00006	0.000320513
Miguel Hidalgo	0.00762	-0.00005	0.000127792
Azcapotzalco	0.00749	-0.00006	0.000167184
Cuajimalpa de Morelos	0.00305	-0.00002	0.000202258

3.3. Resultados y discusiones de los mapas de Velocidad de Subsistencia y de Gradiente Horizontal de Subsistencia.

A partir de los mapas generados de Velocidad de Subsistencia (Figura 3.3) para la Ciudad de México para el período noviembre 2014 - noviembre 2017, se observa que las mayores velocidades de subsistencia se registran hacia el nororiente y suroriente de la ciudad. Las

velocidades máximas se presentan en las alcaldías, Tláhuac, Iztapalapa, Xochimilco y Venustiano Carranza con -0.27 (m/año), -0.26 (m/año), -0.22 (m/año) y -0.20 (m/año) respectivamente (Tabla 3.2). En cuanto al valor medio, las alcaldías que presentan mayores velocidades de subsidencia son Venustiano Carranza (-0.11 m/año), Iztacalco (-0.10 m/año), Tláhuac (-0.07 m/año) e Iztapalapa (-0.04 m/año) (Tabla 3.2). La distribución espacial que presenta la velocidad de subsidencia en la Ciudad de México es ocasionada por las características estratigráficas del subsuelo, ya que, hacia la zona oriental de la ciudad los depósitos lacustres cubren la mayor parte de la superficie (Figura 2.5). Sin embargo, dentro de estos depósitos existen lugares que tienen mayor velocidad de subsidencia, esto debido a la heterogeneidad del medio geológico, que a su vez condiciona las variaciones de compresibilidad y la respuesta del medio ante la reducción de los niveles piezométricos del sistema acuífero a consecuencia del bombeo de pozos de agua subterránea (Carreón-Freyre et al., 2009) .

Para el caso del Gradiente Horizontal de Subsidencia, las alcaldías más afectadas también se ubican hacia el nororiente y suroriente de la Ciudad de México (Figura 3.4). Presentándose los gradientes de subsidencia máximos en las alcaldías Venustiano Carranza (0.02745%), Tláhuac (0.02722%), Iztapalapa (0.02603%) y Xochimilco (0.02548%) (Tabla 3.3). Por su parte, las alcaldías que presentan mayor valor medio de gradiente de subsidencia son Tláhuac (0.001316182%), Venustiano Carranza (0.001076159%), Iztapalapa (0.001076159%) y Xochimilco (0.001067541%) (Tabla 3.3). Las alcaldías anteriormente mencionadas son las más propensas a formar fallas a causa del fenómeno de subsidencia, esto debido a que hacia la zona oriente de la ciudad, las arcillas muy compresivas de los depósitos lacustres están en contacto con las rocas no compresivas de composición andesítico-basáltico, que son los constituyentes mayoritarios de la Sierra de Santa Catarina (Arce et al., 2015). Este fuerte contraste en el comportamiento de los materiales, aunado con la sobreexplotación de los acuíferos, promueve la generación de subsidencia diferencial, lo que ocasiona zonas de alto Gradiente Horizontal de Subsidencia y por consiguiente el desarrollo de fallamiento somero asociado.

Capítulo 4. Correspondencia entre las fallas asociadas a subsidencia medidas en campo y el Gradiente Horizontal de Subsidencia.

4.1. Definiciones

4.1.1. Fracturas y fallas

La palabra Fractura proviene del latín *fractus*, que significa “romper”. Las fracturas son superficies a lo largo de la cual las rocas y minerales han sido quebrados, creando dos superficies libres que no existía anteriormente. Las fracturas constituyen superficies a través de la cual los materiales han perdido cohesión (Twiss y Moores, 1992). Una fractura es cualquier discontinuidad planar o subplanar que es muy angosta en una dimensión en comparación a las otras dos dimensiones y se forma como resultado de esfuerzos externos (e.g. tectónicos) o internos (termales o residuales) (Fossen, 2010).

Existen tres Modos básicos en el desarrollo del fracturamiento. El modo I, es aquel que es generado por el esfuerzo tensional y actúa perpendicularmente con respecto al plano de fractura. Para el modo II, la propagación es realizada por un esfuerzo de cizalla que actúa dentro del plano de falla y es paralelo a la dirección de propagación de las fracturas y el modo III, es aquel que involucra esfuerzos de cizalla actuando dentro del plano de falla y en dirección perpendicular a la dirección de propagación. Las fracturas de tipo I o de extensión son conocidas como diaclasas, las fracturas de tipo II y III son conocidas como fracturas de cizalla (Figura 4.1). Se puede decir que cuando ocurre las fracturas de cizalla (modos II y III); nos estamos refiriendo a fallas y cuando ocurren las fracturas de tensión (modo I) estamos hablando que el desplazamiento es nulo o mínimo (Kulander, Barton y Dean, 1979; Hellan, 1984; Atkison, 1987; Engelder, 1987; Twiss y Moores, 1992).

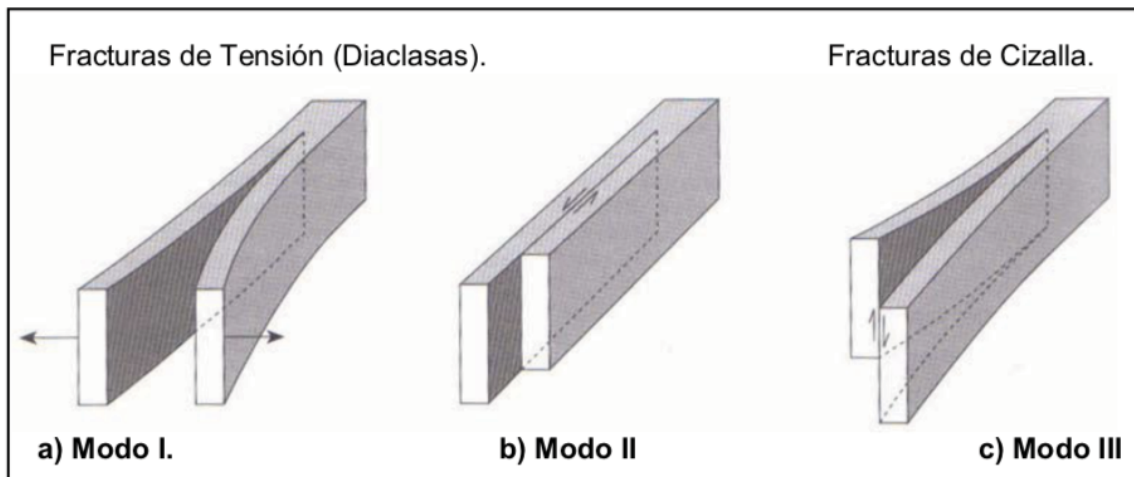


Figura 4.1. Esquema que muestra los diferentes tipos de fracturas según Kulander et al., 1979. (Tomado de Twiss y Moores, 1992).

En algunas ocasiones durante la propagación del diaclasamiento se puede dar el caso de coexistir el modo I de fracturamiento con los modos II y/o III. Esto es conocido como modo mixto de carga y ocurre en diferentes zonas y/o tiempos durante la historia de propagación

de una de una diaclasa (Davis y Reynolds, 1984; Younes y Engelder, 1999). Fossen, 2010, señala que el término fracturas de cizalla es usado para fracturas con pequeño desplazamiento (mm a dm), mientras que el término falla es comúnmente utilizado para discontinuidades con grandes desplazamientos.

La palabra falla no era inicialmente un término científico. Lyell, 1834, define falla, en el lenguaje de los mineros, como una súbita interrupción de la continuidad del estrato en el mismo plano, acompañada de una fractura o fisura cuyo espesor varía desde una línea a varios pies, la cual esta generalmente rellena de roca fracturada, arcilla, etc. Davis y Reynolds, 1984, definen falla como una discontinuidad a lo largo de la cual hay un desplazamiento visible, este desplazamiento es ocasionado por esfuerzos de corte. Para Twiss y Moores, 1992, una falla es una superficie o zona estrecha en la corteza terrestre a lo largo de la cual uno de los lados se mueve con respecto al otro en una dirección paralela a la superficie a la superficie o zona. Hatcher, 1995, define falla como una fractura que tiene movimiento apreciable paralelo al plano de la fractura. Por su parte Ragan, 2009, falla es una superficie a lo largo de la cual se han desarrollado desplazamientos apreciables. Esta superficie puede ser plana o curviplana. Fossen 2010, señala que el término falla es usado de diferentes maneras, dependiendo del contexto. Una definición simple y tradicional, establece que una falla es cualquier superficie o zona angosta con un visible desplazamiento de cizalla a lo largo de esta zona.

El fallamiento del terreno puede ser causado por procesos geológicos o climáticos (tales como expansión y contracción del terreno, levantamiento o subsidencia neotectónica, disolución de suelo/roca, oscilaciones en el nivel del agua subterránea, actividad sísmica o volcánica y deslizamientos del terreno). Este fallamiento también puede ser ocasionado por acciones antropogénicas (e.g. bombeo de agua subterránea, minería, extracción de hidrocarburos, trabajos de ingeniería subterránea o superficial) (Brunori et al., 2015).

Holzer, 1988, indica que debido a al proceso de extracción de agua se pueden formar dos tipos de fallamiento. El primer tipo de fallas las denomina fallas de tracción, y las segundas las denomina fallas de corte o fallas someras. Las fallas de tracción ocurren cuando los lados opuestos de la falla se mueven perpendicular al plano de falla. En las fallas someras o de corte, los lados opuestos de la falla se mueven paralelos al plano de falla (Holzer, 1988).

4.1.2. Fracturamiento y fallamiento en la Ciudad de México ocasionado por la subsidencia del terreno en la Ciudad de México

El fracturamiento y fallamiento en la Ciudad de México está localizado predominantemente hacia la zona oriental de la ciudad. Esta área de la ciudad se encuentra asentada en gran medida sobre sedimentos lacustres, los cuales se caracterizan por un alto contenido de humedad y alta compresibilidad (Marsal y Mazari, 1956; Auvinet et al., 2017). El fracturamiento y fallamiento del terreno en la Ciudad de México tiene distintas causas, entre estas: la contracción de las arcillas lacustres por secado, la existencia de esfuerzos de tensión asociado al peso de las construcciones, el fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamiento y los movimientos sísmicos (Auvinet, 2008). Sin embargo, las fallas y

fracturas más importantes y destructivas son aquellas que son producto de la subsidencia del terreno debido al bombeo de agua subterránea (Auvinet et al., 2017).

Para la presente investigación, con base en las definiciones previamente presentadas se hará uso de las palabras fallas y fracturas para referirse a todas aquellas discontinuidades con desplazamiento medible, independientemente del medio donde se desarrollen (materiales consolidados y/o no consolidados), ya que las mismas son las que logran ser detectadas por las técnicas de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR).

4.1.3. Zonificación Geotécnica del Valle de Mexico.

Marsal y Mazari (1959) publican la primera zonificación geotécnica de la Ciudad de México, a partir de la compilación y análisis de un gran número de ensayos, en los cuales se recabó información sobre las características estratigráficas y mecánicas que presenta el subsuelo en el área urbana de la CDMX. A partir de las características observadas, Marsal y Mazari (1959) dividieron la ciudad en tres zonas geotécnicas denominadas: Zona de Lomas, Zona de Transición y Zona de Lago.

La zonificación geotécnica oficial actual es la que se encuentra plasmada en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF) vigente (GDF, 2004a, 2004b; Auvinet et al., 2017). Tomando en cuenta la definición establecida en el RCDF y basándose en su última reforma publicada en Gaceta Oficial en la Ciudad de México el 15 de diciembre de 2017 (RCDF, 2017) (Figura 4.2) se propone que: “ *El Distrito Federal se divide en tres zonas con las siguientes características generales:*

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 rellenos artificiales, o de oquedades de rocas y de cavernas y túneles excavados en el suelo para explotar minas de arena,

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 limoarenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros, y

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas (sic) con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.”

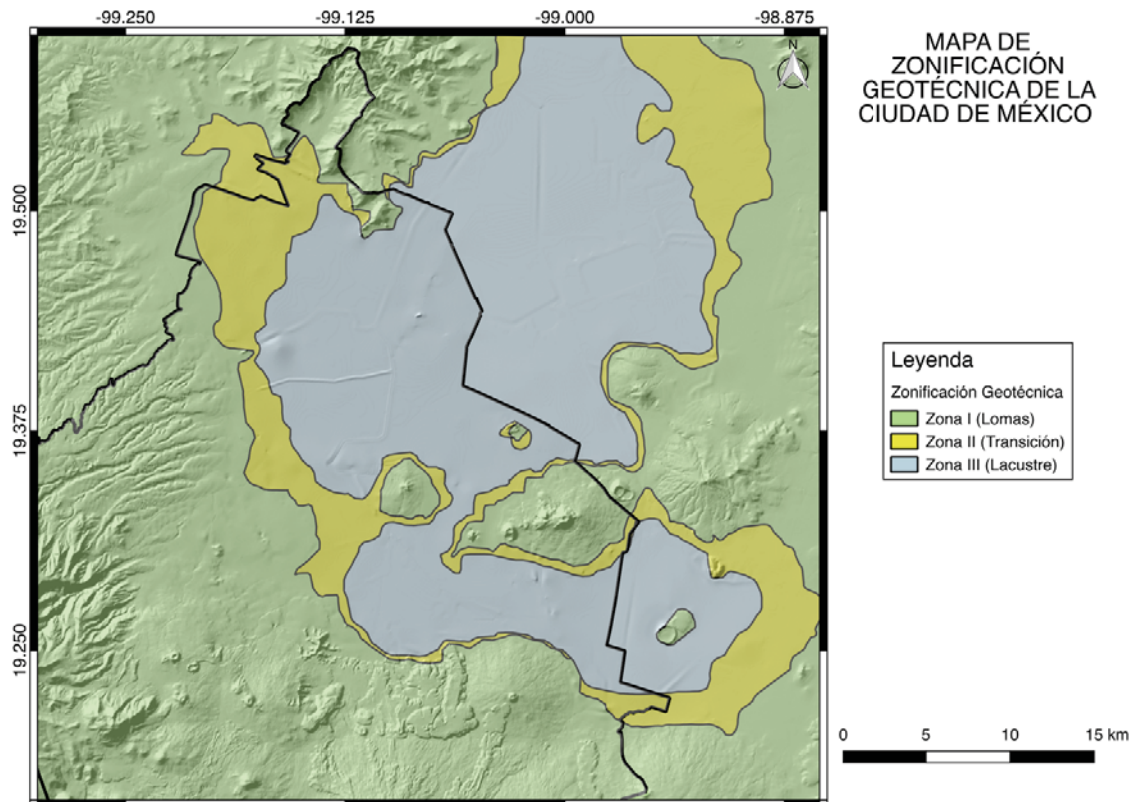


Figura 4.2. Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, (Modificado de Auvinet et al., 2017).

4.2. Metodología para determinar la correspondencia entre las fallas asociadas a subsidencia medidas en campo (CENAPRED, 2017) y el Gradiente Horizontal de Subsidencia

Con la finalidad de validar la relación entre el Gradiente Horizontal de Subsidencia y las fallas asociadas a subsidencia y obtener la mejor categorización posible de los intervalos de clase del Gradiente Horizontal de Subsidencia, se utilizaron las fallas medidas en campo incluidas en el reporte de Análisis de la Vulnerabilidad Física a la Subsidencia y Agrietamiento en la Ciudad de México (CENAPRED, 2017).

El procedimiento de validación de los resultados de este trabajo consistió en:

- 1) Se digitalizaron todas las fallas presentadas en el reporte de Análisis de la Vulnerabilidad Física a la Subsidencia y Agrietamiento en la Ciudad de México (CENAPRED, 2017), ya que no se tenían en formato *shapefile* (.shp).
- 2) Se estimó la correspondencia entre la longitud total de las fallas medidas y las categorías de Gradiente Horizontal de Subsidencia. Para ello se hizo uso de la herramienta *add raster value to feature* disponible en QGIS v2.18. Esta herramienta permite asignarle el valor de las celdas ráster a un elemento vectorial. En este caso, las fallas medidas en campo. El método escogido de interpolación para darle valores a los elementos vectoriales (fallas) fue el del inverso de la distancia.

3) Se generaron tres escenarios buscando la mejor correspondencia entre las fallas y las últimas tres categorías del Gradiente Horizontal de Subsidencia (Figuras 4.3. - 4.5.; Tablas 4.1 - 4.3).

4) Se escogió el escenario cuyas categorías intermedia, alta y muy alta de Gradiente Horizontal de Subsidencia siguiera con mayor precisión las fracturas medidas en campo.

5) Finalmente se evalúa la correspondencia entre el mejor escenario de Gradiente Horizontal de Subsidencia y las fallas de la zona oriente, dado que hacia este sector de la ciudad está presente los mayores valores de gradiente de subsidencia (Figura 4.6; Tabla. 4.4).

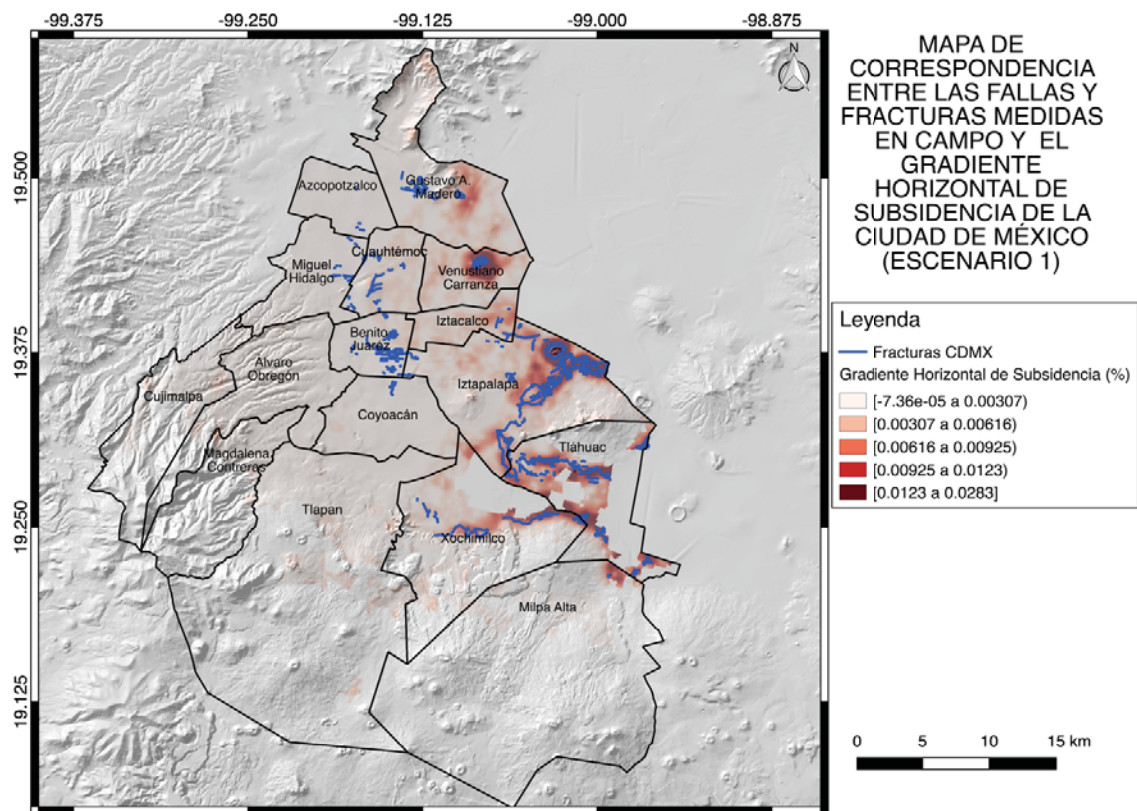


Figura 4.3. Mapa de Gradiente Horizontal de Subsidencia (Escenario 1).

Tabla 4.1. Correspondencia entre las categorías de Gradiente Horizontal de Subsidencia y las fallas medidas en campo (Escenario 1). La diferencia en estos escenarios radica en los diferentes umbrales de corte para las 5 clases en los cuales se encuentra dividido el Gradiente Horizontal de Subsidencia.

Categoría	Intervalos (%)	Longitud acumulada en (Km)	(%)
MUY BAJO	[-7.36e-05 a 0.00307]	62.18	30.19
BAJO	[0.00307 a 0.00616]	28.47	13.82
INTERMEDIO	[0.00616 a 0.00925]	33.94	16.47
ALTO	[0.00925 a 0.0123]	28.62	13.89
MUY ALTO	[0.0123 a 0.0283]	52.80	25.63
Totales		206.00	100.00

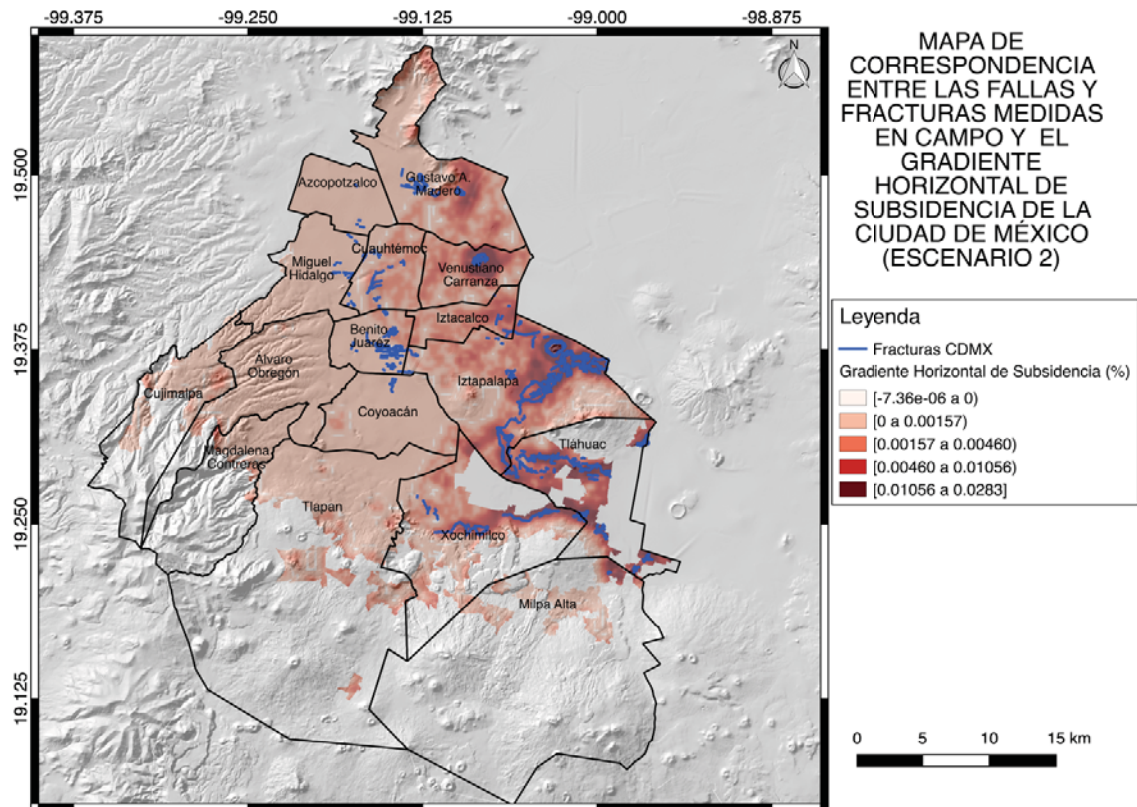


Figura 4.4. Mapa de Gradiente Horizontal de Subsidencia (Escenario 2).

Tabla 4.2. Correspondencia entre las categorías de Gradiente Horizontal de Subsidencia y las fallas medidas en campo (Escenario 2).

Categoría	Intervalos (%)	Longitud acumulada en (Km)	(%)
MUY BAJO	[-7.36e-05 a 0]	9.35	4.54
BAJO	[0 a 0.00157]	36.20	17.57
INTERMEDIO	[0.00157 a 0.00460]	27.30	13.25
ALTO	[0.00460 a 0.01056]	58.25	28.28
MUY ALTO	[0.01056 a 0.0283]	74.90	36.36
Totales		206.00	100.00

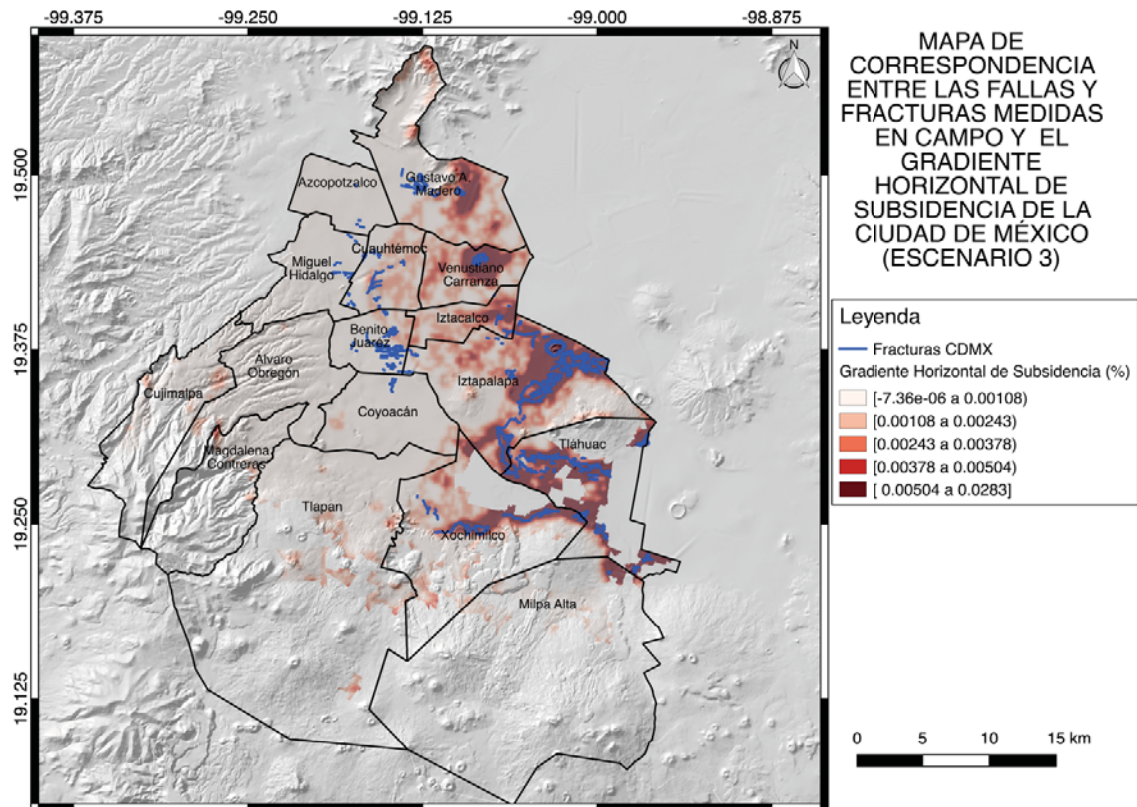


Figura 4.5. Mapa de Gradiente Horizontal de Subsistencia (Escenario 3).

Tabla 4.3. Correspondencia entre las categorías de Gradiente Horizontal de Subsistencia y las fallas medidas en campo (Escenario 3).

Categoría	Intervalos (%)	Longitud acumulada en (Km)	(%)
MUY BAJO	[-7.36e-05 a 0.00108)	36.83	17.88
BAJO	[0.00108 a 0.00243)	14.81	7.19
INTERMEDIO	[0.00243 a 0.00378)	15.73	7.64
ALTO	[0.00378 a 0.00504)	10.35	5.03
MUY ALTO	[0.00504 a 0.0283]	128.27	62.27
Totales		206.00	100.00

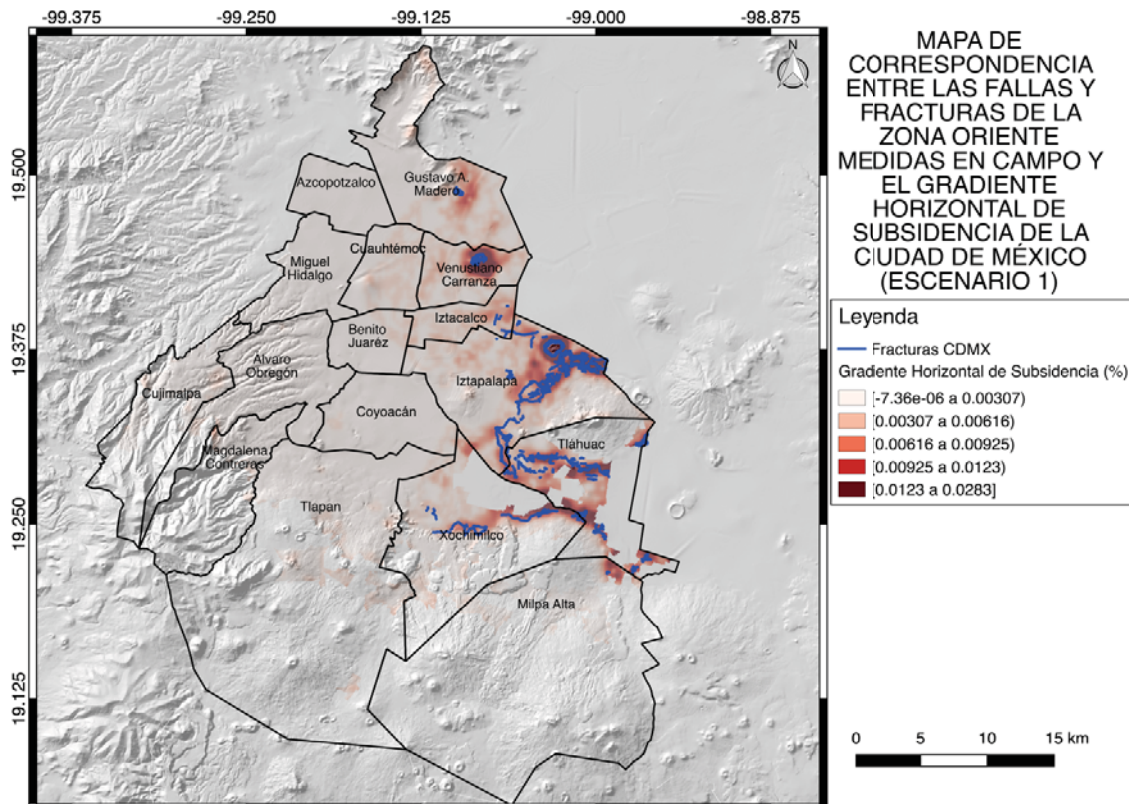


Figura 4.6. Mejor escenario del mapa de Gradiente Horizontal de Subsidiencia y las fallas y fracturas de la zona oriente de la ciudad.

Tabla 4.4. Correspondencia entre las categorías de Gradiente Horizontal de Subsidiencia y las fallas medidas en campo ubicadas en la zona oriente de la ciudad.

Categoría	Intervalos (%)	Longitud acumulada en (Km)	(%)
MUY BAJO	$[-7.36e-05$ a 0.00307)	13.76	9.06
BAJO	$[0.00307$ a 0.00616)	27.44	18.06
INTERMEDIO	$[0.00616$ a 0.00925)	32.46	21.36
ALTO	$[0.00925$ a 0.0123)	27.53	18.12
MUY ALTO	$[0.0123$ a 0.0283]	50.74	33.40
Totales		151.93	100.00

4.3. Resultados y discusión de la correspondencia entre las fallas medidas en campo (CENAPRED, 2017) y el Gradiente Horizontal de Subsistencia.

Se evaluó la correspondencia entre todas las fallas medidas en campo (CENAPRED, 2017) y el Gradiente Horizontal de Subsistencia (Figuras 4.3 - 4.5; Tablas 4.1 – 4.3) con la finalidad de evaluar correspondencia entre ambos elementos. Se tomó como mejor al escenario 1 (Figura 4.3; Tabla 4.1), debido a que es el que con mayor detalle sigue las fallas y es el que posee mayor espaciamiento entre los intervalos de clase. Por otra parte, los escenarios 2 y 3, aunque tienen una mayor correspondencia no fueron considerados, debido a que el área de búsqueda de las fallas es muy ancho, lo que puede llevar a sobreestimaciones de las áreas que son afectadas por el proceso de subsistencia diferencial (Figuras 4.4. – 4.5; Tablas 4.2 - 4.3).

Se observó una clara mejoría en la correspondencia entre el mejor escenario de Gradiente Horizontal de Subsistencia (Escenario 1) y las fallas de la zona oriental de la ciudad (Figura 4.6; Tabla 4.4), encontrándose, que aproximadamente poco más del 72% de la longitud total de las fallas ubicadas en esta zona, corresponden a las categorías intermedio, alto y muy alto del Gradiente Horizontal de Subsistencia. Por tanto, se puede establecer la existencia de muy buena correspondencia entre ambos atributos. Esto es probablemente debido a que hacia esta zona de la ciudad la transición entre la zona lacustre y la de lomas es abrupta, por lo que se desarrollan mayores gradientes de subsistencia. Por ende, las fallas de esta zona son ocasionadas por un mayor gradiente de subsistencia (Figura 4.7). Esta transición o contacto entre la roca volcánica y las arcillas lacustres; se desarrolla en el cerro la Estrella, Peñón del Marqués, Peñón de los Baños y el Cerro Tepeyac (Santoyo-Villa et al., 2005). La estratigrafía típica de estas zonas consiste en arcillas lacustres, interrumpidas por numerosas capas de materiales erosionados de aparatos volcánicos vecinos (Santoyo-Villa et al., 2005).

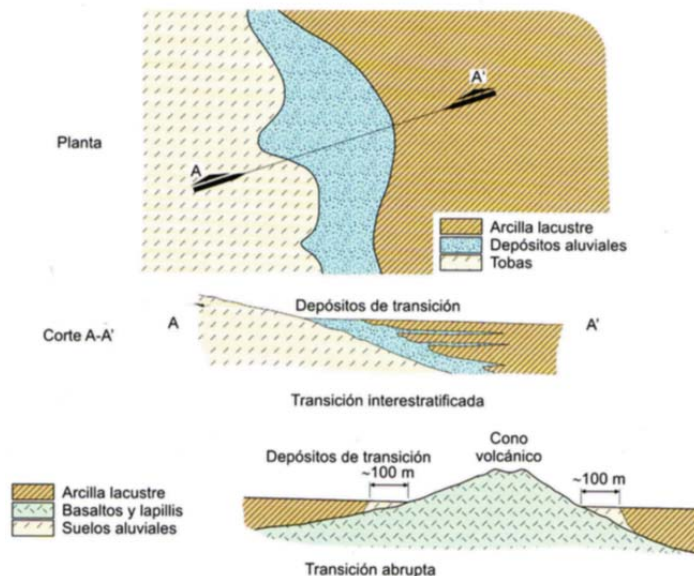


Figura 4.7. Transiciones típicas (Tomado de Santoyo-Villa et al., 2005)

Las fallas y fracturas ubicadas en la parte central de la ciudad se desarrollan con valores de Gradiente Horizontal de Subsistencia relativamente menores a los presentes en la zona oriente (Figuras 4.3 -4.5 y 4.8). Para esta zona de la Ciudad de México no se desarrollan valores tan altos de gradiente de subsidencia posiblemente a que se produce una transición estratificada (Figura 4.7), la cual consiste en una intercalación de las arcillas lacustres con arenas y gravas (Santoyo-Villa et al., 2005). La zona de transición interestratificada contiene en sus partes más profundas la llamada Capa Dura, depósitos glaciares, laháricos, fluvio-glaciales y depósitos aluviales recientes (Santoyo-Villa et al., 2005). Dado el historial de subsidencia de la ciudad y a que esta posee valores de velocidad y gradiente de subsidencia excepcionalmente altos, esta zona de transición tiene el potencial suficiente para desarrollar fallas y fracturas (Figuras 4.3 -4.5).

La mayor densidad de fallas y fracturas asociadas a la subsidencia también se encuentran presentes hacia la parte oriental de la Ciudad de México (Figura 4.8). Por tanto, a mayor gradiente de subsidencia mayor posibilidad de que se desarrollen fallas y fracturas. Ya que el gradiente de subsidencia expresa que tan rápido cambia la velocidad de subsidencia en una distancia horizontal dada.

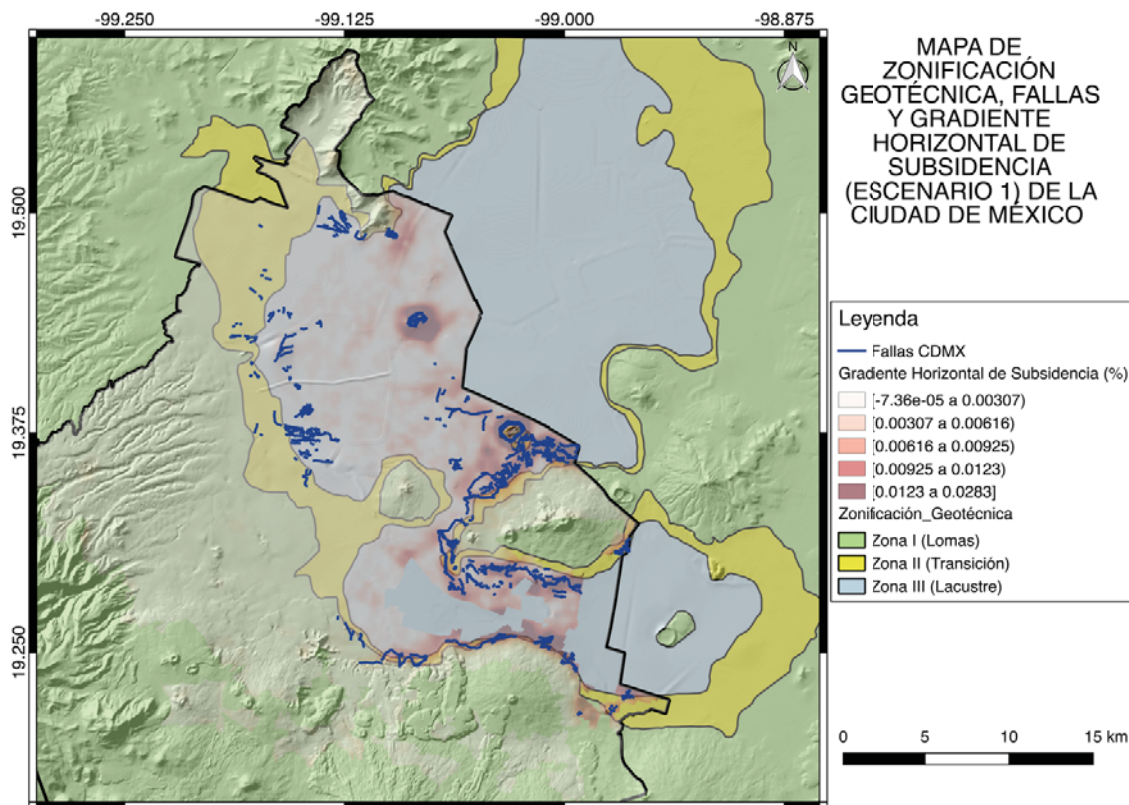


Figura 4.8. Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México (Modificado de Auvinet et al., 2017). Sobrepuesto con el mapa de Gradiente Horizontal de Subsistencia y las fallas y fracturas de la Ciudad de México.

Definir los intervalos de clase de la capa de gradiente de subsidencia a partir de la correspondencia con la capa de fallas y fracturas permite tener un criterio cuantitativo al señalar a partir de qué valor se puede determinar un gradiente de subsidencia alto o muy alto. Esta condición es de gran utilidad en la elaboración de los mapas de riesgo asociados a

subsistencia (Capítulo 6), dado que hará posible acotar aquellas áreas de la Ciudad de México en las que el peligro vinculado al fenómeno de subsidencia es máximo, o por el contrario, aquellas zonas en las que el peligro es muy bajo o incluso nulo. De la misma manera, facilita la ubicación con una gran precisión, de aquellas zonas propensas a la formación de fallas asociadas a la subsidencia diferencial y donde aumenta la probabilidad de que las edificaciones se vean afectadas por distorsión angular y en qué lugares puede existir una importante afectación arquitectónica y/o estructural de la infraestructura crítica de la ciudad. Este hecho puede hacer vulnerable a las edificaciones a sufrir daños a consecuencia de otros fenómenos tales como sismos de gran magnitud.

La muy buena correspondencia entre la capa de fallas y fracturas (CENAPRED, 2017) y los valores de gradiente de subsidencia intermedio, alto y muy alto permite validar la metodología de las técnicas de (InSAR) para cartografiar las zonas susceptibles a formar fallamiento asociado a la subsidencia. Motivado a que se obtienen resultados muy similares, y los mismos son obtenidos a partir de dos fuentes diferentes de información, la primera el levantamiento en campo (CENAPRED, 2017) y la segunda el análisis de series de tiempo a partir de imágenes SAR (Solano-Rojas et al., in press), que se considera válido señalar que se puede extrapolar esta metodología y hacer estudios para la identificación de zonas susceptibles al fallamiento en diferentes ciudades o localidades de México, esperando una muy buena precisión en la ubicación de las zonas donde existe fallamiento asociado al fenómeno de subsidencia. De la misma manera, el resultado permitiría alertar a las autoridades responsables, de las áreas en las que, aunque aún no existe fallamiento visible en superficie, que posiblemente en un corto plazo se empezará a manifestar esta situación. Esto facilitará la ubicación de las áreas en las que se deben tomar medidas para corregir o mitigar el proceso de subsidencia del terreno y sus efectos secundarios, dichas medidas podrían incluir el destinar zonas afectadas a la recarga artificial del sistema acuífero, disminuir el bombeo de agua en las zonas más críticas, cambios en el uso de suelo y transformación de corredores de casa habitación afectados en parques lineales y/o áreas verdes en las zonas afectadas por fallamiento intenso.

Los lugares donde exista la presencia de fallamiento asociado a la subsidencia son también de gran interés para los organismos encargados del ordenamiento territorial y operación de infraestructura urbana, debido a que estas áreas son lugares que tienen un gran potencial de contaminación del sistema acuífero, por lo que la infraestructura que represente una fuente importante de contaminantes tales como estaciones de gasolina, ductos de PEMEX o Plantas Industriales, no deberían estar ubicadas en estas áreas. Las zonas de fallas aumentan la conductividad hidráulica del medio, por lo que los solutos pueden ser transportados al subsuelo con mayor facilidad, pudiendo producir la contaminación del acuífero subyacente, ocasionando importantes afectaciones a la red hidráulica, y a diferentes servicios urbanos, así como restringiendo la disponibilidad y calidad del agua potable para la ciudad.

Capítulo 5. Población, Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica en la Ciudad de México

5.1. Definiciones

5.1.1. AGEB, Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica.

El Área Geográfica Estadística Básica (AGEB) urbana es un área geográfica constituida por un conjunto de manzanas delimitadas por rasgos fácilmente de identificar en el terreno tales como avenidas, calles o andadores. Estas son de uso de suelo principalmente habitacional, comercial o industrial y solo son asignadas si contiene una población mayor o igual a 2,500 habitantes (CONEVAL, 2018). Los AGEBs reportados por INEGI pertenecientes al Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a), poseen gran cantidad de información organizada en tablas. Entre la información disponible están la clave del AGEB, la población, años de escolaridad, dependencia económica, entre otros aspectos. Además, el INEGI presenta en formato vectorial la digitalización de todos los AGEBs de la República Mexicana, aunque éstos no contienen la información del censo ligada a su tabla de atributo (INEGI, 2012a).

La densidad de población mide el número de habitantes por unidad de área y es una medida de gran importancia para la planificación de la ciudad, ya que indica las zonas que demandan mayor cantidad de servicios públicos y prioridad de atención en caso de ocurrir algún fenómeno natural y/o inducido por el hombre que pueda poner en riesgo a la población que lo habita.

La vulnerabilidad se define como las condiciones existentes que hacen susceptibles a una comunidad a ser dañada al concretarse un peligro (Novelo-Casanova, comunicación personal). La vulnerabilidad socioeconómica se estima por medio de indicadores socioeconómicos. Los cuales miden cómo se comporta un elemento social vulnerable ante cualquier peligro. En otras palabras, es la capacidad para responder, resistir o enfrentarse a un peligro (Novelo-Casanova y Rodríguez-Vangort, 2016).

5.2. Metodología para la generación de los mapas de Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica

5.2.1 Mapas de Población y de Densidad de Población por AGEBs

Para la generación del mapa de Población por AGEBs fue necesario hacer la unión entre las tablas que contienen la información de la población del Censo de Población y Vivienda de 2010 (INEGI, 2011a) y la información vectorial de los AGEBs (INEGI, 2012a) con la finalidad de que cada AGEBs posea información de la población. Luego se clasifican los intervalos de población haciendo uso del algoritmo de *Natural Breaks* (Jenks, 2007) para visualizar la mayor variabilidad entre las clases (Figura 5.1).

El mapa de Densidad de Población por AGEBs se obtiene calculando el área de cada uno de los polígonos de los AGEBs de población, haciendo uso de la *calculadora de campos*

disponible en QGIS 2.18. Seguidamente, se procede a usar la *calculadora de campos* para dividir la población de cada AGEBs entre el área de cada uno de estos, obteniéndose así la densidad de población por AGEBs (Figura 5.2). Posteriormente, se convierte el archivo vector a una capa ráster, con resolución de pixel de 30 x 30 metros. Esta resolución es lo suficientemente fina para operar con el Gradiente Horizontal de Subsistencia considerando las áreas de los AGEBs de población y la resolución obtenidas por los sensores que se usaron para estimar la velocidad de subsidencia que inicialmente era de 160 x 160 metros y luego fue mejorada a 30 x 30 metros como se indicó en el capítulo 3. Antes de transformar la Densidad de Población de formato vector a ráster, se debe recalcular la Densidad de Población en función del tamaño de pixel con la finalidad de que cada celda ráster del mapa de densidad de población contenga el valor que represente el número de habitantes por celda de 30 metros por 30 metros (Figura 5.3).

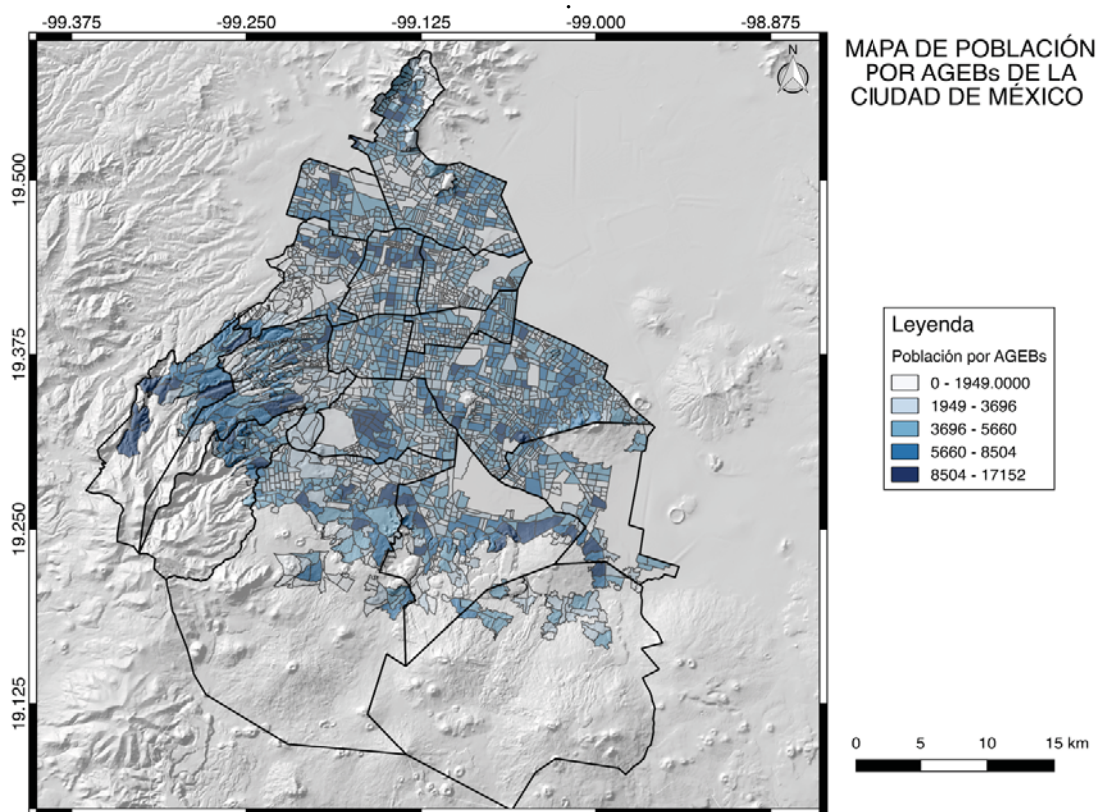


Figura 5.1. Mapa de Población por AGEBs de la Ciudad de México, según el Censo de Población y Vivienda del INEGI 2010 (INEGI, 2011a; 2012a).

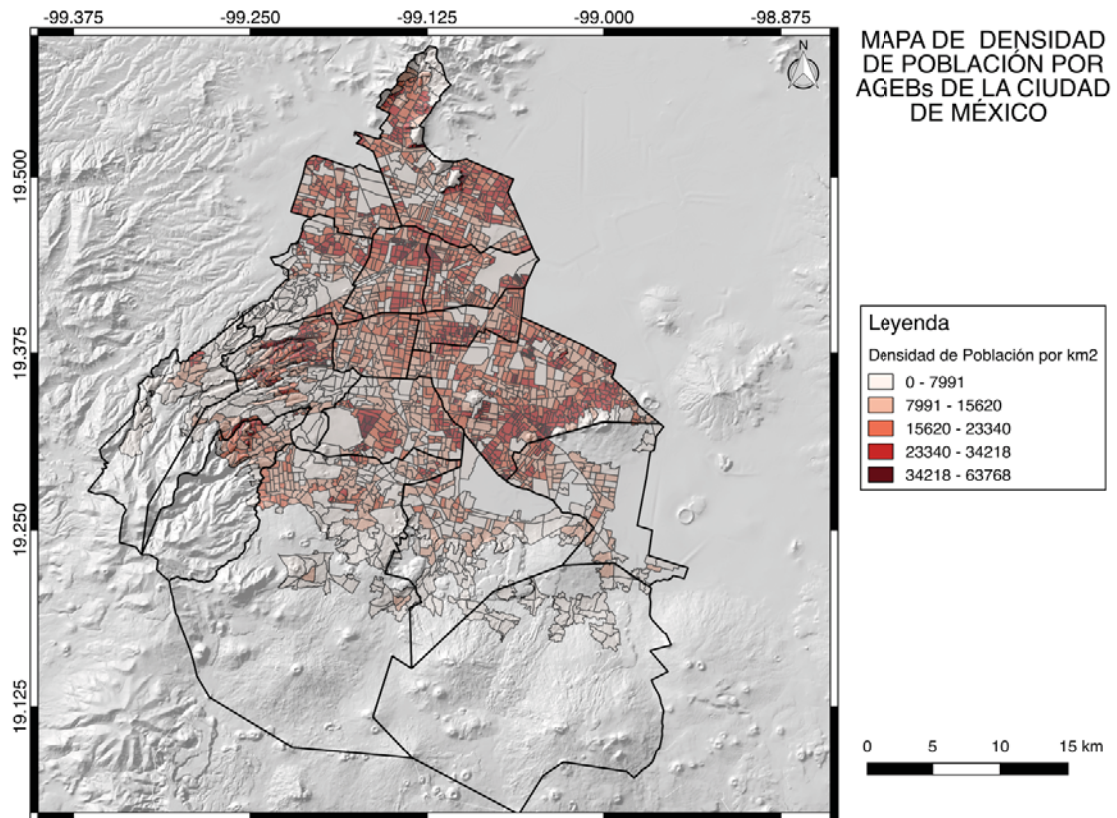


Figura 5.2. Mapa de Densidad de Población por AGEBS de la Ciudad de México, según el Censo de Población y Vivienda del INEGI 2010.

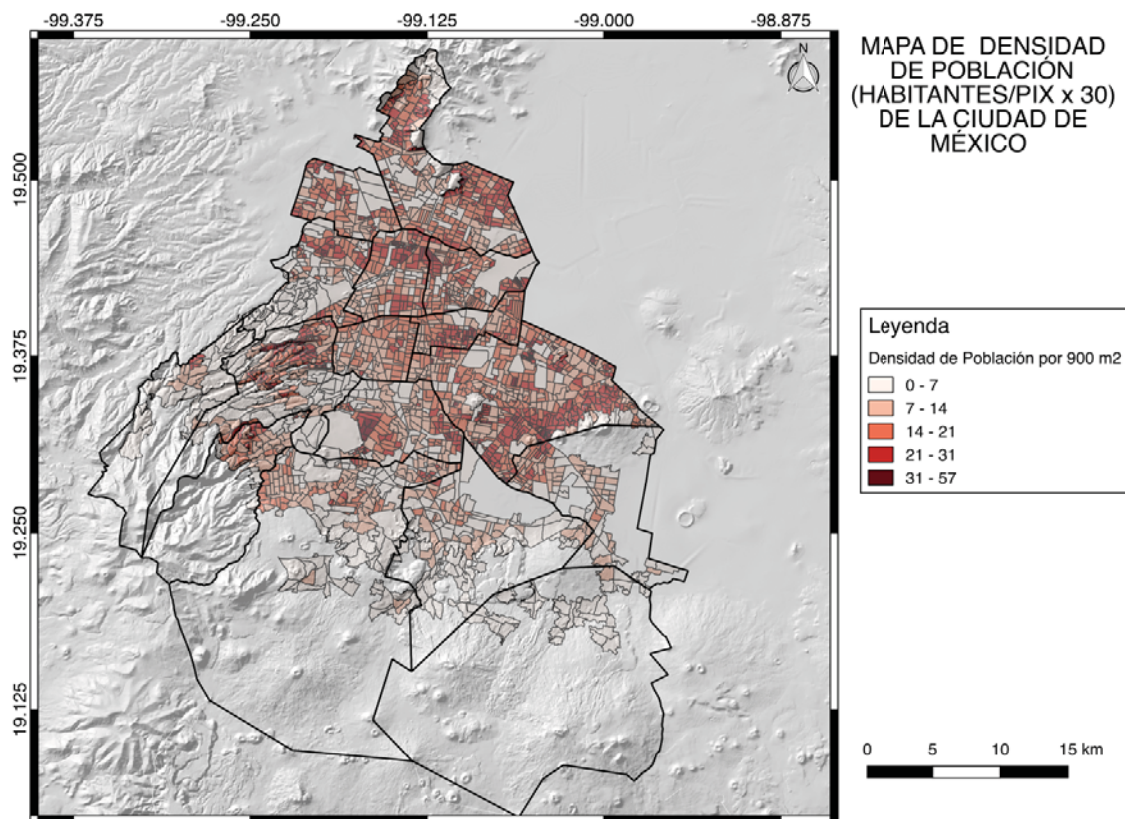


Figura 5.3. Mapa de Densidad de Población de la Ciudad de México, recalculado número de habitantes por píxeles de (30x30) m.

5.2.2. Mapas de Vulnerabilidad Socioeconómica

La estimación de la Vulnerabilidad Socioeconómica es un producto realizado en el marco del proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México” financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (Novelo-Casanova, comunicación personal). La información que utilizaron para su estimación proviene del SCICE (Versión 05/2012) el cual contiene la información censal a nivel AGEB. Seguidamente relacionaron esa información con el archivo vectorial a nivel AGEB del Marco Geoestadístico Nacional población (INEGI, 2018).

Para estimar la Vulnerabilidad Socioeconómica utilizaron trece parámetros como lo indica la (Tabla 5.1). La elección de los parámetros óptimos para la estimación de la Vulnerabilidad Socioeconómica, estuvo a cargo de los especialistas del CENAPRED y del Instituto de Geofísica de la UNAM, cuyo criterio estuvo fundamentado en escoger cuáles parámetros pueden aportar más a la vulnerabilidad de la población en función a su poder adquisitivo (Novelo-Casanova, comunicación personal). Seguidamente, procedieron a la asignación de los valores de importancia de los indicadores de Vulnerabilidad Socioeconómica a cargo de los especialistas del CENAPRED, Instituto de Geofísica e Instituto de Geología de la UNAM, estos niveles de importancia se determinaron a partir de la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (PAJ; Saaty, 1980).

Tabla 5.1. Indicadores de Vulnerabilidad Socioeconómica. Información procesada en el marco del proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México” financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Clave del Indicador	Indicador
VSE1	Población con discapacidad
VSE2	Densidad de Población
VSE3	Porcentaje de población no derechohabiente
VSE4	Razón de dependencia
VSE5	Hogares con jefatura femenina
VSE6	Hacinamiento (número de habitantes/cuartos de la vivienda)
VSE7	Acceso a la información
VSE8	Nivel educativo de la población
VSE9	Porcentaje de la población de habla indígena
VSE10	Porcentaje de analfabetismo
VSE11	Porcentaje de viviendas que no disponen de luz eléctrica, agua entubada de la red pública de drenaje
VSE12	Porcentaje de la población de 6 a 14 años que asiste a la escuela
VSE13	Porcentaje de viviendas con piso de tierra

En el contexto del proyecto antes mencionado, evaluaron la totalidad de los indicadores realizando comparaciones entre pares (A y B) de manera ordenada, cada indicador debe compararse con los doce restantes, respondiendo a dos preguntas básicas: 1) ¿Cuál de los indicadores es más importante? 2) ¿Cuál es el grado de importancia?. A continuación, se procedieron a determinar los pesos relativos de los indicadores de Vulnerabilidad Socioeconómica, partiendo de la categorización de los indicadores y luego procesaron las matrices de comparaciones por pares. Esta matriz refleja la relación en términos numéricos, que tiene cada uno de los indicadores con respecto a los demás indicadores que se están evaluando (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Seguidamente, calcularon la Matriz de Comparaciones Normalizada. Esta matriz la obtuvieron al dividir uno entre la suma de cada una de las columnas de la matriz de comparaciones. A continuación, multiplicaron cada valor de la Matriz de Comparaciones Normalizada por el inverso de la columna a la que pertenece en la matriz de comparaciones. Finalmente, obtuvieron el promedio de cada fila. Este promedio representa el peso relativo w_i del indicador correspondiente (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Luego procedieron a capturar los valores de cada uno de los trece indicadores obtenidos a partir de la información de (INEGI, 2010) proveniente del Censo de Población y Vivienda de 2010 en la tabla de atributos del archivo vector que contiene los AGEBS, haciendo uso del software QGIS v2.18 (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Debido a que los valores capturados pueden resultar muy diversos, procedieron a normalizarlos, teniendo como referencia los valores máximos de cada indicador (Novelo-Casanova, comunicación personal).

El siguiente paso que realizaron fue obtener el valor ponderado del indicador. Para ello multiplicaron los pesos relativos obtenidos previamente por los valores de los indicadores normalizados (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Finalmente, el valor de la Vulnerabilidad Socioeconómica para cada uno de los AGEBs será la suma de las vulnerabilidades de cada indicador (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Para la representación de la distribución de vulnerabilidad, se utilizó la clasificación automática de *Natural Breaks* (Jenks, 2007) haciendo uso de QGIS v2.18 (Figura 5.4). A continuación, se procede a calcular la población y área para cada categoría de Vulnerabilidad Socioeconómica con base en los valores de la tabla de atributos relacionados con el mapa de vulnerabilidad (Tabla 5.2).

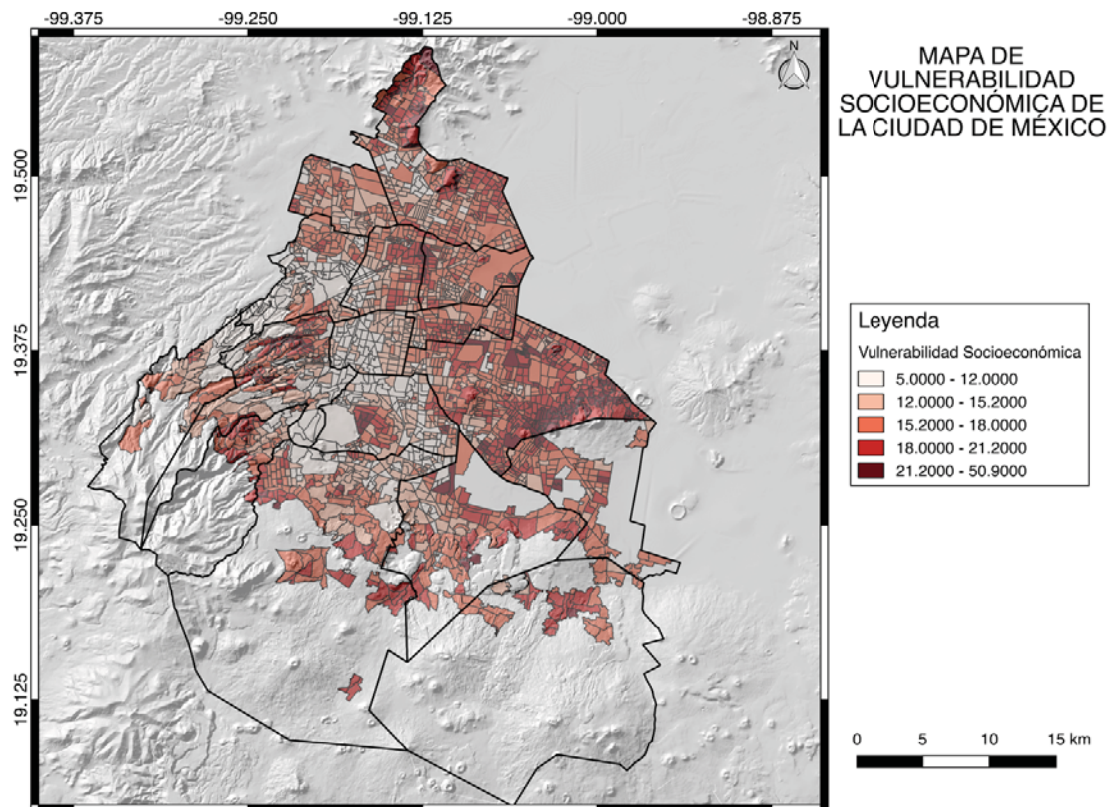


Figura 5.4. Mapa de Vulnerabilidad Socioeconómica para la Ciudad de México, calculado usando la base de datos de INEGI perteneciente al Censo de Población y Vivienda de 2010. Información procesada en el marco del proyecto "Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México" financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (Novelo-Casanova, comunicación personal).

Tabla 5.2. Cuento de áreas y población para cada intervalo de Vulnerabilidad Socioeconómica (VSE).

Categoría de VSE	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Baja	152.98	19.38	836266	9.49
Baja	165.58	20.98	1694773	19.24
Intermedia	279.71	35.44	3024566	34.33
Alta	155.85	19.75	2541321	28.84
Muy Alta	35.09	4.45	713351	8.10
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

5.3. Resultados y discusión de los mapas de Densidad de Población y Vulnerabilidad Socioeconómica

La Ciudad de México es una ciudad altamente poblada y de la misma manera constituye relativamente la ciudad de menor tamaño en área de toda la República Mexicana, es por eso que presenta valores de densidad de población excepcionalmente altos (Figuras 5.5; Tabla 5.3), llegando a presentar un orden de magnitud de densidad de población por encima de las demás ciudades de la república mexicana. La ciudad llega a tener en algunos AGEBS de población más de 50 habitantes por cada 900 m² (Figura 5.3), cuando la media de densidad de población del país es de apenas 57 habitantes/ km², lo que equivale a 0.0513 habitantes por 900 m².

En la Ciudad de México el 28.95% del total del área urbanizada presenta 14 ó más habitantes por cada 900 m², lo que equivale a una superficie de 228.42 km² (Tabla 5.4). En general se puede observar que la ciudad presenta valores relativamente homogéneos de densidad de población promedio por alcaldía (Tabla 5.15), siendo las alcaldías con mayor densidad de población Iztapalapa (19 hab/900 m²), Iztacalco (18 hab/900 m²) y Cuauhtémoc (16 hab/900 m²). Las zonas menos pobladas se ubican hacia el poniente y surponiente de la Ciudad. Las alcaldías con menor densidad de población promedio son Milpa Alta (6 hab/900 m²), Xochimilco (7 hab/900 m²), Tlalpan (9 hab/900 m²) y Cuajimalpa de Morelos (10 hab/900 m²).

Tabla 5.3. Distribución de superficie, población y densidad de población para los Estados Unidos de México, según los datos del censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2011a).

Entidad federativa	Superficie Km²	Población total (2010)	Densidad de Población (hab/km²)
Ciudad de México	1484	8851080	5964.340
México	22333	15175862	679.526
Morelos	4892	1777227	363.293
Tlaxcala	3997	1169936	292.704
Aguascalientes	5625	1184996	210.666
Guanajuato	30621	5486372	179.170
Puebla	34251	5779829	168.749
Querétaro Arteaga	11658	1827937	156.797
Hidalgo	20856	2665018	127.782
Colima	5627	650555	115.613
Veracruz de Ignacio de la Llave	71856	7643194	106.368
Jalisco	78630	7350682	93.484
Tabasco	24747	2238603	90.460
Michoacán de Ocampo	58667	4351037	74.165
Nuevo León	64203	4653458	72.480
Chiapas	73681	4796580	65.099
Guerrero	63618	3388768	53.267
Yucatán	39671	1955577	49.295
Sinaloa	57331	2767761	48.277
Baja California	71546	3155070	44.098
San Luis Potosí	61165	2585518	42.271
Tamaulipas	80148	3268554	40.781
Oaxaca	93343	3801962	40.731
Nayarit	27862	1084979	38.941
Quintana Roo	42535	1325578	31.164
Zacatecas	75416	1490668	19.766
Coahuila de Zaragoza	151445	2748391	18.148
Sonora	179516	2662480	14.831
Campeche	57727	822441	14.247
Chihuahua	247487	3406465	13.764
Durango	123367	1632934	13.236
Baja California Sur	73943	637026	8.615

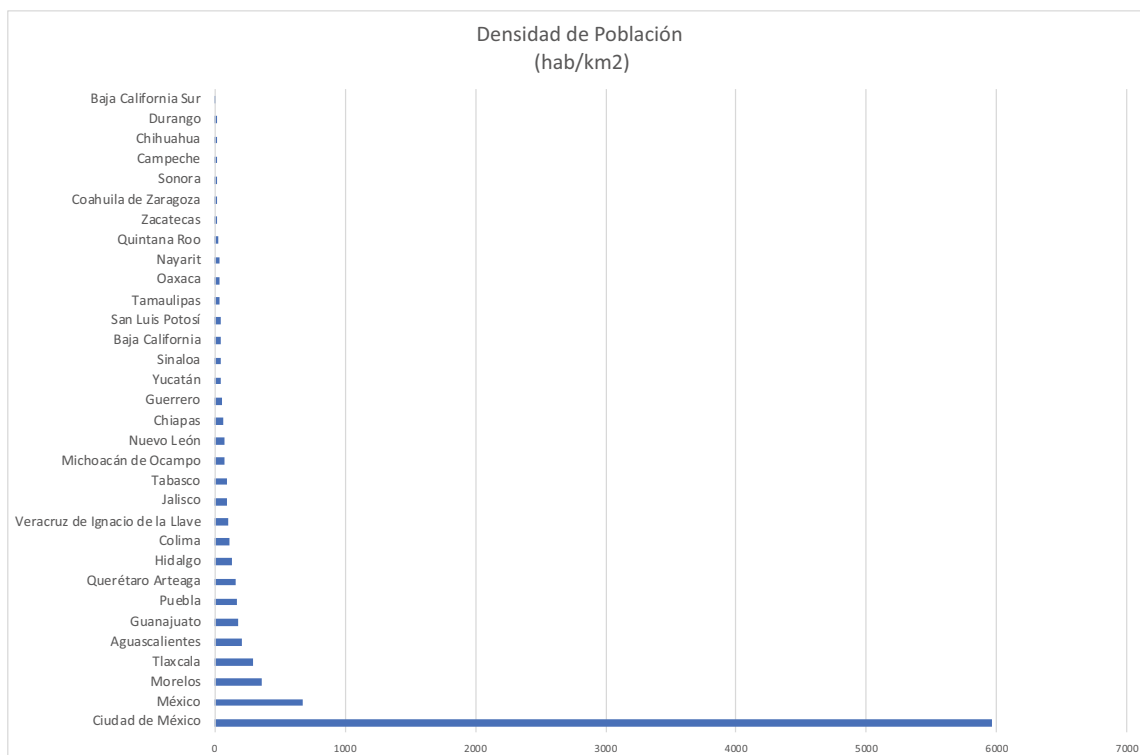


Figura 5.5. Comparativo de densidad de población para la república mexicana generado a partir de la información del censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2011a).

Tabla 5.4. Área en unidades de superficie y porcentaje para los diferentes intervalos de densidad de población utilizados para el mapa de densidad de población para la Ciudad de México (Figura 5.3).

Hab/900m ²	Área (Km ²)	Área (%)
[0 - 7)	349.08	44.24
[7 - 14)	211.58	26.81
[14 - 21)	140.43	17.80
[21 - 31)	77.58	9.83
>= 31	10.41	1.32
Totales	789.09	100.00

Tabla 5.5. Densidad de población promedio por alcaldía para la Ciudad de México, según el censo de censo de población y vivienda de 2010 (INEGI, 2011a).

Alcaldías	Hab/ 900m ²
Iztapalapa	19
Iztacalco	18
Cuauhtémoc	16
Venustiano Carranza	16
Álvaro Obregón	16
Gustavo A. Madero	16
Azcapotzalco	16
Coyoacán	15

La Magdalena Contreras	14
Benito Juárez	13
Tláhuac	11
Miguel Hidalgo	11
Cuajimalpa de Morelos	10
Tlalpan	9
Xochimilco	7
Milpa Alta	6

Para la densidad de población los resultados se analizaron para $900m^2$, ya que se busca conocer como es el comportamiento de este parámetro con respecto al tamaño de celda. Ya que para poder operar este parámetro con los raster de subsidencia y gradiente de subsidencia los valores deben estar recalculados según el área de pixel.

A partir del mapa de Vulnerabilidad Socioeconómica (Figura 5.4) y los conteos de área y población (Tabla 5.2) se puede señalar que el 24.2% de la superficie urbanizada de la Ciudad de México se encuentra en las categorías de Vulnerabilidad Socioeconómica alta y muy alta, lo que corresponde a un total de $190.94km^2$ y en estas áreas de gran vulnerabilidad viven un total de 3'254,672 habitantes lo que representa el 32.94% de la población total de la ciudad.

A partir del cálculo del promedio de los valores obtenidos de Vulnerabilidad Socioeconómica por alcaldía (Tabla 5.6) se puede observar que las alcaldías que presentan mayor vulnerabilidad son Iztapalapa (18.66), Milpa Alta (17.85) y Tláhuac (17.22). Los AGEBS con mayor Vulnerabilidad Socioeconómica se ubican en las alcaldías Gustavo A. Madero (50.9), Iztapalapa (30.8) y Xochimilco (29.8) (Tabla 5.7).

Tabla 5.6. Vulnerabilidad Socioeconómica promedio por alcaldía para la Ciudad de México ordenada de mayor a menor.

Alcaldías	VSE
Iztapalapa	18.66
Milpa Alta	17.85
Tláhuac	17.22
Iztacalco	17.09
Gustavo A. Madero	16.82
Venustiano Carranza	16.59
Xochimilco	16.58
La Magdalena Contreras	16.31
Álvaro Obregón	16.05
Cuauhtémoc	15.51
Azcapotzalco	15.51
Tlalpan	15.17
Cuajimalpa de Morelos	14.66
Coyoacán	13.89
Miguel Hidalgo	13.16
Benito Juárez	12.16

Tabla 5.7. AGEBS de población con mayor Vulnerabilidad Socioeconómica (VSE) correlacionados con las alcaldías a los que pertenecen.

Alcaldía	CLAVE GEOESTADÍSTICA	VSE
Gustavo A. Madero	0900500012502	50.9
Iztapalapa	0900700015501	30.8
Xochimilco	0901300010052	29.8
Iztapalapa	0900700015520	29.8
Venustiano Carranza	0901700011488	28.8

Capítulo 6. Mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado.

6.1. Contexto del mapa de riesgo.

La subsidencia es un fenómeno que afecta a las estructuras civiles y ocasiona graves trastornos al funcionamiento de la infraestructura urbana. En el caso de la Ciudad de México, dada las condiciones de alto contenido de arcillas de los sedimentos lacustres que subyacen una porción importante de la ciudad, este proceso registra valores de velocidad de subsidencia extremos (e.g. Chaussard et al., 2014; Solano-Rojas, 2018). Esto, aunado con más de un siglo de desarrollo de este proceso, genera además subsidencia acumulada de decenas de metros (Cabral-Cano et al., 2008).

Riesgo es considerado como el impacto estimado que un evento peligroso podría tener en la gente, edificaciones, servicios, estructuras y bienes en una comunidad (Crichton, 1999). El peligro se define como la probabilidad de que ocurra un evento con el potencial de generar daños, el mismo debe tener cierta magnitud, debe ocurrir en un intervalo de tiempo y área definida (Novelo-Casanova, comunicación personal). Para la elaboración de mapas de riesgo se deben tomar en cuenta todos los elementos vulnerables a un peligro determinado. El mapa de riesgo para satisfacer los requerimientos de los expertos en cada uno de esos peligros demanda un continuo asesoramiento y revisión de la literatura. Sin embargo, representa una herramienta de gran utilidad para los organismos encargados de la mitigación y prevención de desastres, así como para los entes que regulan la designación de los usos de suelo y ordenamiento territorial.

El nivel de exposición representa el número de elementos que están expuestos a un riesgo (Di Mauro et al., 2006).

A continuación, se presentan los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado.

6.2. Metodología para la generación de los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado.

En general los mapas de riesgo se obtuvieron sobreponiendo los mapas de Vulnerabilidad Socioeconómica sobre los de peligro por Subsistencia y Fallamiento asociado. Los mapas de exposición poblacional derivan de sobreponer el mapa de densidad poblacional y los mapas de peligro por subsidencia y fallamiento asociado. A manera de comparación y con la finalidad de definir cuáles son los mejores mapas de Riesgo Socioeconómico y de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado, se elaboraron varios mapas de agrupados por escenarios. Estos escenarios tienen como insumos básicos la Densidad de Población, un estimado de la Vulnerabilidad Socioeconómica (Novelo-Casanova, comunicación personal), ambos tomando los datos del Censo de Población y Vivienda del 2010 (INEGI, 2011a), y mapas de Velocidad de Subsistencia y de Gradiente Horizontal de Subsistencia, calculados a partir de escenas SAR Sentinel-1 A y B para el período noviembre 2014 - noviembre 2017 (Solano-Rojas et al., in press). El procedimiento para la generación

de estos insumos se detalló en los apartados anteriores (Capítulo 3 y 5). Todos los archivos de entrada fueron procesados en QGIS v2.18 en formato ráster y con tamaño de celda de 30 m x 30 m.

Los mapas de riesgo y exposición se obtuvieron haciendo uso del álgebra de mapas, por medio de la calculadora ráster, disponible en QGIS v2.18. A continuación, se generaron las tablas de valores que contiene la información del área y la población afectada por cada categoría de riesgo. Para esto, se usa la herramienta *add raster value to feature* y se liga la capa ráster (mapa de riesgo y exposición) con la capa vector que contiene la información de los AGEBS, ya que esta capa posee la información de las áreas y la población. Seguidamente, se exporta la tabla de atributos en formato de *Valores Separados por Comas (*.csv)* y se procede a calcular los porcentajes de población y áreas afectadas por cada una de las categorías de riesgo y exposición. Tanto para los mapas de riesgo socioeconómico como para los de exposición poblacional se usó para dividir los intervalos de clases el algoritmo de *natural breaks* (Jenks, 2007), esto con el objeto de que los resultados obtenidos expresen la mayor variabilidad entre las clases y a su vez sean comparables entre sí.

Para facilitar las expresiones que definirán el riesgo se tomarán las siguientes convenciones:

Densidad de Población= Den_Pob.

Vulnerabilidad Socioeconómica= VSE.

Gradiente Horizontal de Subsistencia= GHS.

Velocidad de Subsistencia= VSub.

Escenario 1 del mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado establece que:

Riesgo= (GHS+VSub)xVSE (Figura 6.1 y Tabla 6.1).

El mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado para el escenario 1 establece que:

Exposición= (GHS+VSub)xDen_Pob (Figura 6.2 y Tabla 6.2).

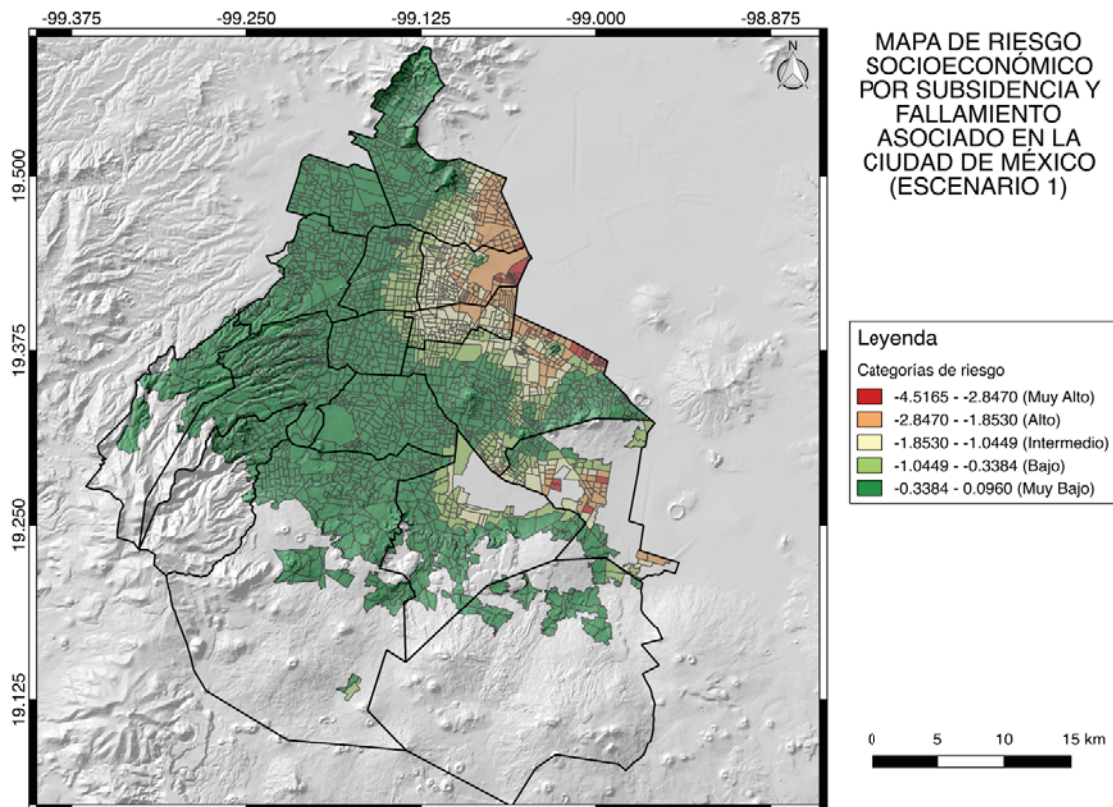


Figura 6. 1. Mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento (Escenario 1).

Tabla 6.1. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de riesgo	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alto	6.35	0.80	100277	1.14
Alto	50.12	6.35	626891	7.12
Intermedio	70.60	8.95	1004578	11.40
Bajo	79.79	10.11	1074895	12.20
Muy Bajo	582.36	73.79	6003636	68.14
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

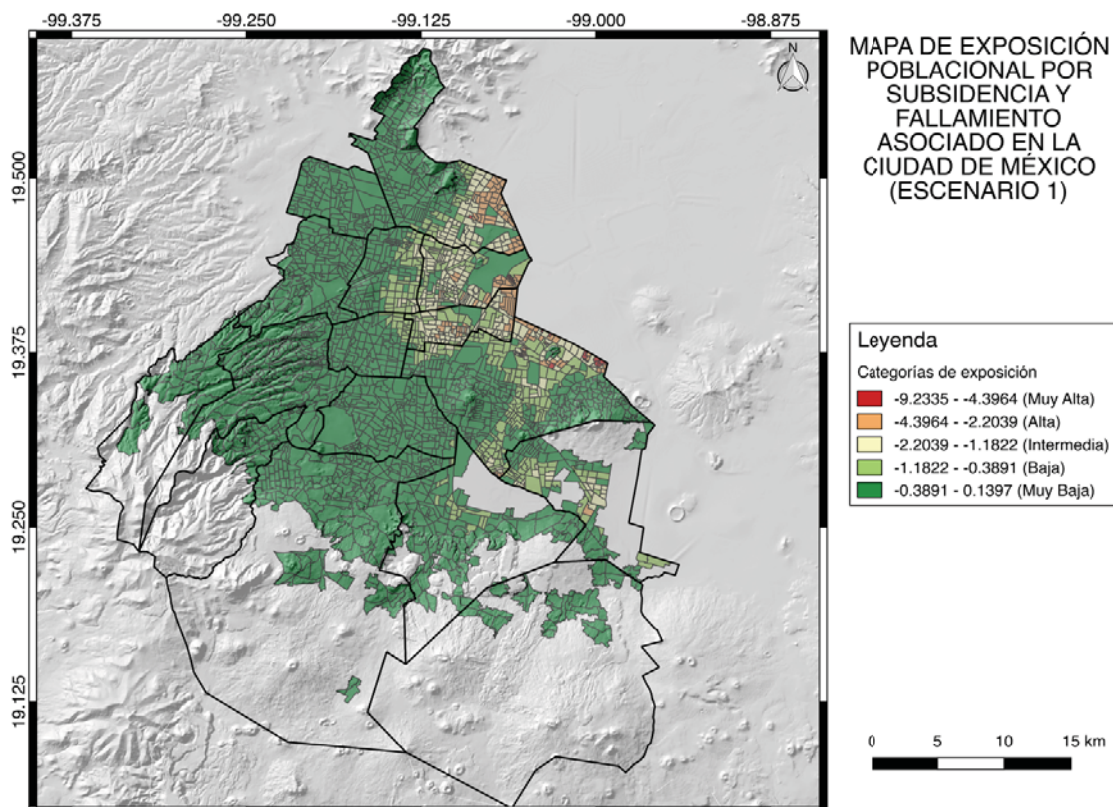


Figura 6.2. Mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado (Escenario 1).

Tabla 6.2. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de exposición	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alta	1.14	0.14	42287	0.48
Alta	19.05	2.41	466500	5.29
Intermedio	47.78	6.05	917181	10.41
Baja	129.97	16.47	1860707	21.12
Muy Baja	591.27	74.92	5523602	62.69
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

Por su parte, el **escenario 2** del mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado fue desarrollado como parte del proyecto “Elaboración del Atlas de Riesgo por fenómenos de origen natural de la Ciudad de México” financiado por la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (Novelo-Casanova, comunicación personal) y establece que:

$$\text{Riesgo} = ((0.75 \times \text{GHS}) + (0.25 \times \text{VSub})) \times \text{VSE} \text{ (Figura 6.3 y Tabla 6.3)}$$

Para el escenario 2 el mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado se define por la siguiente expresión:

$$\text{Exposición} = ((0.75 \times \text{GHS}) + (0.25 \times \text{VSub})) \times \text{Den_Pob} \text{ (Figura 6.4 y Tabla 6.4)}$$

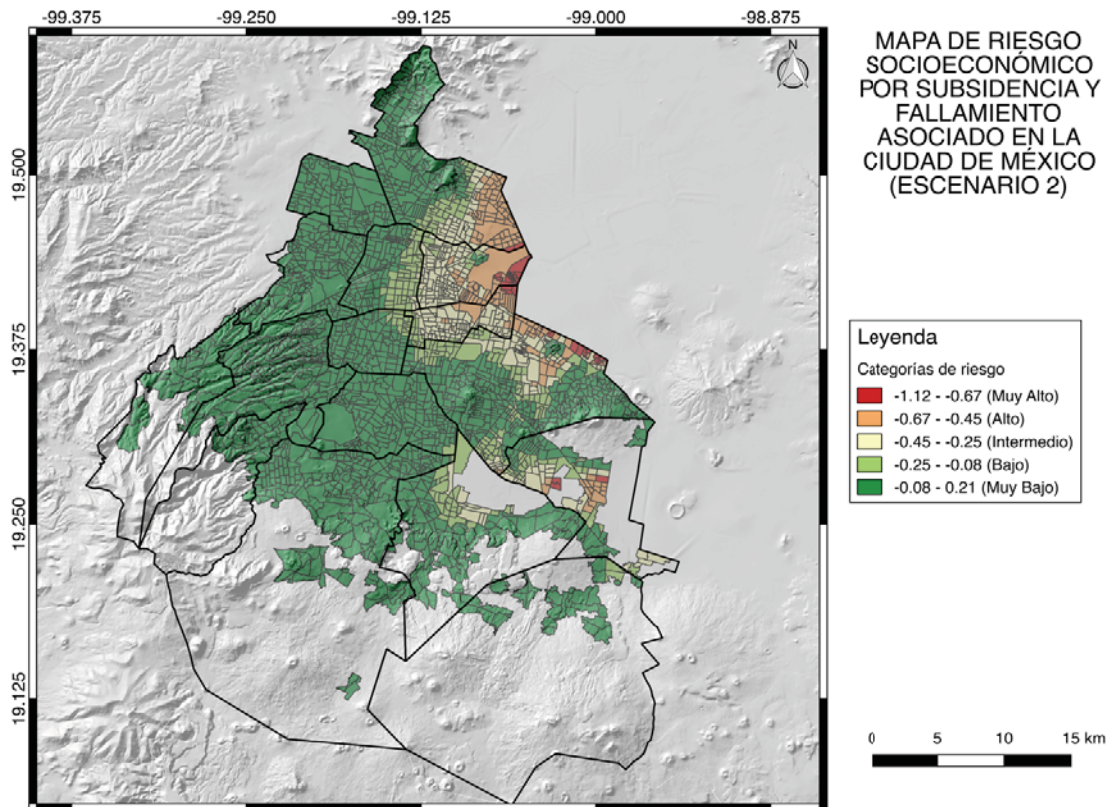


Figura 6.3. Mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado (Escenario 2).

Tabla 6.3. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de riesgo	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alto	6.91	0.88	114611	1.30
Alto	43.99	5.57	546211	6.20
Intermedio	68.60	8.69	983599	11.16
Bajo	68.86	8.73	973644	11.05
Muy Bajo	600.85	76.13	6192212	70.28
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

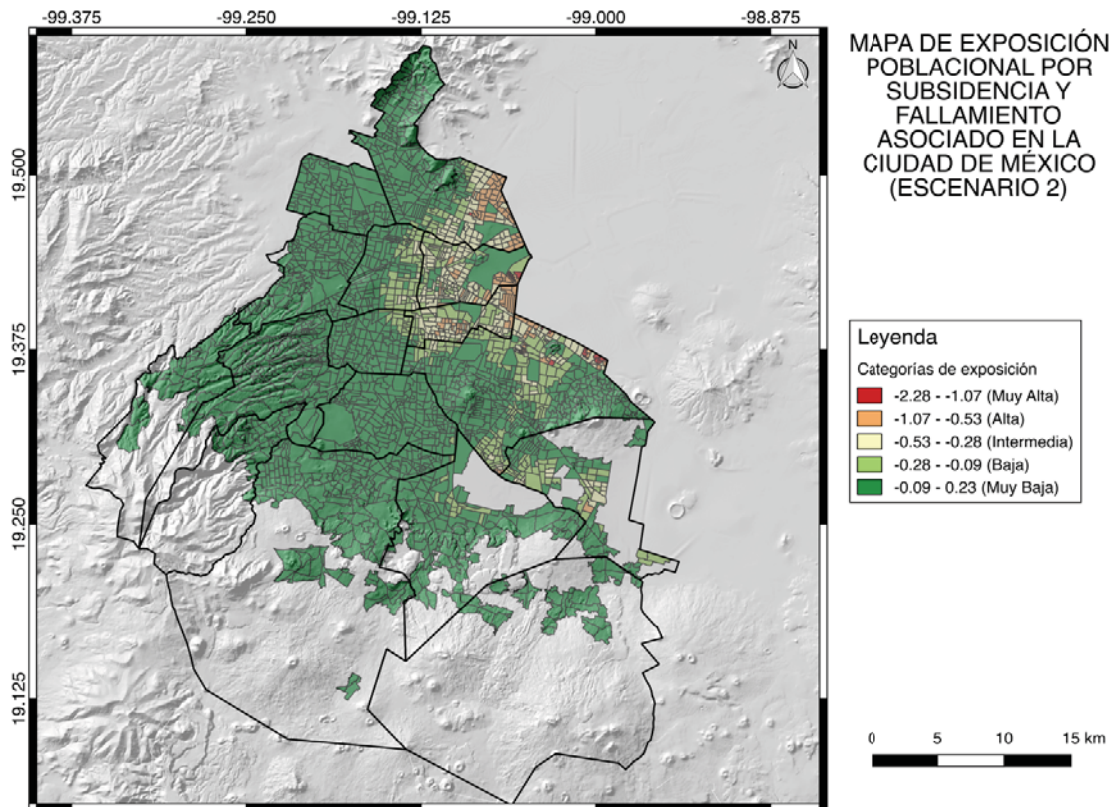


Figura 6.4. Mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado (Escenario 2).

Tabla 6.4. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de exposición	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alta	1.14	0.14	41994	0.48
Alta	18.26	2.31	450120	5.11
Intermedio	44.90	5.69	866759	9.84
Baja	73.20	9.28	1125662	12.78
Muy Baja	651.70	82.58	6325742	71.80
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

El escenario 3 del mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado establece que:

Riesgo= $GHS \times VSE$ (Figura 6.5 y Tabla 6.5).

El mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado para el escenario 2 se define por la siguiente expresión:

Exposición= $GHS \times Den_Pob$ (Figura 6.6 y Tabla 6.6).

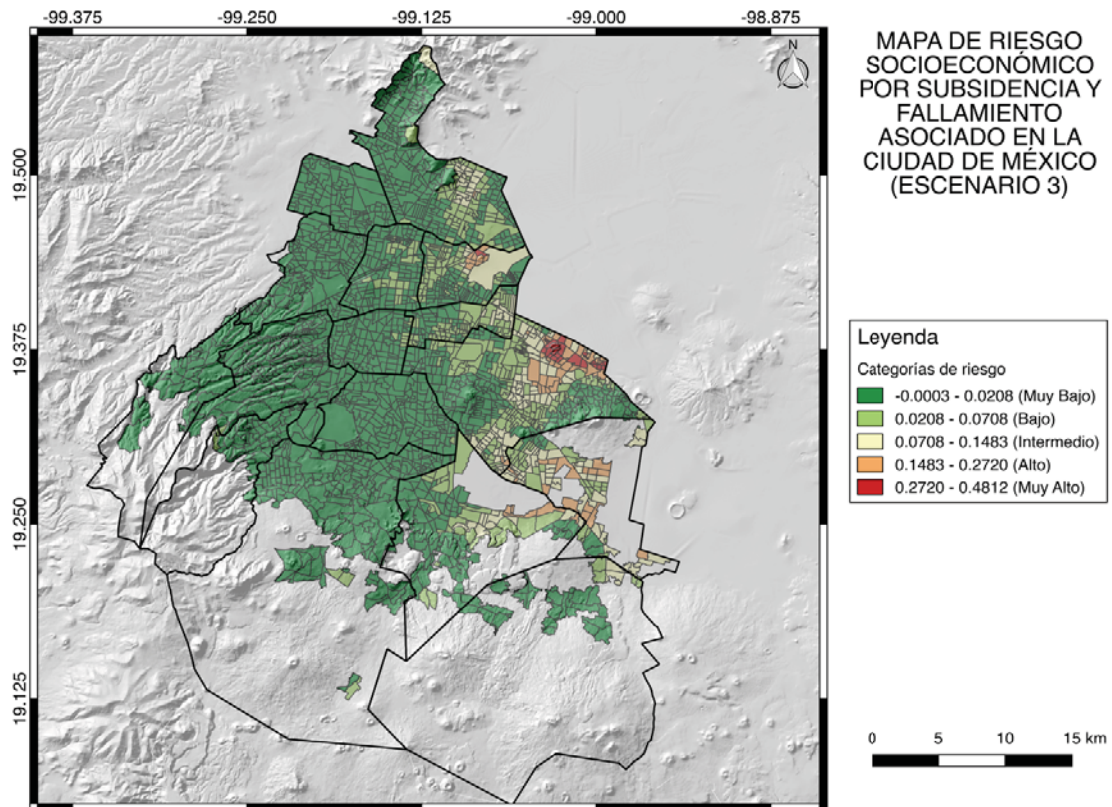


Figura 6.5. Mapa de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado (Escenario 3).

Tabla 6.5. Conteos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de riesgo	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alto	5.01	0.64	91939	1.04
Alto	22.51	2.85	225934	2.56
Intermedio	56.65	7.18	630539	7.16
Bajo	126.87	16.08	1771685	20.11
Muy Bajo	578.17	73.26	6090180	69.13
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

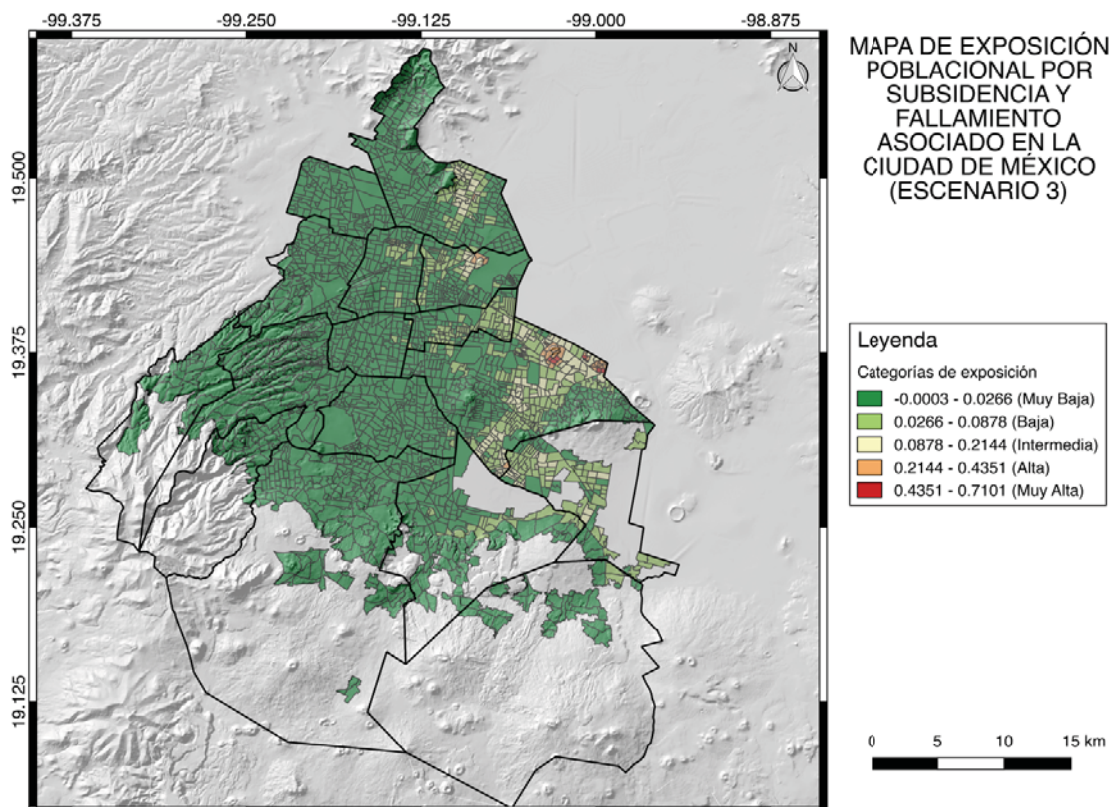


Figura 6.6. Mapa de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado (Escenario 3).

Tabla 6.6. Censos de área y población por zonas de riesgo.

Categorías de exposición	Área (km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
Muy Alta	0.93	0.12	29006	0.33
Alta	3.83	0.49	84593	0.96
Intermedio	26.82	3.40	500594	5.68
Baja	89.77	11.37	1521015	17.26
Muy Baja	667.85	84.62	6675069	75.76
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

6.3. Resultados y discusiones de los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado.

Los tres escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado presentados anteriormente, concentran las categorías intermedio, alto y muy alto de riesgo y exposición hacia el nororiente y suroriente de la ciudad esto debido a que hacia la zona oriente de la Ciudad de México coinciden la mayor densidad poblacional y vulnerabilidad socioeconómica con los mayores valores de subsidencia y de gradiente de subsidencia.

Para los escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado las alcaldías que presentan mayores áreas y población dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto son Iztapalapa (32.64 – 24.58) km² y (514,607 – 353,906) habitantes, Gustavo A. Madero (24.25 – 6.16) km² y (405,793 – 94,578) habitantes y

Venustiano Carranza (30.91 – 10.13) km^2 y (384,009 – 43,228) (Tabla 6.7). Por su parte para los escenarios de mapas de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado las alcaldías que presentan mayores áreas y población dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto son Iztapalapa (19.30 – 11.49) km^2 y (384,770– 262,892) habitantes, Gustavo A. Madero (19.68–4.51) km^2 y (401,075 – 103,846) habitantes y Venustiano Carranza (15.71– 2.44) km^2 y (329,338 – 43,216) (Tabla 6.8).

Tabla 6.7. Comparación entre los conteos de áreas y población por alcaldía de la Ciudad de México para las zonas que se encuentran dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto de los escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado.

Comparación entre los escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico por Subsistencia y Fallamiento asociado.

Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
Categorías de riesgo	Área (km2)	Población	Categorías de riesgo	Área (km2)	Población	Categorías de riesgo	Área (km2)	Población
Muy Alto	6.35	100277	Muy Alto	6.91	114611	Muy Alto	5.01	91939
Alto	50.12	626891	Alto	43.99	546211	Alto	22.51	225934
Intermedio	70.60	1004578	Intermedio	68.60	983599	Intermedio	56.65	630539
Totales	127.07	1731746	Totales	119.51	1644421	Totales	84.17	948412

Alcaldía	Área (km2)	Población	Alcaldía	Área (km2)	Población	Alcaldía	Área (km2)	Población
Venustiano Carranza	30.91	384009	Venustiano Carranza	30.83	382686	Iztapalapa	32.64	514607
Iztapalapa	27.20	400846	Iztapalapa	24.58	353906	Tláhuac	23.27	186981
Gustavo A. Madero	24.25	405793	Gustavo A. Madero	23.47	391559	Venustiano Carranza	10.13	43228
Iztacalco	20.29	347687	Iztacalco	20.39	349875	Xochimilco	7.47	55856
Tláhuac	19.12	153619	Tláhuac	15.16	128413	Gustavo A. Madero	6.16	94578
Xochimilco	4.61	22026	Xochimilco	4.37	20216	Iztacalco	2.61	44474
Cuauhtémoc	0.70	17766	Cuauhtémoc	0.70	17766	Milpa Alta	1.89	8688
Azcapotzalco	0	0	Azcapotzalco	0	0	Azcapotzalco	0	0
Coyoacán	0	0	Coyoacán	0	0	Coyoacán	0	0
Cuajimalpa	0	0	Cuajimalpa	0	0	Cuajimalpa	0	0
Magdalena Contreras	0	0	Magdalena Contreras	0	0	Magdalena Contreras	0	0
Milpa Alta	0	0	Milpa Alta	0	0	Álvaro Obregón	0	0
Álvaro Obregón	0	0	Álvaro Obregón	0	0	Tlalpan	0	0
Tlalpan	0	0	Tlalpan	0	0	Benito Juárez	0	0
Benito Juárez	0	0	Benito Juárez	0	0	Cuauhtémoc	0	0
Miguel Hidalgo	0	0	Miguel Hidalgo	0	0	Miguel Hidalgo	0	0
Total	127.07	1731746	Total	119.51	1644421	Total	84.17	948412

Tabla 6.8. Comparación entre los conteos de áreas y población por alcaldía de la Ciudad de México para las zonas que se encuentran dentro de las categorías de exposición intermedia, alta y muy alta de los escenarios de mapas de Exposición Socioeconómica por Subsistencia y Fallamiento asociado.

Comparación entre los escenarios de mapas de Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado.

Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
Categorías de exposición	Área (km2)	Población	Categorías de exposición	Área (km2)	Población	Categorías de exposición	Área (km2)	Población
Muy Alta	1.14	42287	Muy Alta	1.14	41994	Muy Alta	0.93	29006
Alta	19.05	466500	Alta	18.26	450120	Alta	3.83	84593
Intermedio	47.78	917181	Intermedio	44.90	866759	Intermedio	26.82	500594
Totales	67.97	1425968	Totales	64.31	1358873	Totales	31.59	614193

Alcaldía	Área (km2)	Población	Alcaldía	Área (km2)	Población	Alcaldía	Área (km2)	Población
Gustavo A. Madero	19.68	401075	Gustavo A. Madero	18.25	369387	Iztapalapa	19.30	384770
Venustiano Carranza	15.41	325895	Venustiano Carranza	15.72	329338	Tláhuac	4.75	70412
Iztapalapa	13.70	298614	Iztacalco	13.21	292741	Gustavo A. Madero	4.51	103846
Iztacalco	13.21	292241	Iztapalapa	11.49	262892	Venustiano Carranza	2.44	43216
Tláhuac	4.35	60934	Tláhuac	4.02	57806	Iztacalco	0.60	11949
Cuauhtémoc	1.61	47209	Cuauhtémoc	1.61	47209	Álvaro Obregón	0	0
Azcapotzalco	0	0	Azcapotzalco	0	0	Azcapotzalco	0	0
Coyoacán	0	0	Coyoacán	0	0	Benito Juárez	0	0
Cuajimalpa	0	0	Cuajimalpa	0	0	Coyoacán	0	0
Magdalena Contreras	0	0	Magdalena Contreras	0	0	Cuajimalpa	0	0
Milpa Alta	0	0	Milpa Alta	0	0	Cuauhtémoc	0	0
Álvaro Obregón	0	0	Álvaro Obregón	0	0	Magdalena Contreras	0	0
Tlalpan	0	0	Tlalpan	0	0	Miguel Hidalgo	0	0
Xochimilco	0	0	Xochimilco	0	0	Milpa Alta	0	0
Benito Juárez	0	0	Benito Juárez	0	0	Tlalpan	0	0
Miguel Hidalgo	0	0	Miguel Hidalgo	0	0	Xochimilco	0	0
Total	67.97	1425968	Total	64.31	1358873	Total	31.59	614193

Para el escenario 1 del mapa de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado se considera a la Velocidad de Subsistencia y al Gradiente Horizontal de Subsistencia como los elementos generadores de peligro. Para este escenario cada uno de estos elementos tomó el mismo peso. Al multiplicar la suma de la Velocidad de Subsistencia y el Gradiente Horizontal de Subsistencia por la Vulnerabilidad Socioeconómica para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y por la densidad de poblacional para el mapa de exposición poblacional y se obtuvo respectivamente que 127.07 km² y 67.97 km² del área urbanizada de la Ciudad de México se encuentra dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto, lo que afectaría a 1'731,746 habitantes para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y 1'425,968 habitantes para el mapa de exposición poblacional (Tablas 6.7 y 6.8).

En el escenario 2 del mapa de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsistencia y Fallamiento asociado se tomó también la Velocidad de Subsistencia y el Gradiente Horizontal de Subsistencia como los elementos generadores de peligro, pero para este caso al gradiente de subsidencia se le dio un peso tres veces mayor con respecto al asignado a la velocidad de subsidencia. Esto debido a que a mayor gradiente de subsidencia mayor velocidad diferencial y por tanto mayor probabilidad de que ocurran daños potenciales. Por otro lado, si la velocidad de subsidencia del terreno es homogénea en un área dada, el potencial para generar daños es menor en comparación con valores grandes de gradiente de subsidencia. Por esta razón se consideró la velocidad de subsidencia con menor peso relativo. Al multiplicar la suma ponderada de la Velocidad de Subsistencia y el Gradiente Horizontal de Subsistencia por la Vulnerabilidad Socioeconómica para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y por la densidad de poblacional para el mapa de exposición poblacional y se obtuvo respectivamente que 119.51 km² y 64.31 km² del área urbanizada de

la Ciudad de México se encuentran dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto, lo que afectaría a 1'644,421 habitantes para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y 1'358,873 habitantes para el mapa de exposición poblacional (Tablas 6.7 y 6.8).

Como se dijo con anterioridad, el gradiente de subsidencia tiene mayor potencial para generar daños que la velocidad de subsidencia. Es por esto que para el escenario 3 solo se considero al Gradiente Horizontal de Subsidencia como el elemento generador de peligro. Este se multiplico por la Vulnerabilidad Socioeconómica para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y por la densidad de poblacional para el mapa de exposición poblacional y se obtuvo respectivamente que 84.17 km² y 31.59 km² del área urbanizada de la Ciudad de México se encuentra dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto, lo que afectaría a 948,412 habitantes para el caso del mapa de riesgo socioeconómico y 614,193 habitantes para el mapa de exposición poblacional (Tablas 6.7 y 6.8).

Con base en los resultados expuestos y en los fundamentos tomados en cuenta para la formulación de cada uno de los escenarios, se considera al escenario 2 como el mejor escenario para expresar el Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado. Debido a que este escenario considera tanto la velocidad de subsidencia como al potencial de desarrollo de fallamiento a consecuencia del gradiente de subsidencia, así como, la importancia relativa de cada uno de estos elementos. Los escenarios 1 y 3 no son los suficientemente robustos, ya que, en el caso del escenario 1 no toma en cuenta la importancia relativa de los elementos generadores de peligro y para el escenario 3 solo se toma el gradiente de subsidencia y no considera los valores de velocidad de subsidencia, los cuales también son importantes para evaluar el potencial de generar daños a causa de estos eventos.

Dado que el mapa de Vulnerabilidad Socioeconómica presenta 492.45 km² dentro de las categorías intermedio, alto y muy alto y que en el mapa de Densidad Poblacional dichas categorías solo ocupan 228.47 km² (Tabla 6.9), al aplicar el álgebra de mapas los escenarios de mapas de riesgo socioeconómico presentan mayor área (127.07 km² – 84.17 km²) dentro de estas categorías en comparación con los escenarios de mapas de exposición poblacional (67.97 km² – 31.59 km²).

Tabla 6.9. Áreas que se encuentran dentro de las categorías intermedio, alto y muy alto según los mapas de Vulnerabilidad Socioeconómica (Novelo-Casanova, comunicación personal) y densidad poblacional para la Ciudad de México (ver Capítulo 5).

Vulnerabilidad Socioeconómica			Densidad de Población		
Categoría	Intervalos	Área (Km2)	Categoría	Intervalos	Área (Km2)
INTERMEDIO	[15-18]	295.87	INTERMEDIO	[14-21]	140.43
ALTO	[18 -21.2]	161.34	ALTO	[21 -31]	77.58
MUY ALTO	[21.2-50.9]	35.24	MUY ALTO	[31-57]	10.45
Totales		492.45	Totales		228.47

Para el escenario 3 de los mapas de riesgo socioeconómico y de exposición poblacional se observa que las áreas y población que caen dentro de las categorías intermedio, alto y muy alto son menores en comparación a los escenarios 1 y 2, esto es debido a que a solo considerar el gradiente de subsidencia como el elemento generador de peligro por lo que las áreas de

mayor afectación tienden a disminuir ya que no se considera el efecto de la velocidad de subsidencia.

Capítulo 7. Distorsión angular de las estructuras civiles en la Ciudad de México.

7.1. Contexto teórico de los mapas de Distorsión Angular

7.1.1. Distorsión Angular y desplazamiento vertical admisible

La distorsión angular se expresa por la relación de la subsidencia diferencial δ y la distancia ℓ entre dos puntos (Skempton y MacDonald, 1956) (Figura 7.1). La subsidencia diferencial de una estructura se define como la diferencia entre la subsidencia medida entre dos puntos dados (Ricceri y Soranzo, 1985).

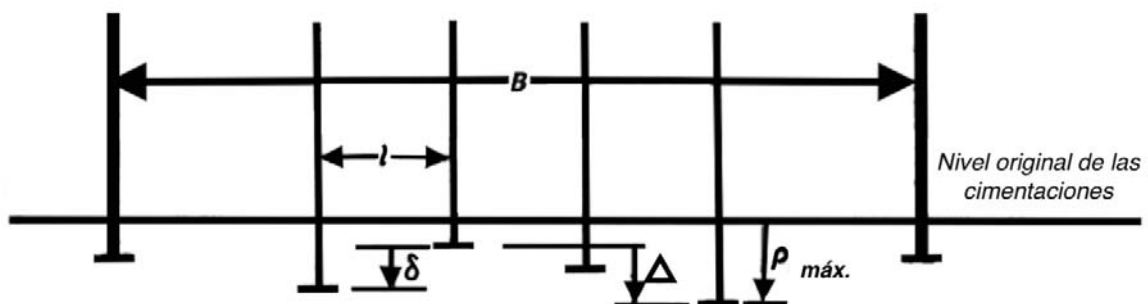


Figura 7.1. Diagrama que ilustra la definición de distorsión angular δ/ℓ , máximo asentamiento $P \text{ máx.}$ y la distorsión angular máxima Δ para una edificación que no experimenta una inclinación de su estructura.

A partir de la medición y observación de 98 edificios, ubicados estos en diferentes países del mundo tales como Reino Unido, Austria, Brasil, México, Estados Unidos, y de los cuales 40 ya habían sufrido daños de diferente intensidad a consecuencia de subsidencia del terreno, se pudieron establecer valores tentativos para límites de daños en términos de distorsión angular, sin considerar la inclinación del edificio (Tabla 7.1; Skempton y MacDonald, 1956). Estos valores admisibles se recomendaron en su momento como valores base, para el diseño de edificaciones (Skempton y MacDonald, 1956). Otros investigadores (Meyerhof, 1956; Bjerrum, 1963; Wahls, 1981) han validado los valores límites inicialmente propuestos por Skempton y MacDonald en 1956, por lo que aún siguen constituyendo valores de referencia para el diseño básico de edificaciones.

Tabla 7. 1. Valores de distorsión angular y sus respectivas situaciones características (Skempton y MacDonald, 1956).

Distorsión Angular	Situación Característica
1/300	Agrietamiento de los paneles en edificios de Armazón del tipo tradicional, o en las paredes de edificios de muros de carga.
1/150	Daño estructural en las columnas y vigas.
1/500	Límite de diseño para evitar agrietamiento.
1/1000	Límite de diseño para evitar cualquier daño debido a subsidencia.

Por otra parte, otro grupo de investigadores (Polshin y Tokar, 1957; Burland y Wroth, 1974), consideran otras variables para la evaluación de las condiciones de las edificaciones, tales como el comportamiento ante la subsidencia diferencial de edificios de carga soportada por

ladrillos y la asociación del agrietamiento visible en los edificios con valores de deformación por tracción. En efecto, Polshin y Tokar (1957) señalan que la máxima distorsión angular recomendada para edificios de ladrillos debe ser evaluada por separado de los edificios con estructura de concreto armado por lo que dar un valor de distorsión angular máximo para todas las edificaciones no es recomendable. Adicionalmente, Burland y Wroth en (1974), concluyen que el tiempo de servicio de las edificaciones es muy subjetivo ya que depende de la función o uso del edificio y la reacción de los usuarios.

Diversos estudios (Skempton y MacDonald, 1956; Polshin y Tokar, 1957; Burland y Wroth, 1974; Bjerrum, 1963; Wahls, 1994; Meyerhof, 1956) muestran que los valores tolerables o intolerables de desplazamiento y distorsión angular de un tipo de estructura varían significativamente y por lo tanto deberían ser tratados como una variable aleatoria (Zhang y Ng, 2007). Por lo tanto, Zhang y Ng (2005) desarrollaron un procedimiento basado en probabilidad para determinar la distribución de desplazamiento tolerable para edificios y puentes. Bajo el mismo principio, Zhang y Ng (2007) establecieron un criterio más robusto para determinar los valores de distorsión angular y desplazamiento tolerable y no tolerable tomando en cuenta la información de movimiento de más de 380 edificios, de los cuales 124 edificios se encuentran ubicados en Hong Kong y China, y los edificios restantes se encuentran localizados en diferentes países alrededor del mundo y fueron tomados de otras investigaciones (Skempton y MacDonald, 1956; Polshin y Tokar, 1957; Burland y Wroth, 1974; Bjerrum, 1963; Wahls, 1994; Meyerhof, 1956). Para su investigación, Zhang y Ng (2007) consideraron el tipo de cimentaciones, tipo de estructuras y tipos de suelo.

Estos análisis más recientes proponen que para poder establecer umbrales para el desplazamiento vertical y distorsión angular tolerables, se construye una curva de fragilidad, la cual expresa la relación del número de casos intolerables con respecto al número total de casos, en un intervalo de desplazamiento vertical o distorsión angular de referencia (Zhang y Ng, 2007). Esta curva, permite dividir el estado tolerable del estado intolerable y puede ser usada para simular una función de probabilidad acumulada, para posteriormente establecer los límites de desplazamiento vertical y distorsión angular.

Zhang y Ng (2007) tomaron valores deterministas con un factor de seguridad de 1.5 y valores característicos con un intervalo de confianza de 95%, con la finalidad de tener valores de desplazamiento vertical y distorsión angular, que sean aplicados con fiabilidad para el diseño de edificaciones, considerando ciertas características particulares, tales como el tipo de cimentación o el tipo de estructura. El cálculo del factor de seguridad de 1.5, se realiza sobre el valor medio del límite tolerable. Este factor es considerado como un valor aceptable ya que el cálculo de la subsidencia en las edificaciones puede involucrar un error alrededor del 50% (Ricceri y Soranzo, 1985). Para la estimación de los valores de desplazamiento vertical y distorsión angular con un intervalo de confianza de 95%, es necesario hacer uso de la distribución de probabilidad donde los valores obtenidos se establecerán en función de la complejidad de la estructura considerada. Los desplazamientos verticales admisibles y distorsiones angulares determinados, tomando en cuenta el factor de seguridad de 1.5 y los valores característicos son presentados en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Desplazamiento vertical y distorsión angular admisible para edificios y cimentaciones (tomado de Zhang y Ng, 2007).

Categoría de Edificios	Valor admisible (F.S = 1.5)		Valor admisible (Intervalo de confianza 95 %)	
	Desplazamiento Vertical (mm)	Distorsión Angular (rad)	Desplazamiento Vertical (mm)	Distorsión Angular (rad)
Tipo de Cimentación				
Cimentación Somera	145	0.0041	49	0.0012
Cimentación Profunda	71	0.0013	42	0.0003
Tipo de Estructura				
Edificios de Armazón	92	0.0031	29	0.0010
Edificios de Ladrillo	60	0.0024	22	0.0009

A partir de lo observado en la Tabla 7.2, se puede señalar que los valores característicos son más pequeños que los deterministas obtenidos a partir de un factor de seguridad de 1.5 (Zhang y Ng, 2007). De la misma manera, los valores de desplazamiento vertical admisible y distorsión angular son más bajos para cimentaciones profundas que para cimentaciones someras. Esto es debido a la forma en que se transfieren los esfuerzos, ya que en el caso de cimentaciones someras, la distribución de la carga se realiza generalmente sobre una mayor área del suelo, mientras que para el caso de las cimentaciones profundas la transferencia de carga al suelo, se realiza a una capa dura ubicada en la base de los pilotes y/o a través de la fricción que generan los pilotes con el medio (Zhang y Ng, 2007). Por lo tanto, la carga debido a la edificación, puede ser distribuida más uniformemente en cimentaciones someras que en cimentaciones profundas (Zhang y Ng, 2007).

En cuanto al tipo de estructura, se puede observar que los edificios de armazón poseen una mayor tolerancia que los edificios de ladrillo (Tabla 7.2), esto debido a que, dado un mismo desplazamiento vertical diferencial, una estructura de armazón acomoda las deformaciones en las columnas y vigas, por su parte los edificios de ladrillos acomodan el desplazamiento vertical diferencial flexionando sus elementos en forma de una gran columna, por tanto, estos últimos poseen una mayor susceptibilidad a generar agrietamientos y por ende menores valores tolerables de distorsión angular y desplazamiento vertical (Zhang y Ng, 2007).

Es importante señalar que los valores de distorsión angular y desplazamiento vertical encontrados a partir de la metodología de Zhang y Ng (2007) son similares a los reflejados en los trabajos de Skempton y MacDonald (1956), Polshin y Tokar (1956), el Euro código 1 (CEN, 1993), el código chino para el diseño de cimentaciones (MOC, 2002) y el manual de Ingeniería de Cimentaciones de Canadá (CGS, 1985). De la misma manera, se puede observar que, en los manuales de construcción referidos, existe mayor similitud entre la distorsión angular y el desplazamiento vertical al considerar un factor de seguridad de 1.5, que cuando se utiliza a un intervalo de confianza de 95%. Zhang y Ng (2007) señalan que sería pertinente adoptar los valores característicos ya que estos consideran la magnitud y variabilidad del límite de desplazamiento y por tanto son más confiables.

7.2. Metodología para la elaboración del Mapa de Distorsión Angular para la Ciudad de México y productos asociados

7.2.1. Mapa de Distorsión Angular

Para la elaboración del mapa de distorsión angular para la Ciudad de México se hace uso de la *calculadora ráster* disponible en QGIS versión 2.18, usando como capa de entrada el ráster de Gradiente Horizontal de Subsistencia (GHS) (ver Capítulo 3). Seguidamente, se procede a transformar el ráster de GHS expresado como porcentaje (como se tenía expresado inicialmente) a radianes, para ello se hace uso de las siguientes operaciones:

$$GHS(\text{grados}) = \arctan\left(\frac{GHS(\%)}{100}\right)$$

Expresión 7.1. Transformación del GHS de porcentaje a grados

$$GHS(\text{rad}) = \frac{GHS(\text{grados}) * 180}{\pi}$$

Expresión 7.2. Transformación de GHS de grados a radianes (rad)

Luego se procede a dividir los intervalos de clase, tomando como valor de corte 0.002 radianes para condiciones favorables (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) y múltiplos de dicho valor para establecer los límites superiores de las siguientes categorías para condiciones desfavorables (Figura 7.2). A continuación, se realiza el conteo de población y área afectada para cada intervalo. Para ello es necesario hacer uso de los polígonos de AGEBS de Población y Vivienda (INEGI, 2011; INEGI, 2012a) y de la herramienta *add raster value to feature* disponible en QGIS v 2.18, ya que esta herramienta permite asignar un valor de distorsión angular a cada uno de los polígonos que conforman los AGEBS de población (Figura 7.3). Seguidamente se procede a exportar la tabla de atributos del mapa de Distorsión Angular por AGEBS en el formato de *Valores Separados por Comas (*.csv)*. Debido a que cada uno de estos polígonos posee un número de habitantes definido y un área asociada (INEGI, 2011, 2012a), es posible entonces calcular el número de habitantes y área total tomando en cuenta los intervalos de clase definidos (Tabla 7.3).

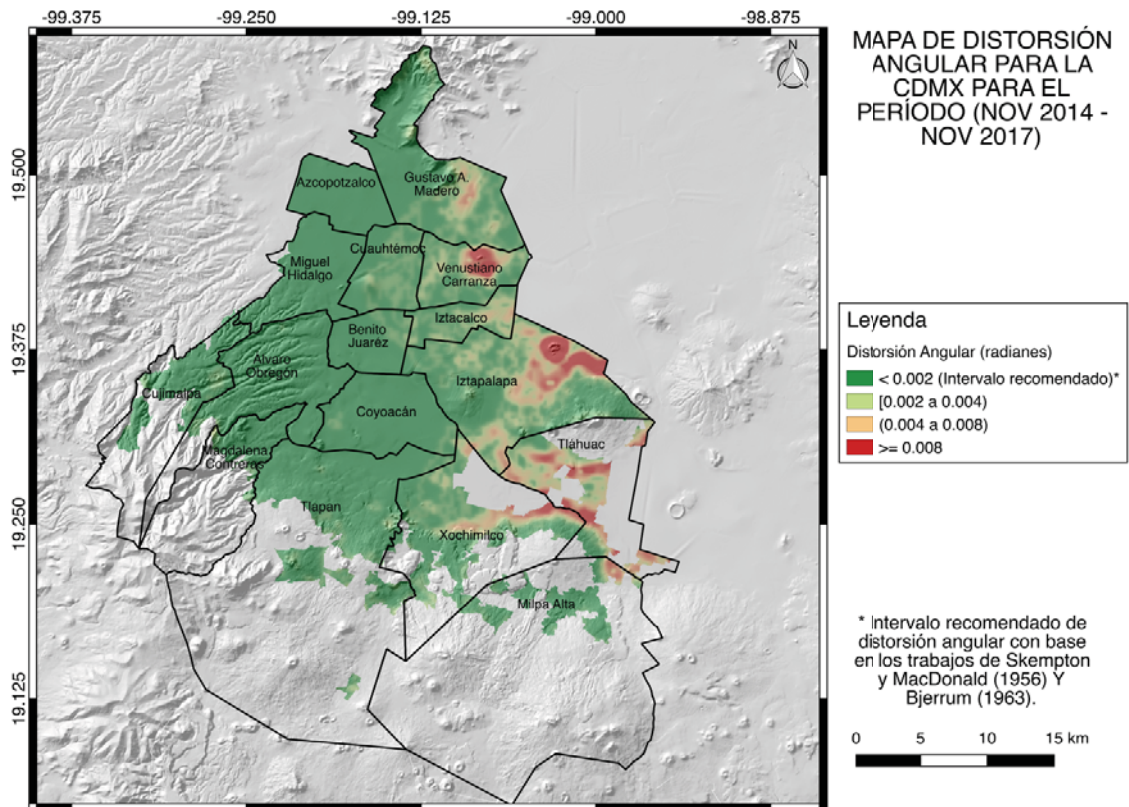


Figura 7.2. Mapa de Distorsión Angular para la Ciudad de México obtenido a partir del procesamiento de la serie de tiempo InSAR del periodo noviembre 2014 a noviembre 2017.

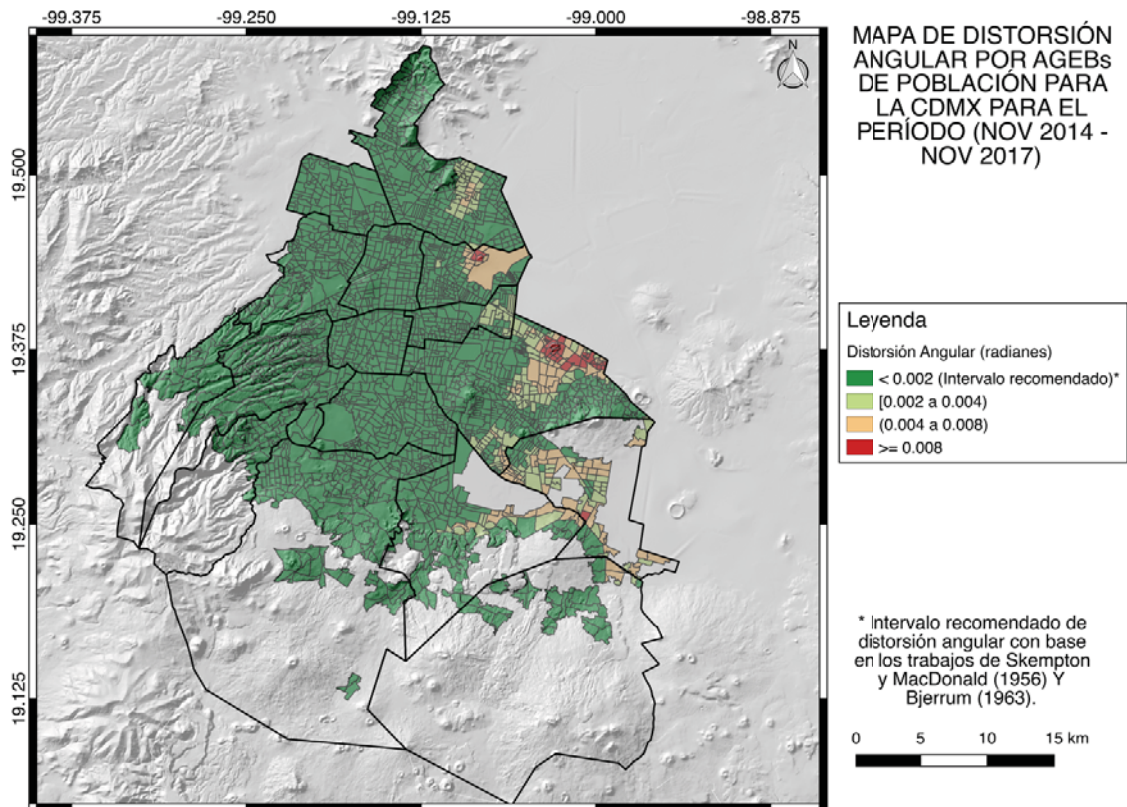


Figura 7.3. Mapa de Distorsión Angular, distribuido según la disposición de los AGEBS de población (INEGI, 2011; 2012a) para la Ciudad de México.

Tabla 7.3. Censos de área y población por categoría de distorsión angular.

Distorsión angular (radianes)	Área (Km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
<0.002	691.72	87.65	7699487	87.39
[0.002 - 0.004)	46.39	5.88	646264	7.34
[0.004 - 0.008)	44.54	5.64	351564	3.99
>=0.008	6.56	0.83	112962	1.28
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

7.2.2. Mapas de Distorsión Angular admisible para Cimentaciones someras y profundas, Edificios de Armazón y Ladrillos.

Para la elaboración de estos mapas se usaron los valores de distorsión angular y desplazamiento vertical admisibles obtenidos a partir de un análisis de asentamiento límite tolerable y distorsión angular para edificios y cimentaciones (Zhang y Ng, 2005, 2007) (Tabla 7.2).

Para la construcción de los mapas de distorsión angular admisible se usan entonces ambos criterios expresados en la Tabla 7.2. (Zhang y Ng, 2005, 2007). Es decir, se usan los valores límite para un factor de seguridad de 1.5 y los valores característicos tomando en cuenta el 95% del intervalo de confianza, por lo que se generan dos mapas por categorías de

edificación. Seguidamente se divide el mapa de distorsión angular de la Ciudad de México en dos zonas. Una primera zona mostrada en color verde y que corresponde a aquellas áreas que están dentro de los valores recomendados (Zhang y Ng, 2007) y una segunda, mostrada de color rojo, la cual expresa aquellas áreas cuyos valores de distorsión angular ya exceden a los umbrales recomendados (Figuras 7.4 - 7.11).

Para poder comparar entre los diferentes mapas de distorsión angular, se procede a calcular las áreas y población que se ubican en las dos zonas antes mencionadas. Para esto se aplica el mismo procedimiento descrito en la sección 7.2.1 de este trabajo, que describe lo referente al conteo de población y áreas afectadas para cada intervalo (Tablas 7.5 – 7.11).

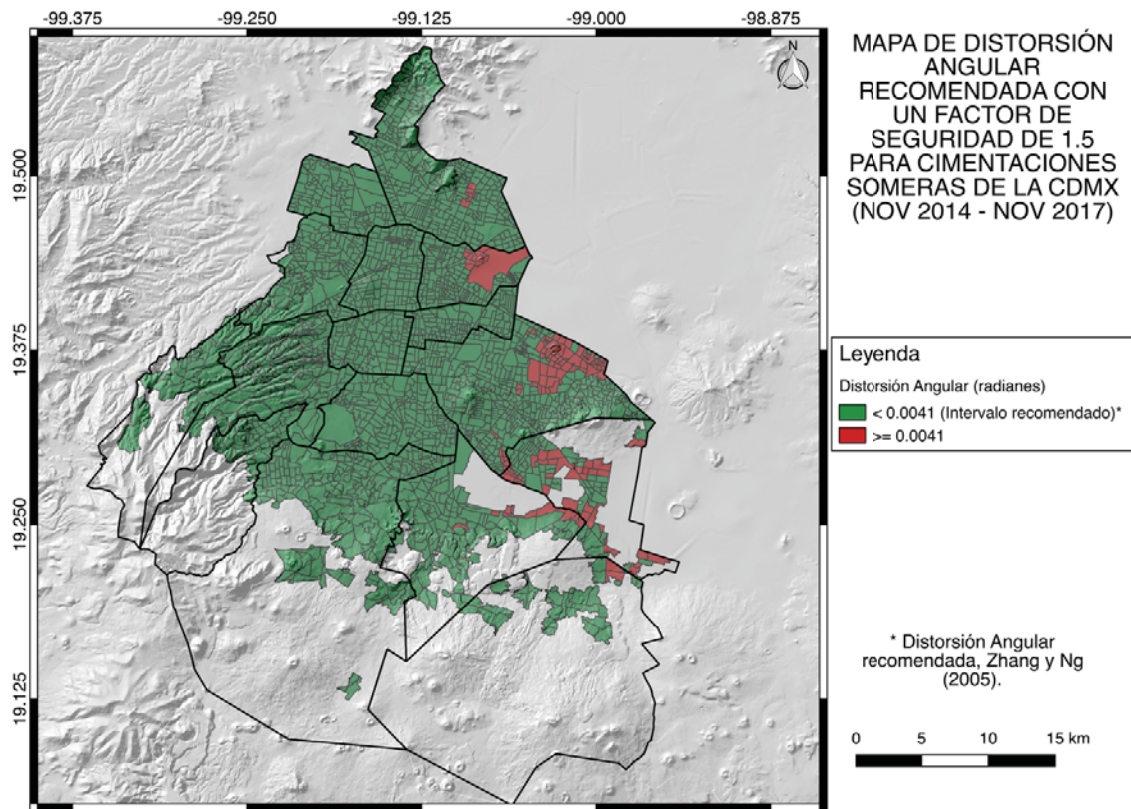


Figura 7.4. Mapa de Distorsión Angular recomendada con un Factor de Seguridad de 1.5 para Cimentaciones Someras.

Tabla 7.4. Conteos de áreas y población para Cimentaciones Someras considerando un Factor de Seguridad de 1.5.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0041	739.72	93.73	8363075	94.92
>= 0.0041	49.49	6.27	447202	5.08
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

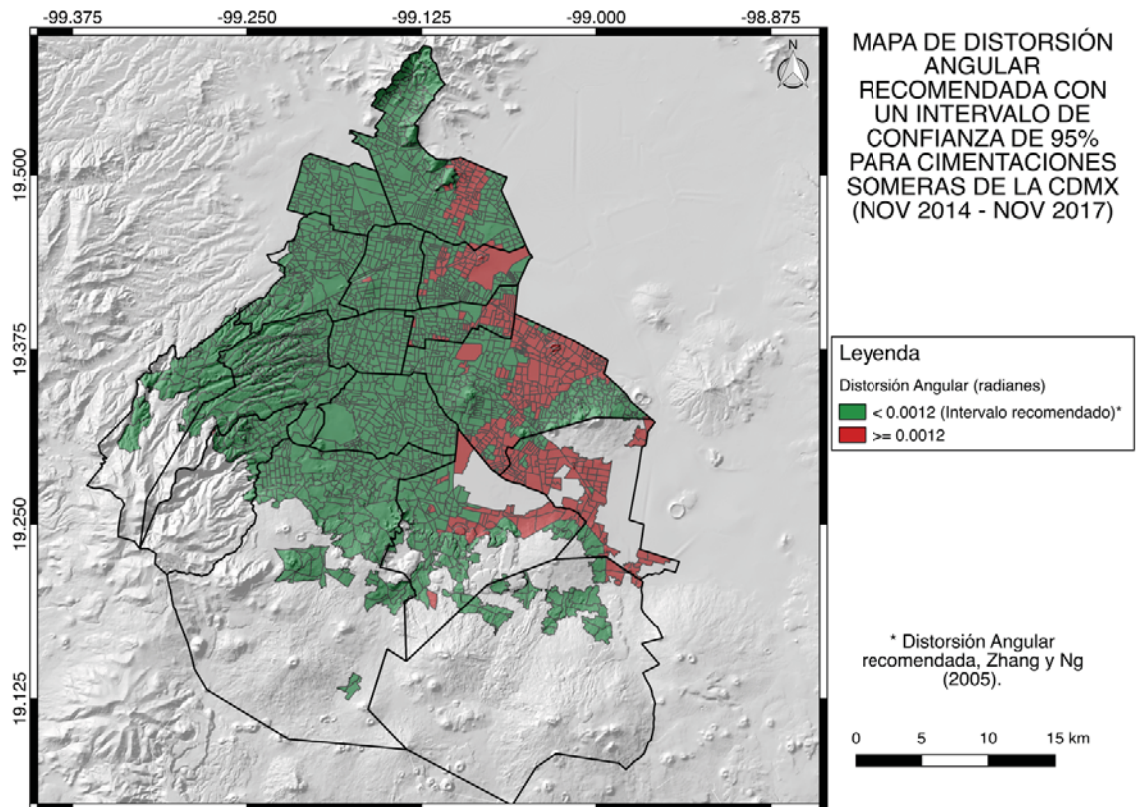


Figura 7.5. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Intervalo de Confianza de 95% para Cimentaciones Someras.

Tabla 7. 5. Conteos de áreas y población para Cimentaciones Someras considerando un Intervalo de Confianza de 95%.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0012	655.31	83.03	7217719	81.92
>= 0.0012	133.90	16.97	1592558	18.08
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

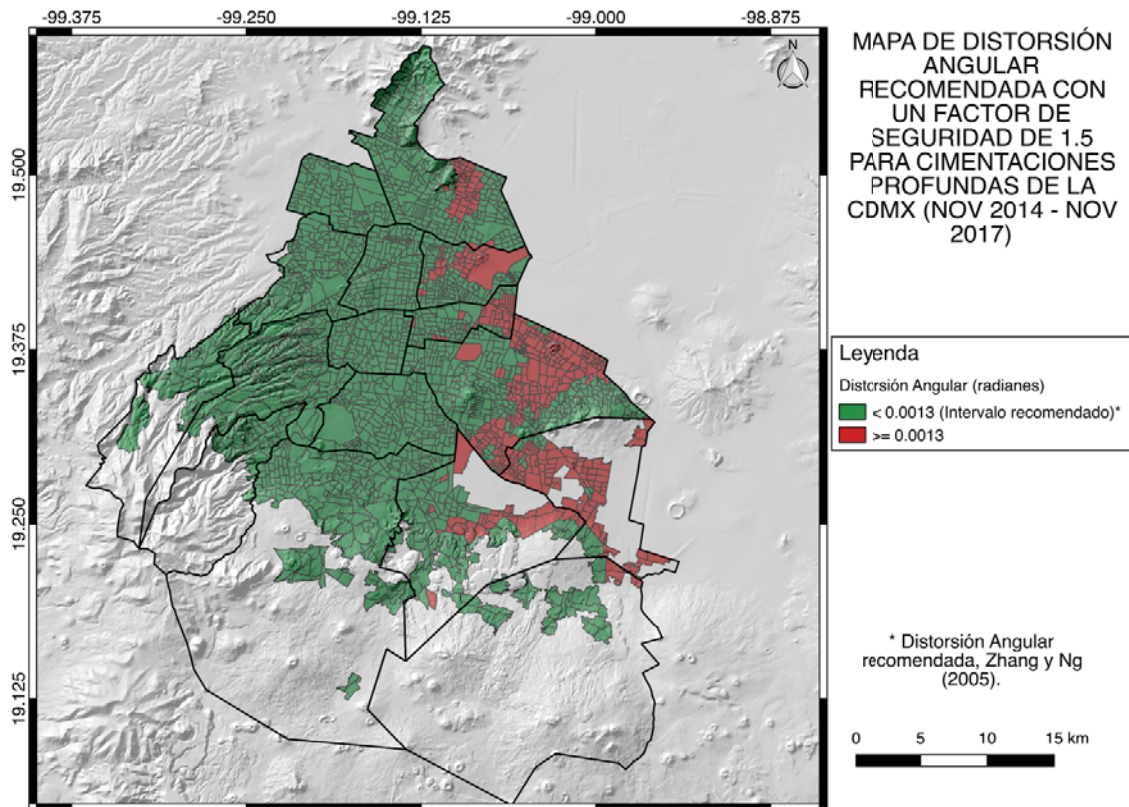


Figura 7.6. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Factor de Seguridad de 1.5 para Cimentaciones Profundas.

Tabla 7. 6. Conteos de áreas y población para Cimentaciones Profundas considerando un Factor de Seguridad de 1.5.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0013	661.34	83.80	7322929	83.12
>=0.0013	127.87	16.20	1487348	16.88
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

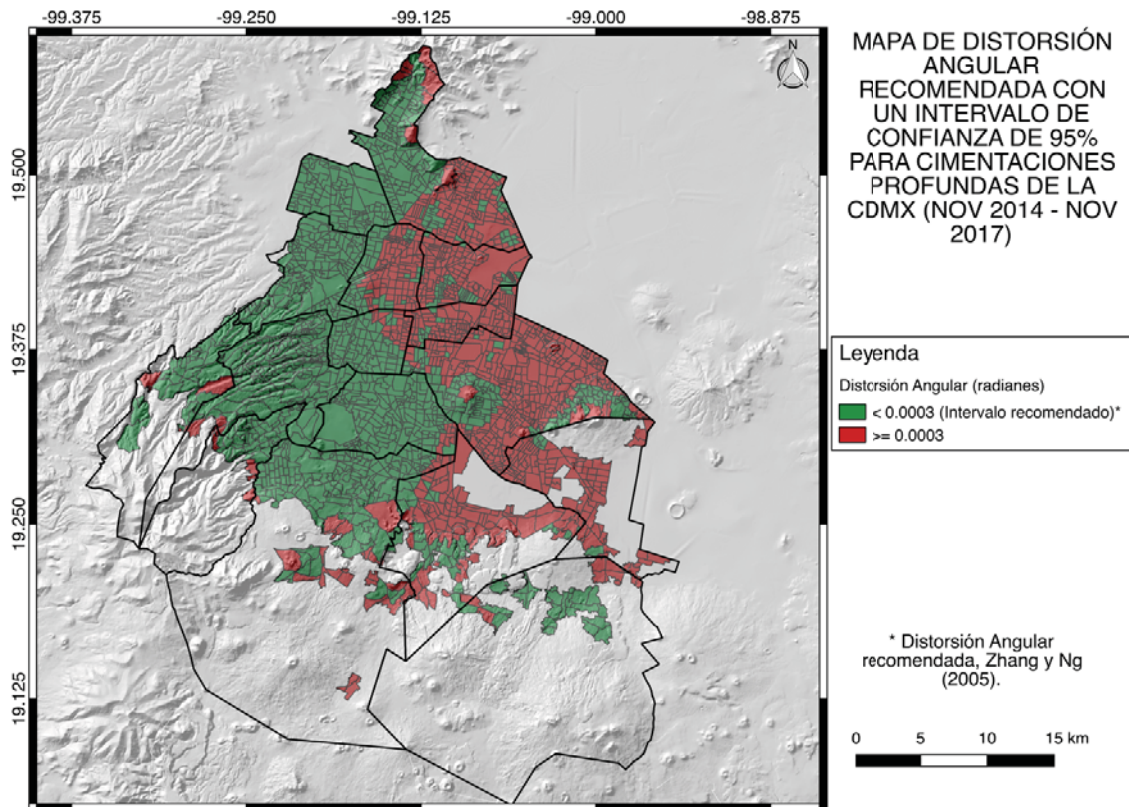


Figura 7.7. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Intervalo de Confianza de 95% para Cimentaciones Profundas.

Tabla 7.7. Conteos de áreas y población para Cimentaciones Profundas considerando un Intervalo de Confianza de 95%.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0003	462.36	58.58	4952605	56.21
>=0.0003	326.86	41.42	3857672	43.79
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

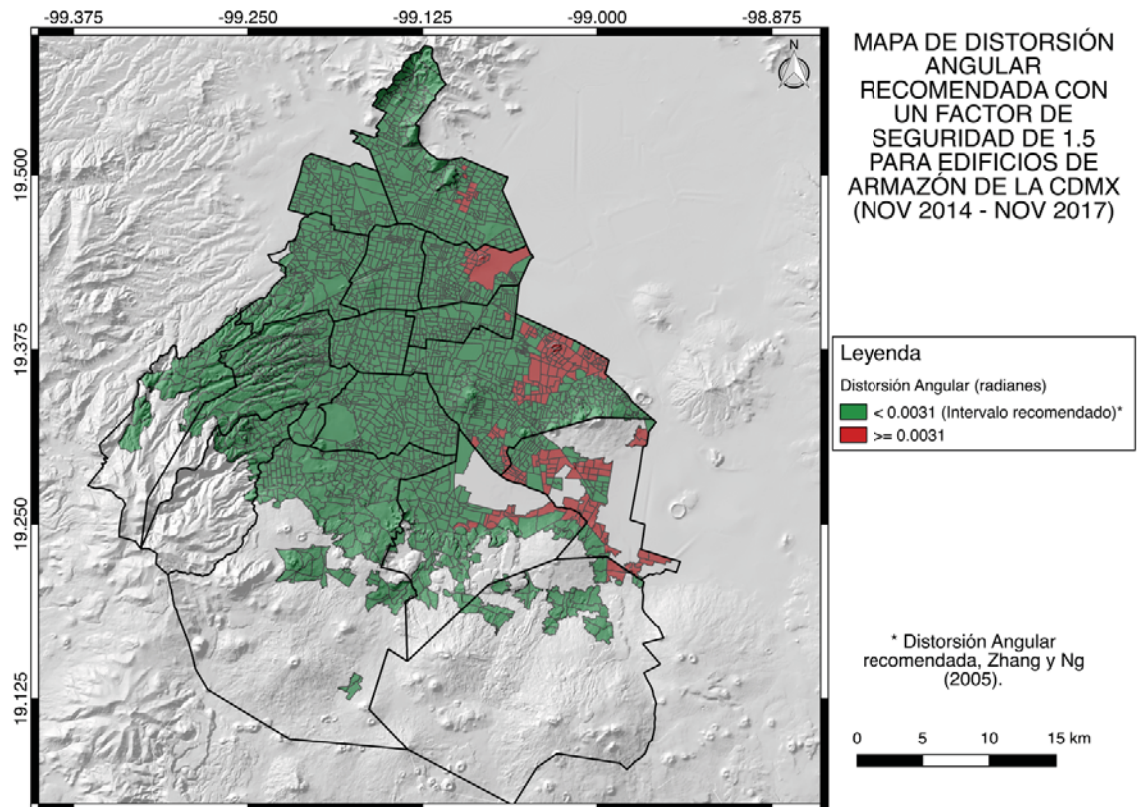


Figura 7.8. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Factor de Seguridad de 1.5 para Edificios de Armazón.

Tabla 7.8. Censos de áreas y población para Edificios de Armazón considerando un Factor de Seguridad de 1.5.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km ²)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0031	723.56	91.68	8122685	92.20
>= 0.0031	65.65	8.32	687592	7.80
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

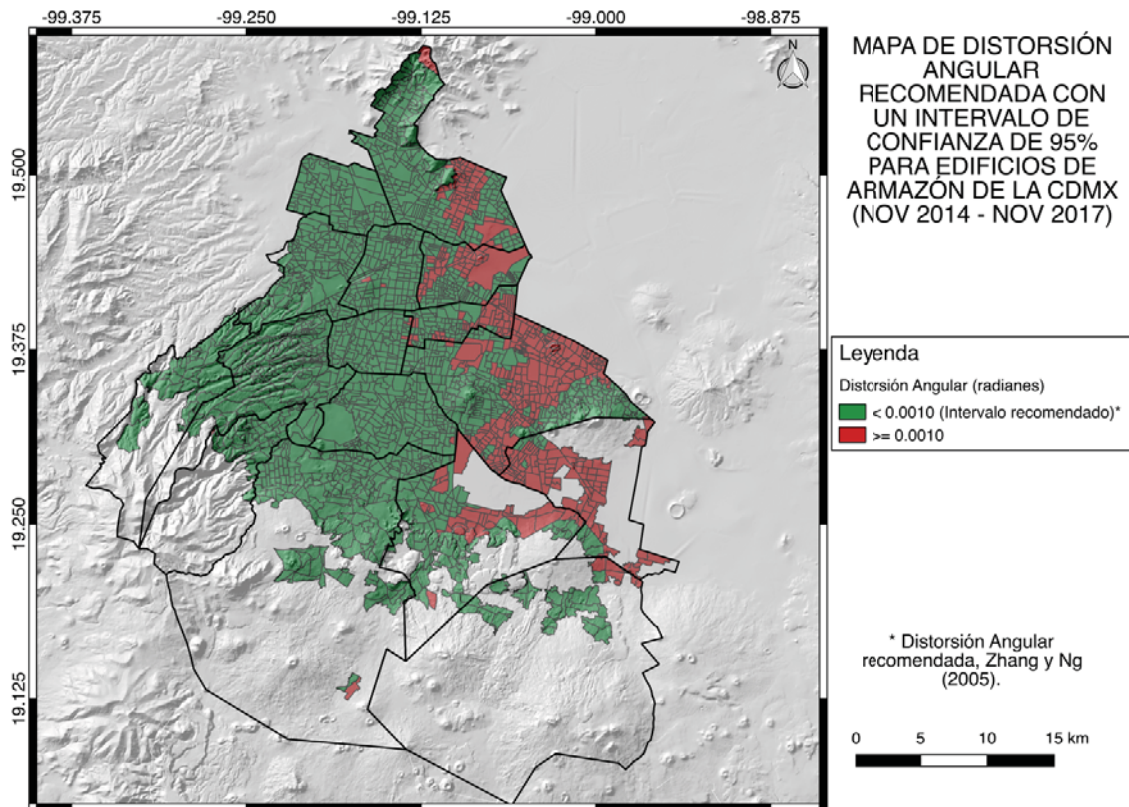


Figura 7.9. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Intervalo de Confianza de 95% para Edificios de Armazón.

Tabla 7.9. Conteos de áreas y población para Edificios de Armazón considerando un Intervalo de Confianza de 95%.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0010	630.12	79.84	6907782	78.41
>=0.0010	159.09	20.16	1902495	21.59
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

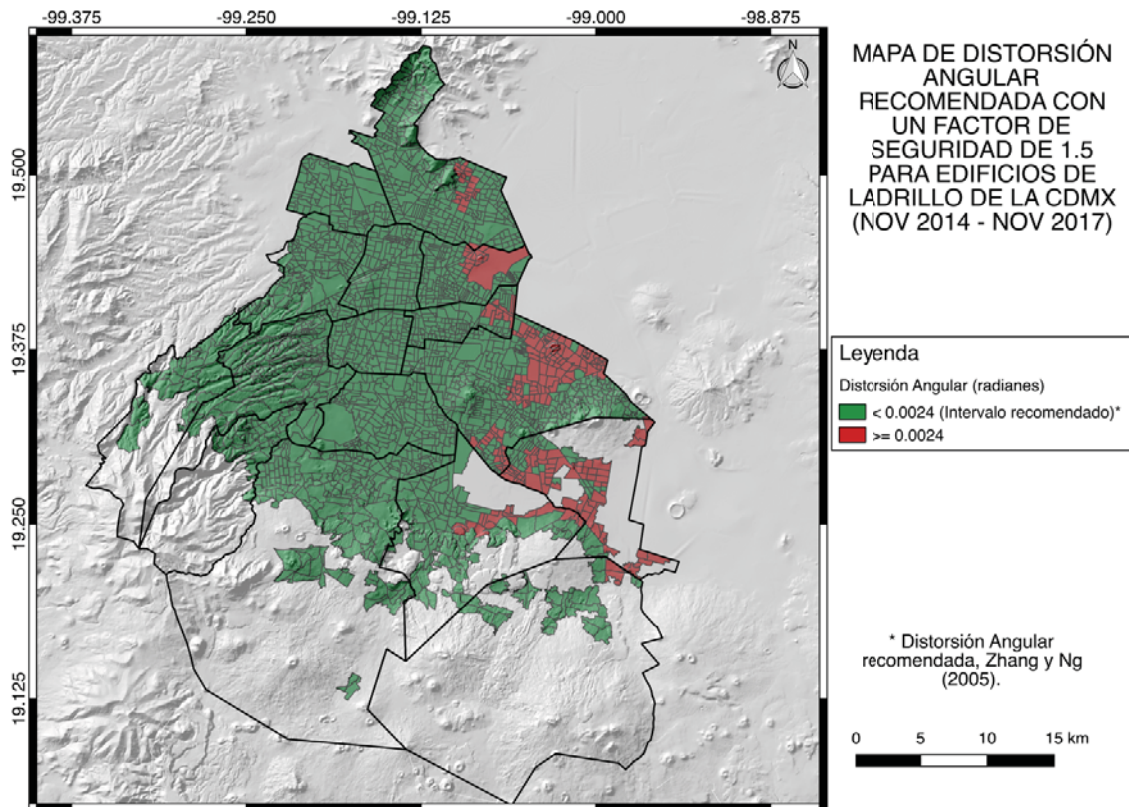


Figura 7.10. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Factor de Seguridad de 1.5 para Edificios de Ladrillo.

Tabla 7.10. C conteos de áreas y población para Edificios de Armazón considerando un Intervalo de Confianza de 95%.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0024	706.17	89.48	7884958	89.50
>= 0.0024	83.04	10.52	925319	10.50
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

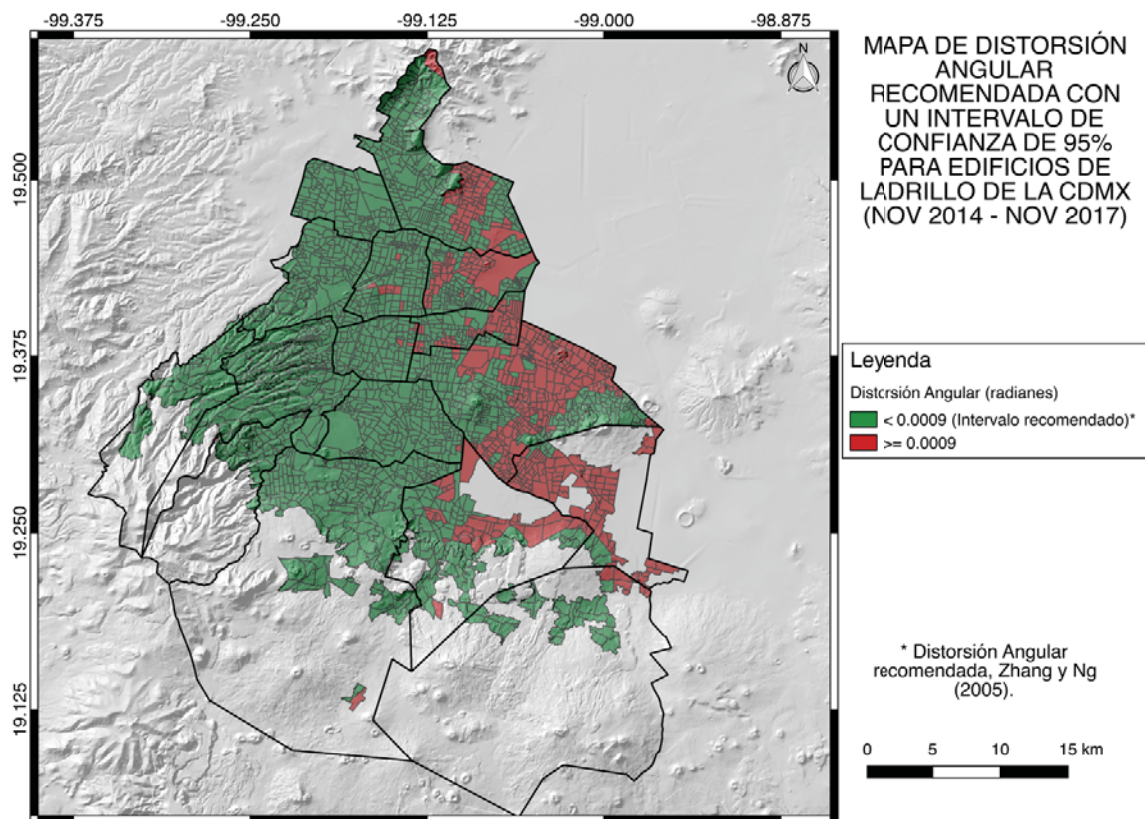


Figura 7.11. Mapa de Distorsión Angular recomendada considerando un Intervalo de Confianza de 95% para Edificios de Ladrillo.

Tabla 7. 11. Conteos de áreas y población para Edificios de Ladrillo considerando un Factor Intervalo de Confianza de 95%.

Distorsión Angular (radianes)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
< 0.0009	620.84	78.67	6744955	76.56
>= 0.0009	168.37	21.33	2065322	23.44
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

7.2.3. Mapas de escenarios de Distorsión Angular para la Ciudad de México

Para la elaboración de los mapas de escenarios a futuro se hace uso de la *calculadora ráster*, disponible en QGIS v 2.18 y se toma como insumo base el mapa de velocidad de subsidencia para la Ciudad de México, descrito en el Capítulo 3. Para la obtención del ráster de desplazamiento vertical se multiplica la velocidad por un tiempo definido. Para este caso se consideraron escenarios extrapolados a 3 años, 10 años, 20 años y 50 años como valores de tiempo y asumiendo que el proceso de subsidencia del terreno se comporta linealmente (Figura 3.3). Se utiliza el desplazamiento vertical admisible para una Cimentación Somera con un intervalo de confianza del 95 % (Tabla 7.2) como criterio para definir las zonas en las que las edificaciones serán o no afectadas por el proceso de subsidencia. Esto debido a que se considera que las estructuras civiles de cimentación somera son las de mayor presencia en la Ciudad de México. Adicionalmente, los valores obtenidos del intervalo de 95% se considera que son más confiables que los obtenidos con un factor de seguridad de 1.5 ya que provienen de un análisis estadístico robusto, además, que los valores característicos de

distorsión angular y desplazamiento vertical para cimentaciones someras obtenidos por Zhang y Ng, 2007, coinciden con los rangos sugeridos por el Euro código 1 (CEN, 2001).

A continuación, se procede a dividir el mapa de desplazamiento vertical de la Ciudad de México en dos intervalos de clase. El primer intervalo, se muestra en los mapas en color verde y corresponde a aquellas zonas de la ciudad cuyo desplazamiento vertical no excede los valores límite recomendados, es decir aquellas zonas que experimenta un desplazamiento vertical menor a 49 mm (Zhang y Ng, 2007). Por el contrario, el segundo intervalo, se muestra en el mapa en color rojo y corresponde a las zonas que exceden el valor recomendado mayor o igual a 49 mm (Zhang y Ng, 2007). (Figuras 7.12 - 7.19). Finalmente, se procede a calcular las áreas y población afectada por las dos categorías definidas y para los diferentes tiempos, utilizando el procedimiento descrito en el apartado 7.2.1 que describe lo referente al conteo de población y áreas afectadas para cada intervalo. (Tablas 7.12 - 7.19).

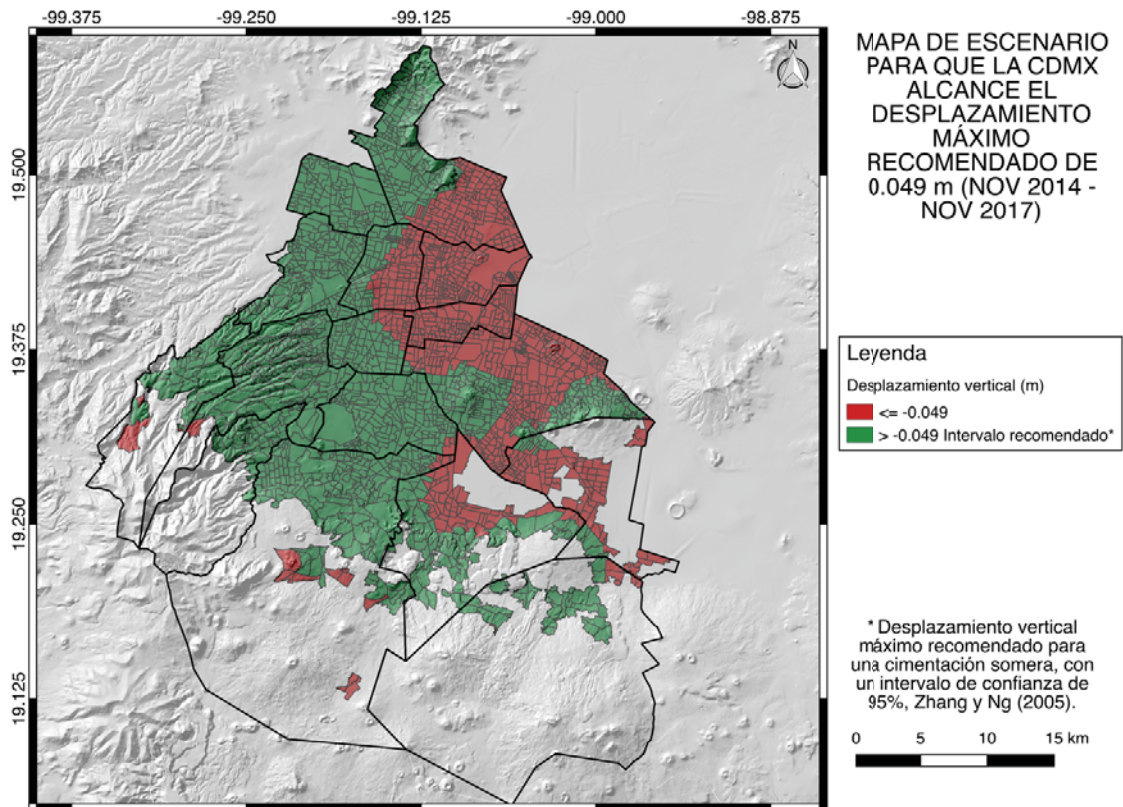


Figura 7.12. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 3 años (noviembre 2014 – noviembre 2017).

Tabla 7.12. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 3 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
<= -0.049	259.31	32.86	3452543	39.19
> -0.049	529.90	67.14	5357734	60.81
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

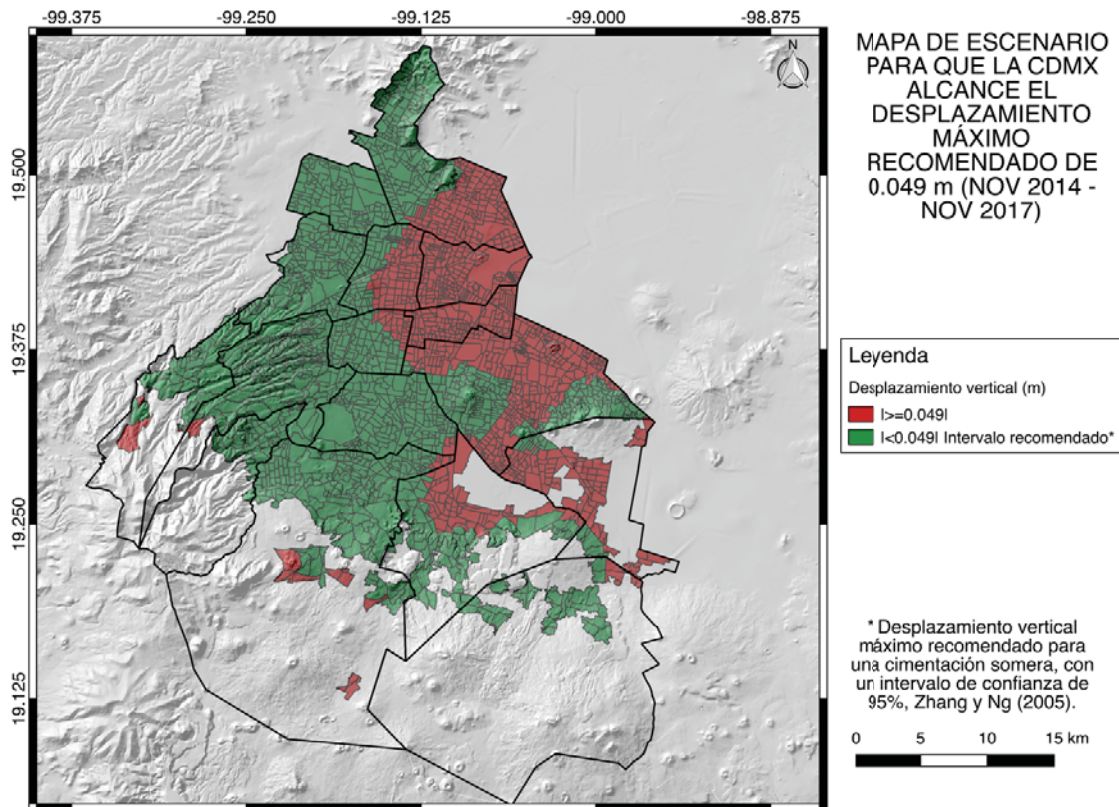


Figura 7.13. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 3 años (noviembre 2014 – noviembre 2017).

Tabla 7.13. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 3 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
>= 0.049	259.31	32.86	3452543	39.19
< 0.049	529.90	67.14	5357734	60.81
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

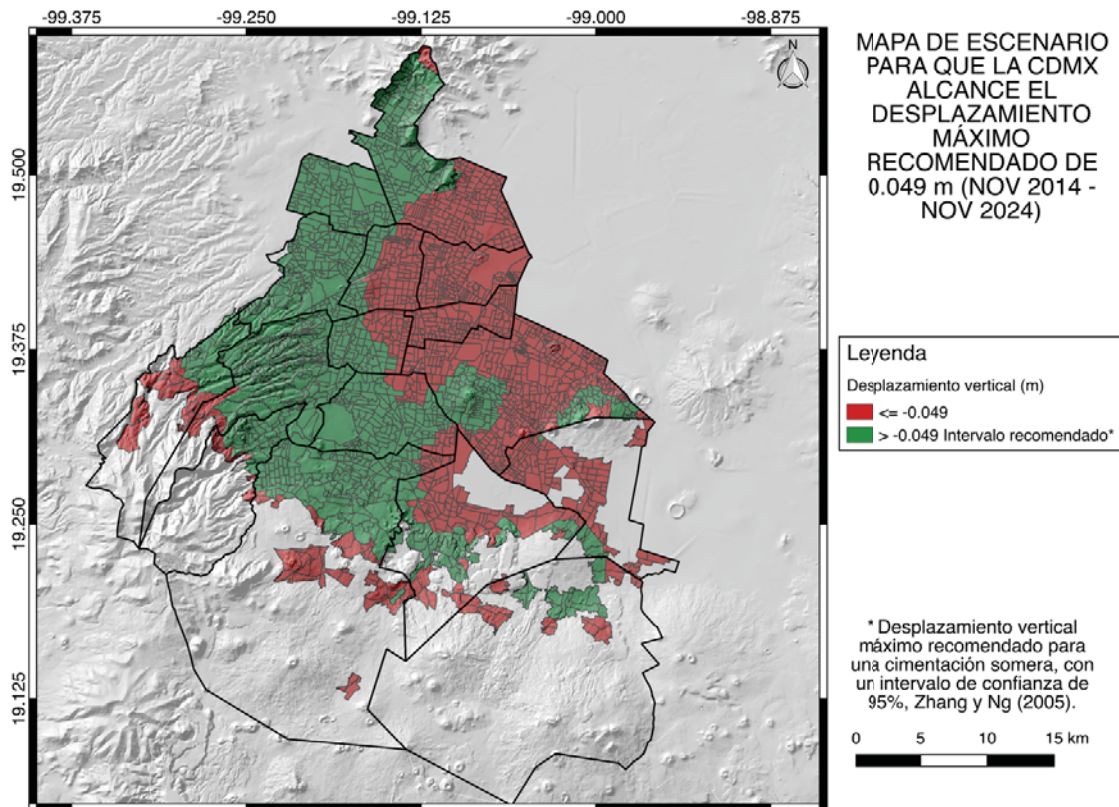


Figura 7.14. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 10 años (noviembre 2014 – noviembre 2024).

Tabla 7.14. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 10 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
<= -0.049	364.06	46.13	4386044	49.78
> -0.049	425.15	53.87	4424233	50.22
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

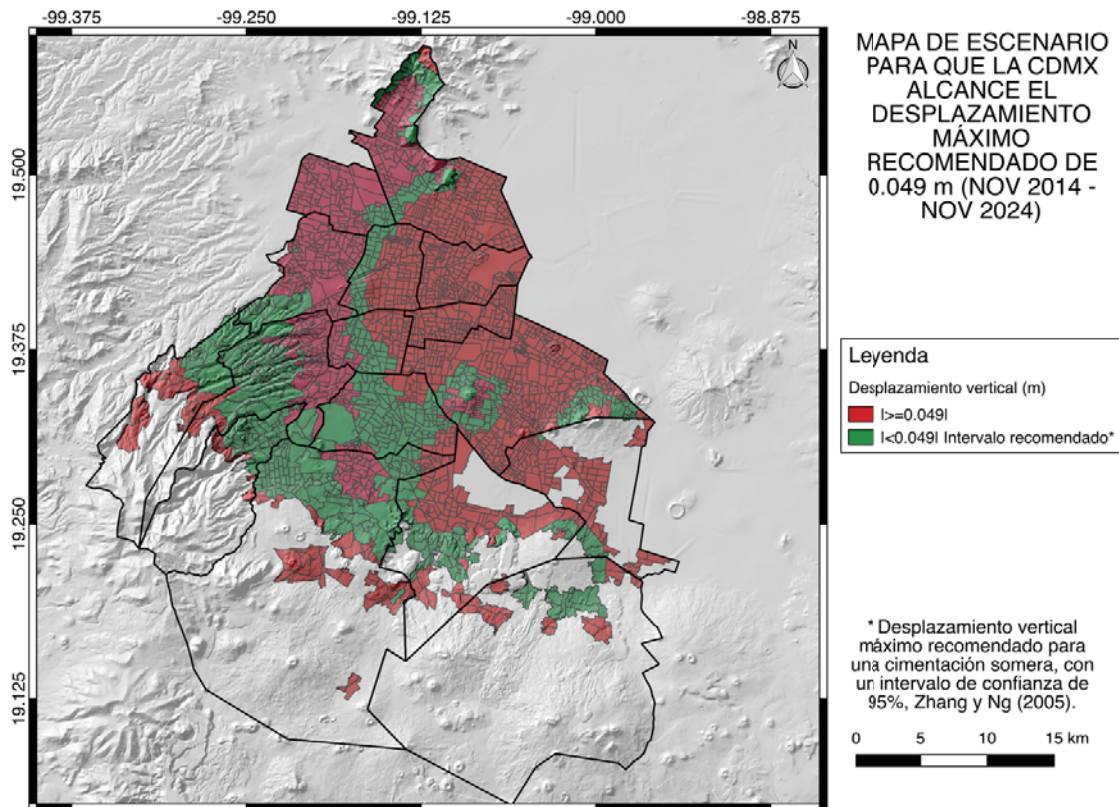


Figura 7.15. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 10 años (noviembre 2014 – noviembre 2024).

Tabla 7.15. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 10 años

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
>= 0.049	514.63	65.21	6273441	71.21
< 0.049	274.59	34.79	2536836	28.79
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

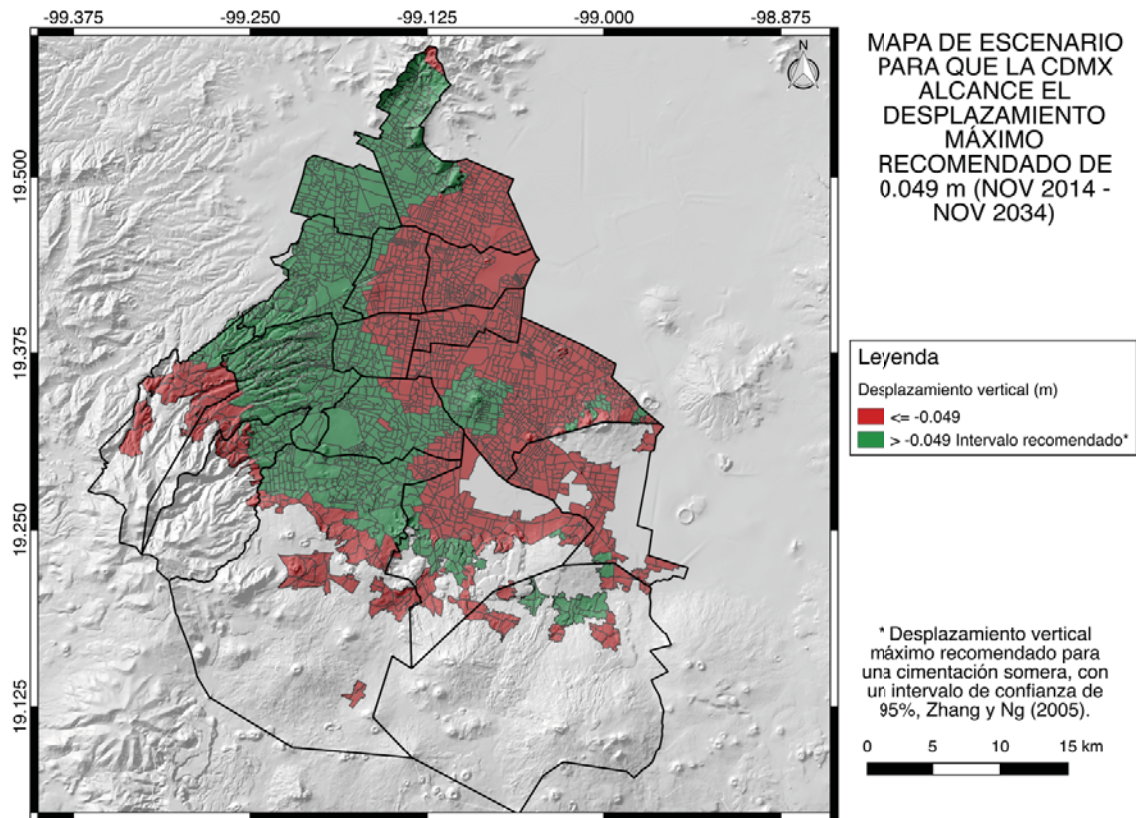


Figura 7. 16. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 20 años (noviembre 2014 – noviembre 2034).

Tabla 7.16. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 20 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
≤ -0.049	421.86	53.45	4979750	56.52
> -0.049	367.35	46.55	3830527	43.48
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

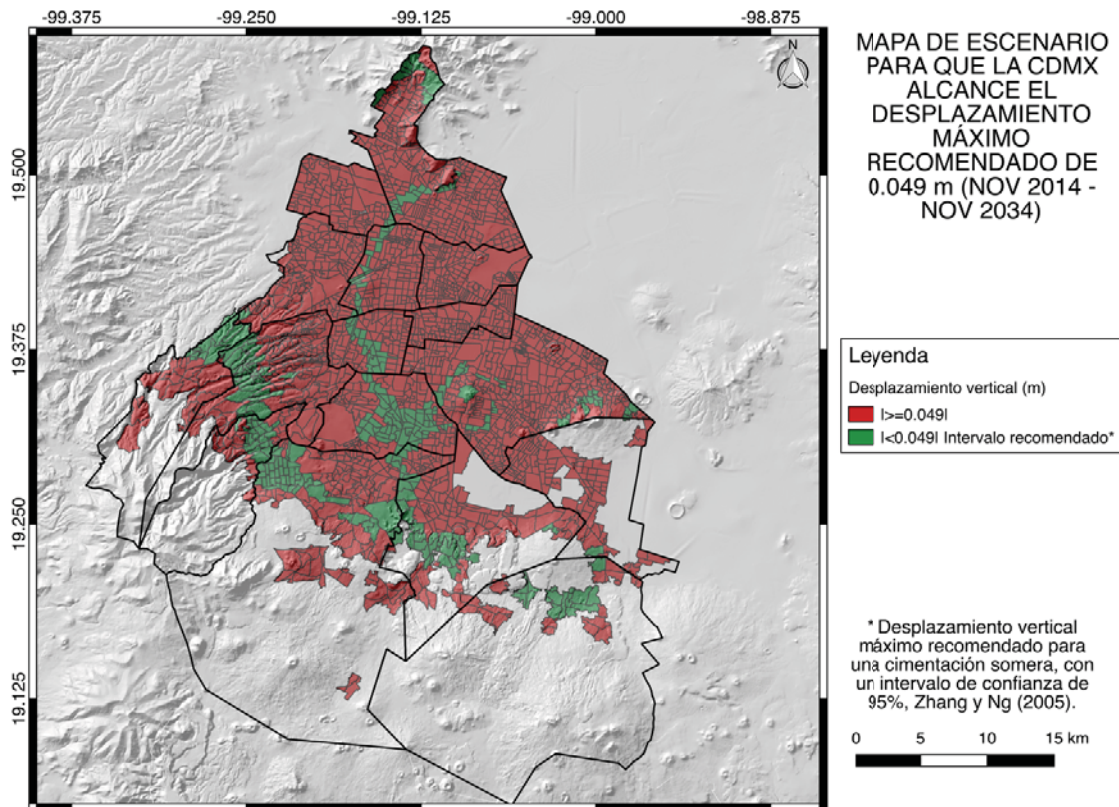


Figura 7.17. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 20 años (noviembre 2014 – noviembre 2034).

Tabla 7.17. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 20 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
>= 0.049	656.23	83.15	7559014	85.80
< 0.049	132.98	16.85	1251263	14.20
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

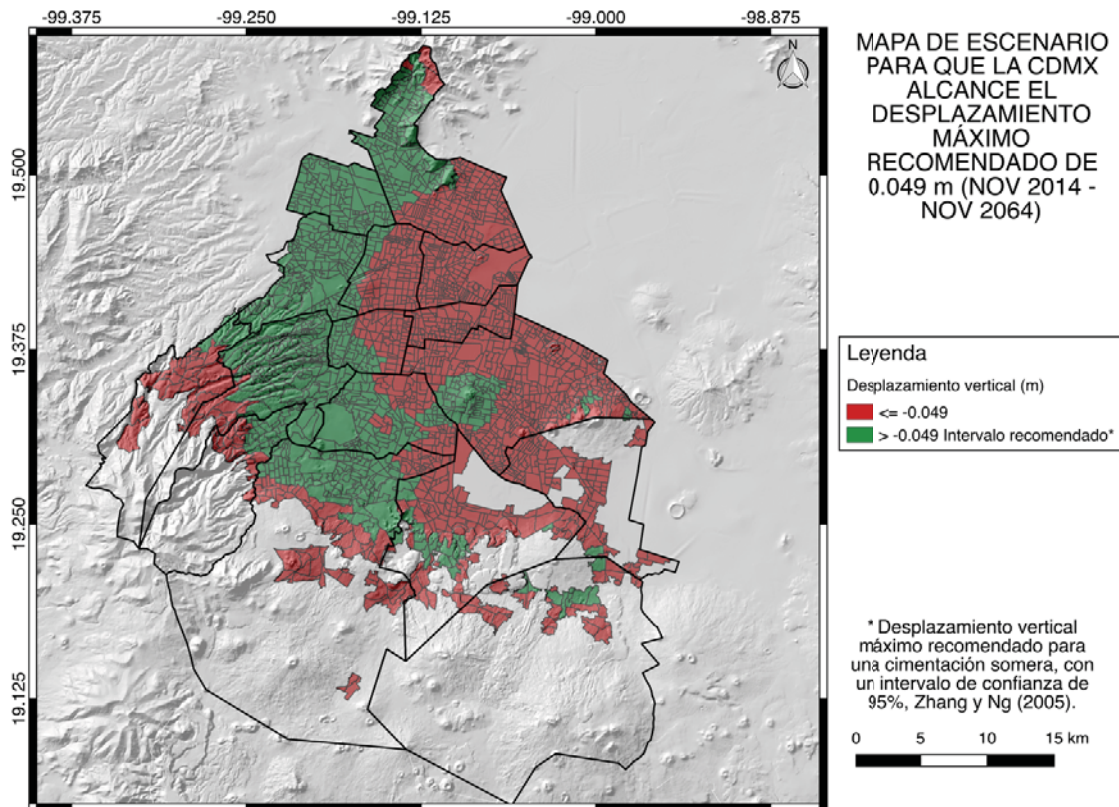


Figura 7.18. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 50 años (noviembre 2014 – noviembre 2064).

Tabla 7.18. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 50 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
<= -0.049	453.81	57.50	5298418	60.14
> -0.049	335.41	42.50	3511859	39.86
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

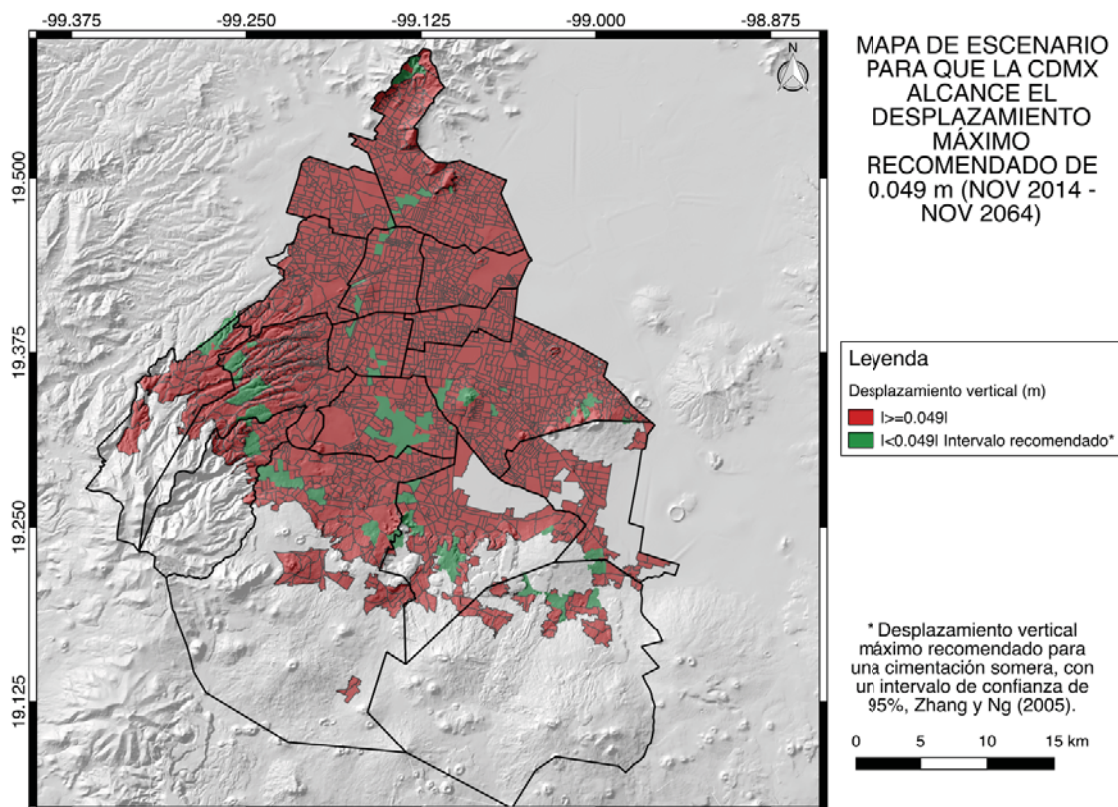


Figura 7.19. Mapa de escenario para que la CDMX alcance el desplazamiento vertical de 0.049 metros en un periodo de 50 años (noviembre 2014 – noviembre 2064).

Tabla 7.19. Conteo de áreas y población que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) de las zonas con desplazamiento vertical admisible (0.049 m) para un periodo de 50 años.

Desplazamiento Vertical (m)	Área (Km2)	Área (%)	Población	Población (%)
>= 0.049	730.71	92.59	8285271	94.04
< 0.049	58.50	7.41	525006	5.96
Totales	789.21	100.00	8810277	100.00

7.2.4. Mapas de Distorsión Angular para las estructuras vitales de la Ciudad de México

La elaboración de los mapas de distorsión angular para las estructuras vitales de la Ciudad de México, se inicia con la búsqueda y descarga de la ubicación de las escuelas públicas de nivel básico, medio superior y superior, hospitales públicos, mercados públicos, radioemisoras y estaciones de gasolina, así como la ubicación de los tramos de los ductos de PEMEX ubicados en la zona urbana de la ciudad. Esta información proviene del portal de datos abiertos del Gobierno Mexicano, del proyecto DRASTIC-Sg (Hernández- Espriú et al., 2014) y del Proyecto de Atlas de Riesgo de la CDMX, (Novelo-Casanova, 2019, comunicación personal). Seguidamente se despliegan los puntos y/o polígonos que contienen la información en QGIS v. 2.18 para luego guardarlo como formato *shapefile* (.shp).

Posteriormente, se procede a asignarle el valor de distorsión angular a cada uno de los puntos y/o polilíneas que contienen la información de la infraestructura vital. Para ello es necesario

abrir el ráster de distorsión angular para la Ciudad de México en QGIS v 2.18 (Figura 7.2) y usar la herramienta *add raster value to feature*, seguidamente se procede a exportar la tabla de atributos en formato de *Valores Separados por Comas (.CVS)* para luego calcular el número de puntos y/o longitudes que se encuentran por dentro o fuera del intervalo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) Los resultados de este ejercicio se muestran en la Figuras 7.20 – 7.27 y Tablas 7.20 – 7.27.

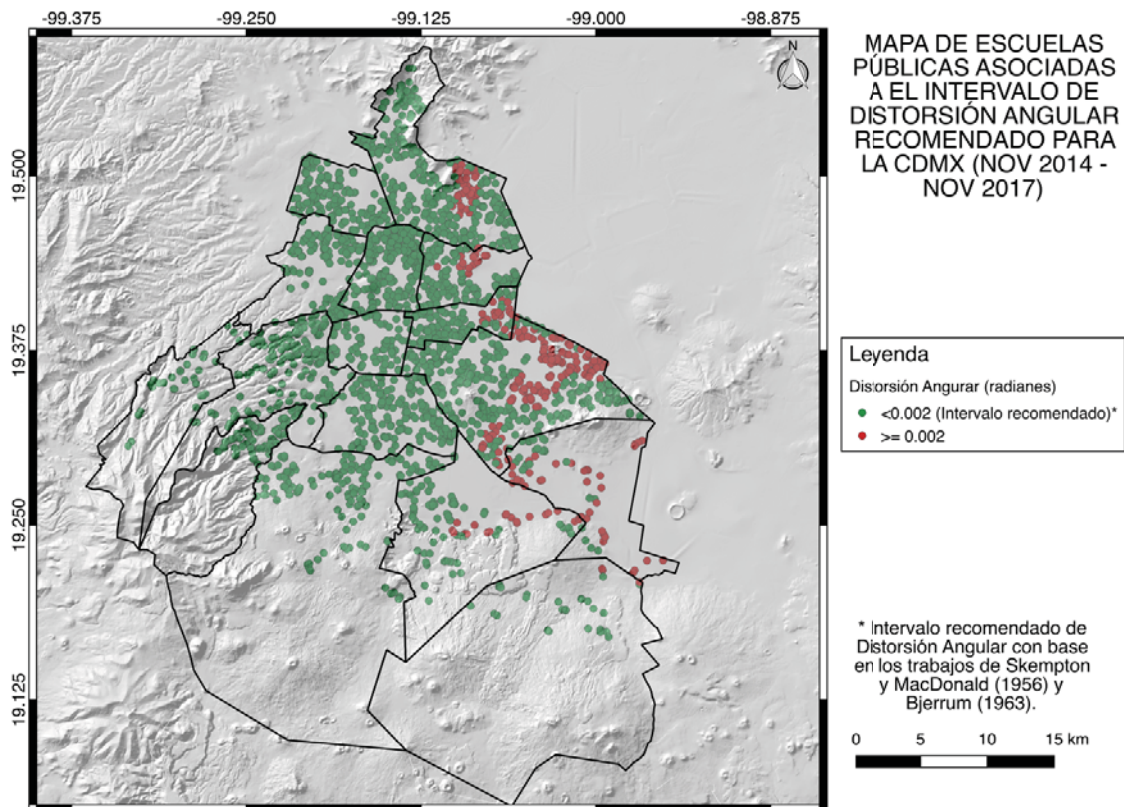


Figura 7.20. Mapa de Escuelas Públicas asociadas con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (círculos de color verde) y fuera (círculos de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.20. Número de Escuelas Públicas que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Escuelas	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	2144	87.94
≥0.002	294	12.06
Totales	2438	100.00

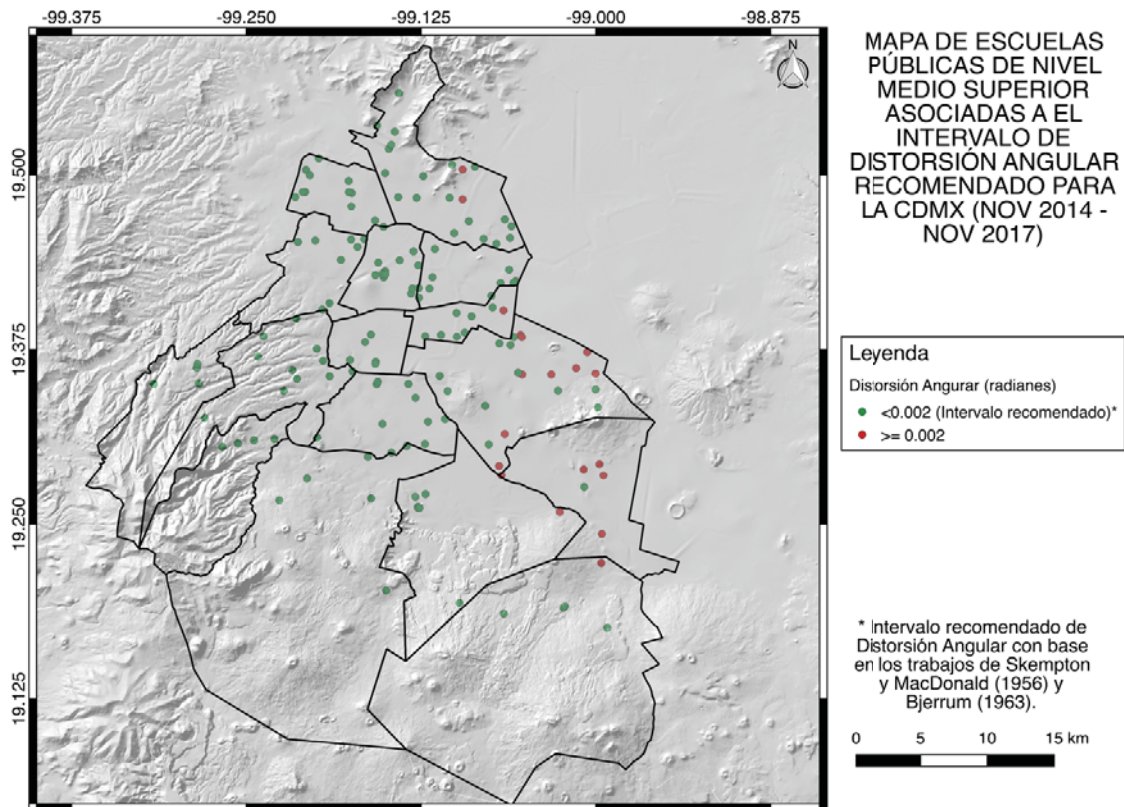


Figura 7.21. Mapa de Escuelas Públicas de Nivel Medio Superior asociadas con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (círculos de color verde) y fuera (círculos de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.21. Número de Escuelas Públicas de Nivel Medio Superior que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Escuelas	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	129	87.16
>=0.002	19	12.84
Totales	148	100.00

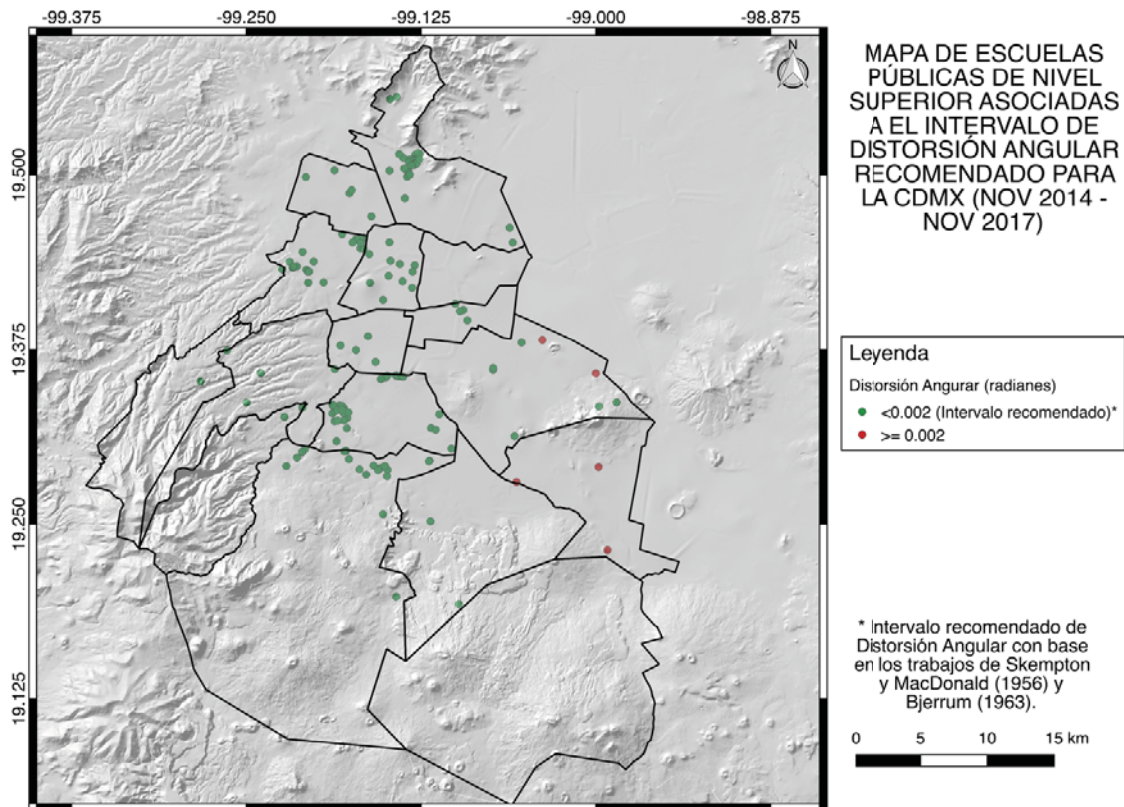


Figura 7.22. Mapa de Escuelas Públicas de Nivel Superior asociadas con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (círculos de color verde) y fuera (círculos de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.22. Número de Escuelas Públicas de Nivel Superior que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Escuelas	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	149	96.75
≥0.002	5	3.25
Totales	154	100.00

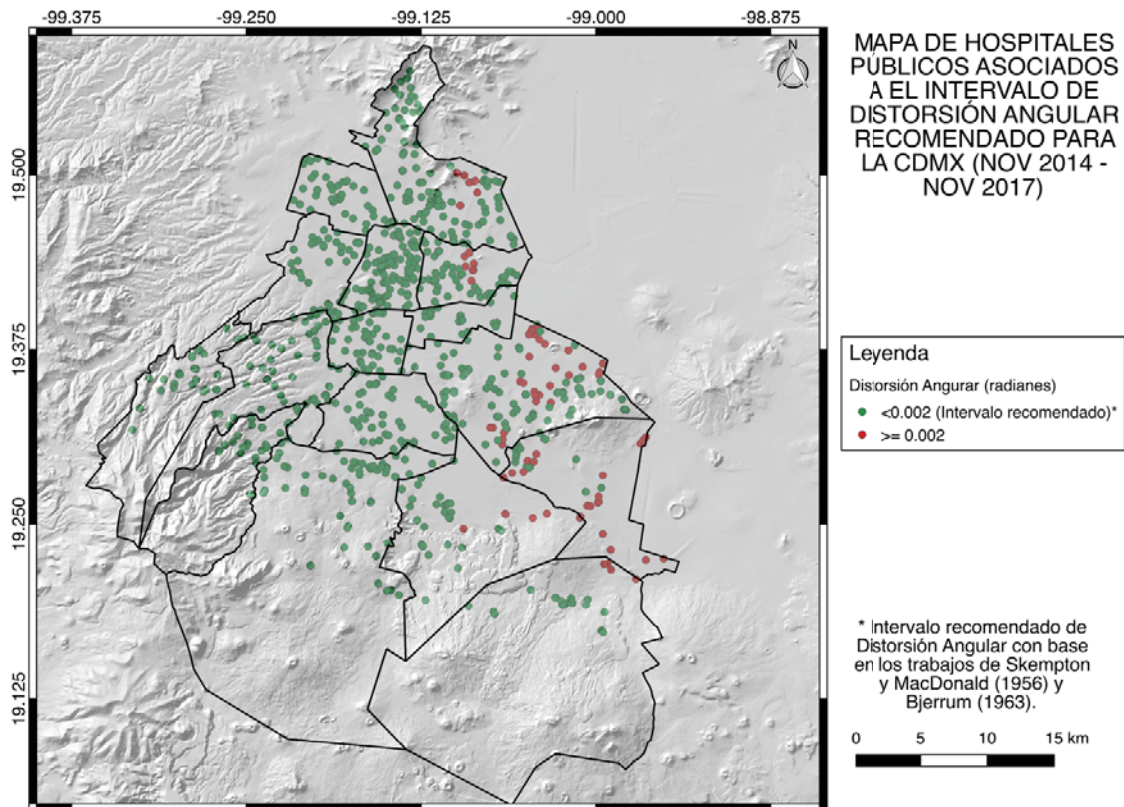


Figura 7.23. Mapa de Hospitales Públicos asociados con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (círculos de color verde) y fuera (círculos de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonal, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.23. Número de Hospitales Públicos que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonal, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Hospitales	Porcentaje (%)
<math><0.002</math> (intervalo recomendado)	1305	93.88
>=0.002	85	6.12
Totales	1390	100.00

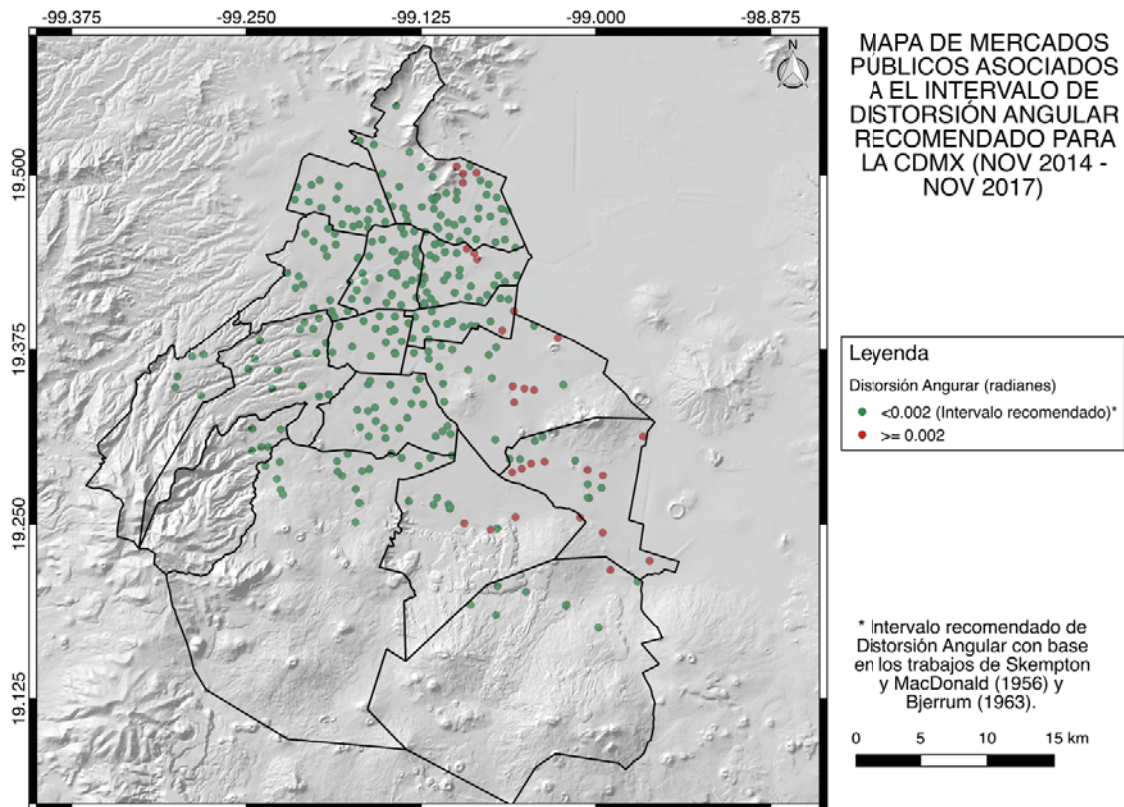


Figura 7.24. Mapa de Mercados Públicos asociados con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (círculo de color verde) y fuera (círculos de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.24. Número de Mercados Públicos que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Mercados	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	300	91.19
>=0.002	29	8.81
Totales	329	100.00

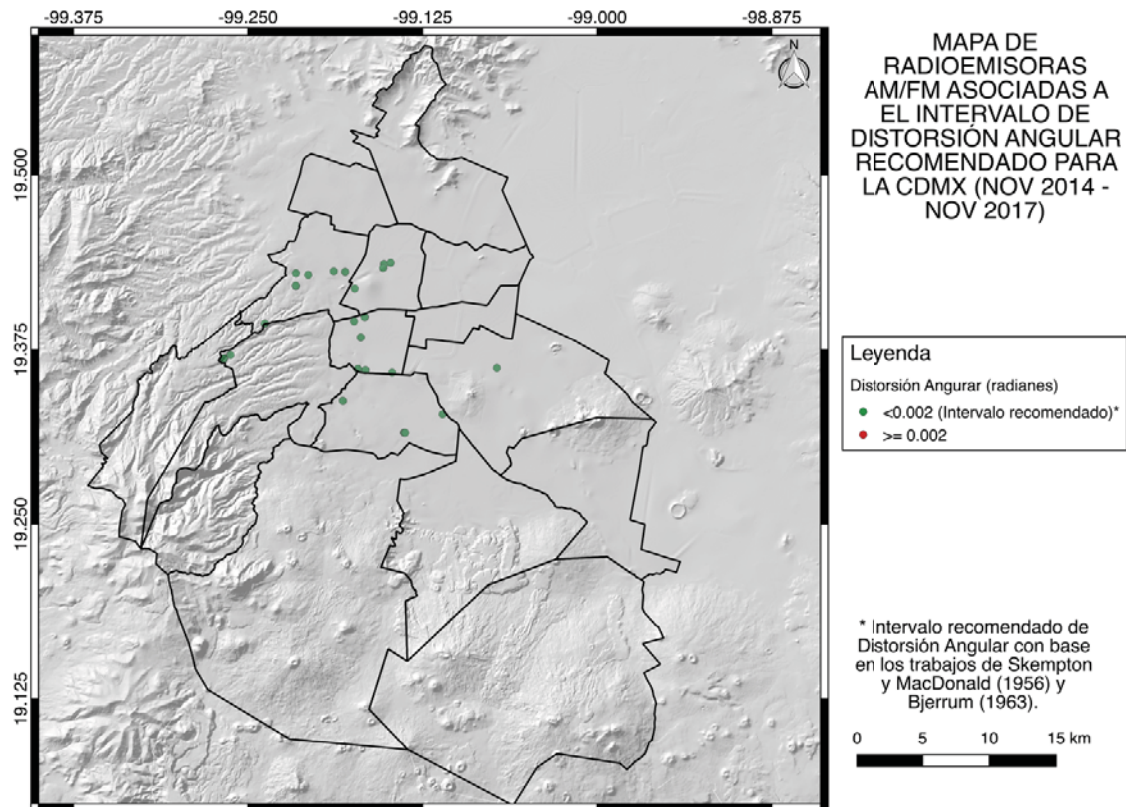


Figura 7.25. Mapa de Radioemisoras AM/FM asociadas con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (circulo de color verde) y fuera (circulo de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.25. Número de Radioemisoras AM/FM que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Radioemisoras	Porcentaje (%)
<math>< 0.002</math> (intervalo recomendado)	60	100.00
>=0.002	0	0.00
Totales	60	100.00

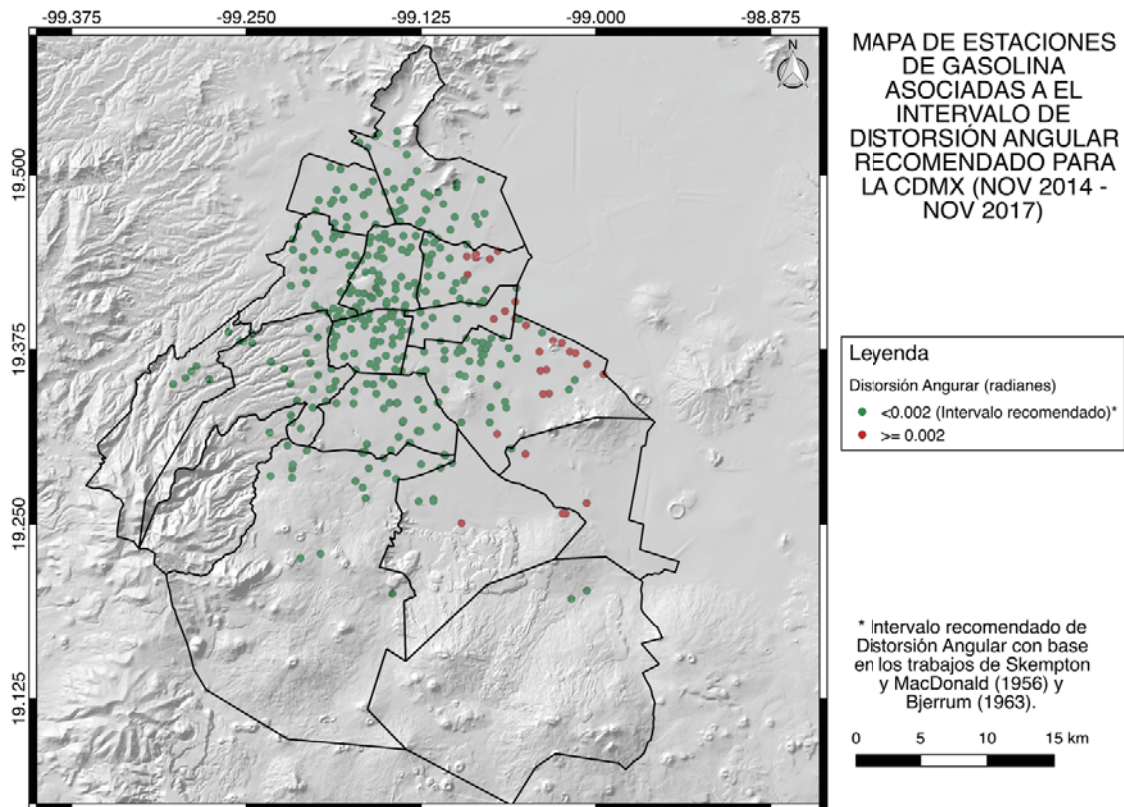


Figura 7.26. Mapa de Estaciones de Gasolina asociadas con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (circulo de color verde) y fuera (circulo de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.26. Número de Estaciones de Gasolina que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Estaciones	Porcentaje (%)
<math><0.002</math> (intervalo recomendado)	334	92.01
>=0.002	29	7.99
Totales	363	100.00

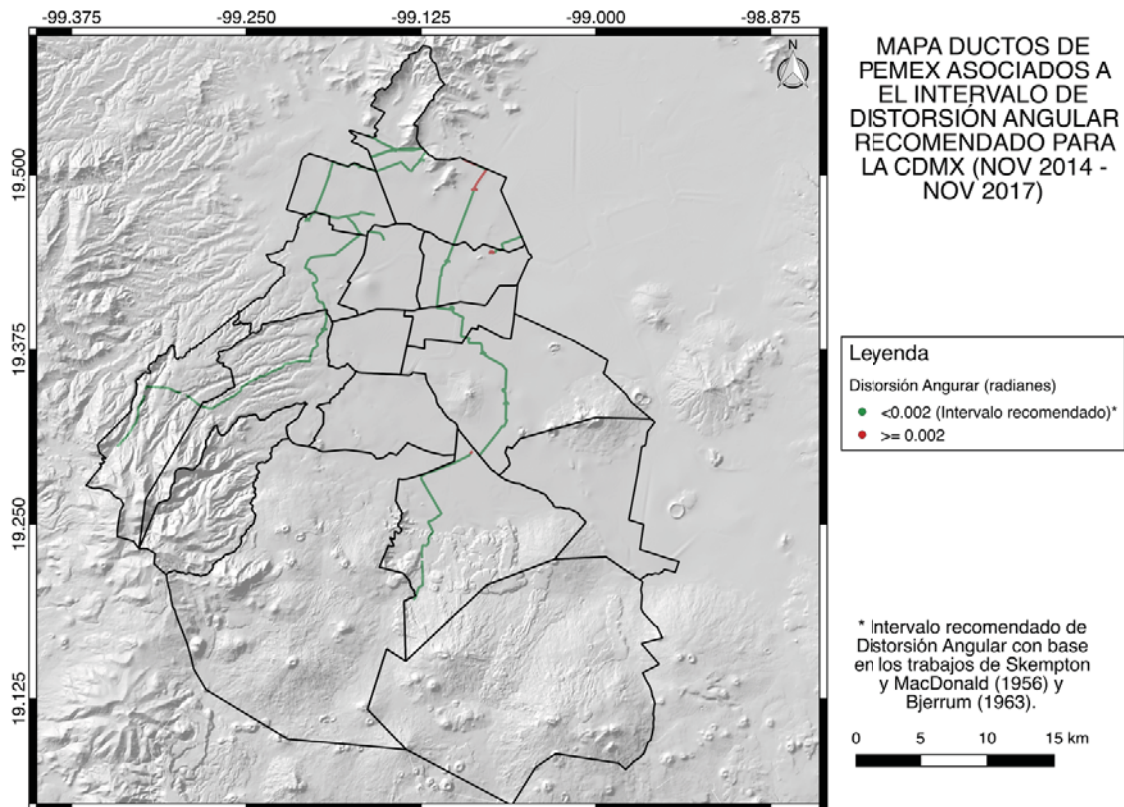


Figura 7.27. Mapa de Ductos de PEMEX asociados con los intervalos de Distorsión Angular que se encuentran dentro (líneas de color verde) y fuera (líneas de color rojo) de lo recomendado (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) para la zona urbana de la Ciudad de México.

Tabla 7.27. Longitud de Ducto de PEMEX que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Longitud acumulada (km)	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	121.38	97.42
>=0.002	3.21	2.58
Totales	124.59	100.00

7.2.5. Mapas de correspondencia entre las edificaciones dañadas durante el sismo del 19 de septiembre y los valores de distorsión angular de la Ciudad de México.

Para la elaboración de estos mapas se digitalizó cada una de las edificaciones dañadas respetando la categoría de daño. Para ello se usan los datos del visualizador de inmuebles con daños en México (ERN, 2018), seguidamente se procede a asignar el valor correspondiente de distorsión angular a cada una de las edificaciones afectadas, para luego calcular la proporción de edificaciones que entran en el intervalo de distorsión angular recomendado, así como, las que no entran en el mismo (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 7.2.3, que describe como asignar los valores del ráster de distorsión angular a los puntos digitalizados y el cálculo de la proporción de cada intervalo (Figuras 7.28 – 7.32; Tablas 7.28 -7.32).

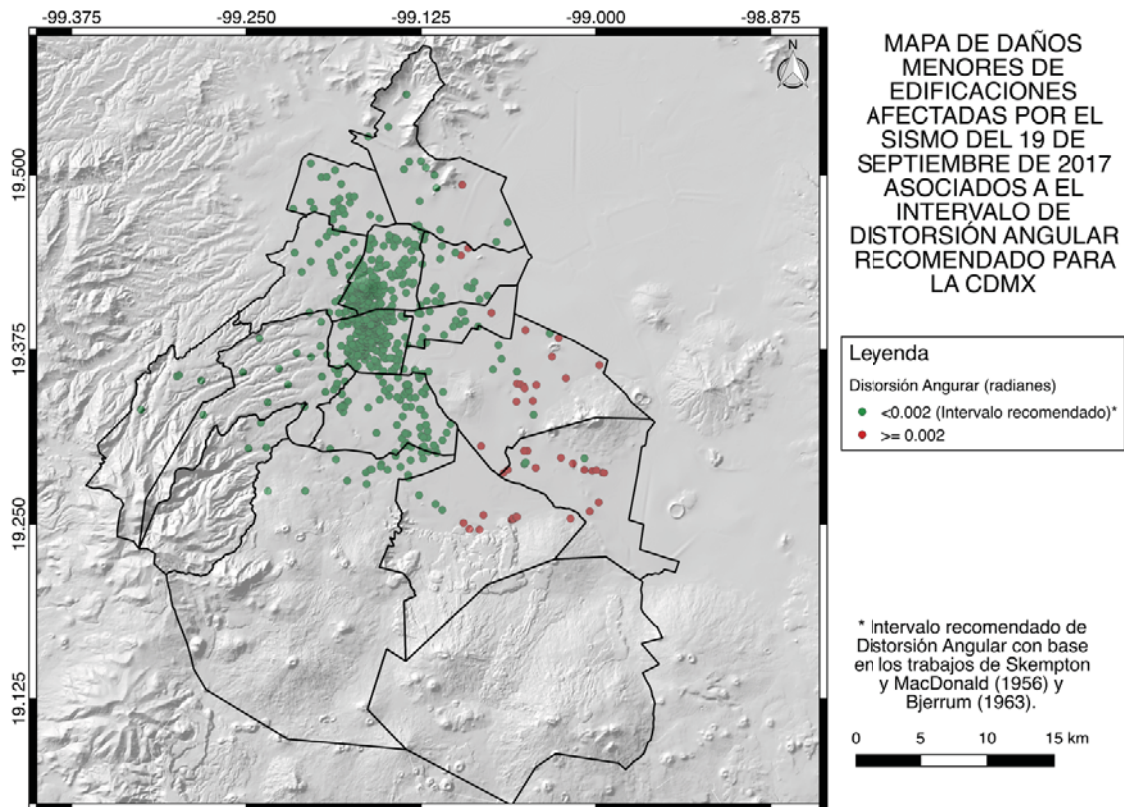


Figura 7.28. Mapa de Daños Menores de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 7.28. Número de Edificaciones que presentaron Daños Menores debido a el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Edificaciones	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	731	94.20
≥0.002	45	5.80
Totales	776	100.00

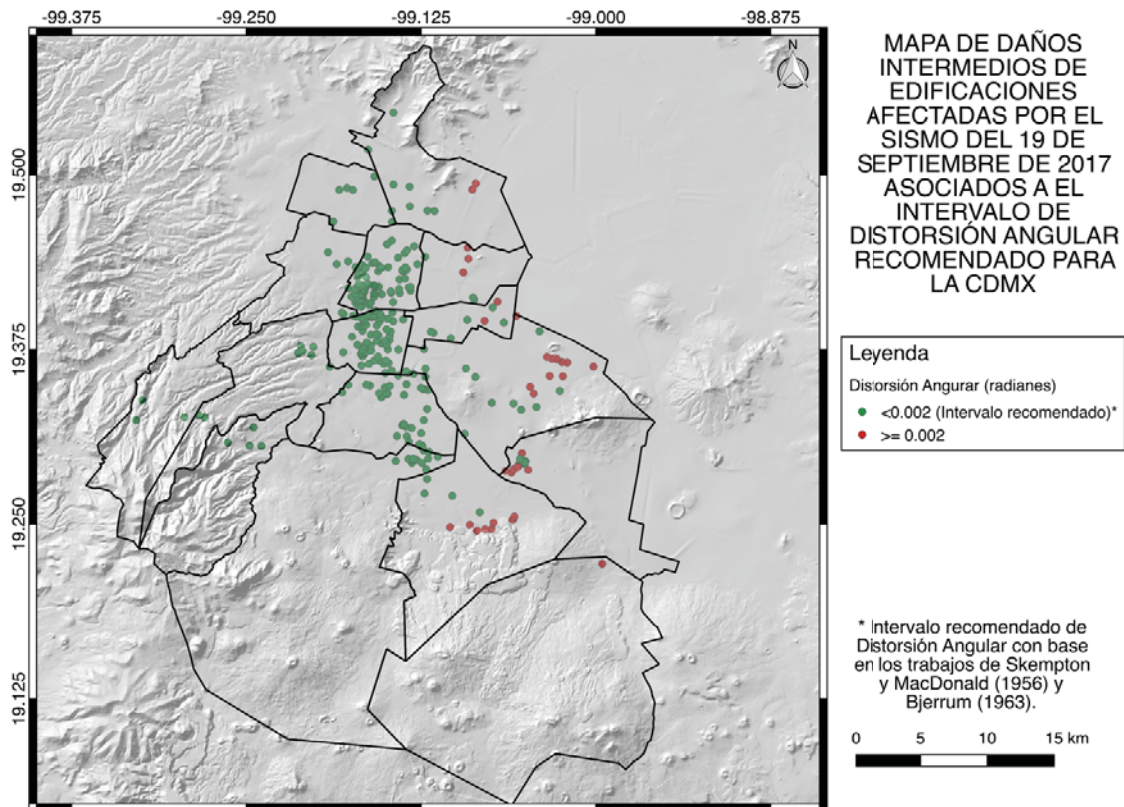


Figura 7.29. Mapa de Daños Intermedios de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 7.29. Número de Edificaciones que presentaron Daños Intermedios debido a el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Edificaciones	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	265	88.04
≥0.002	36	11.96
Totales	301	100.00

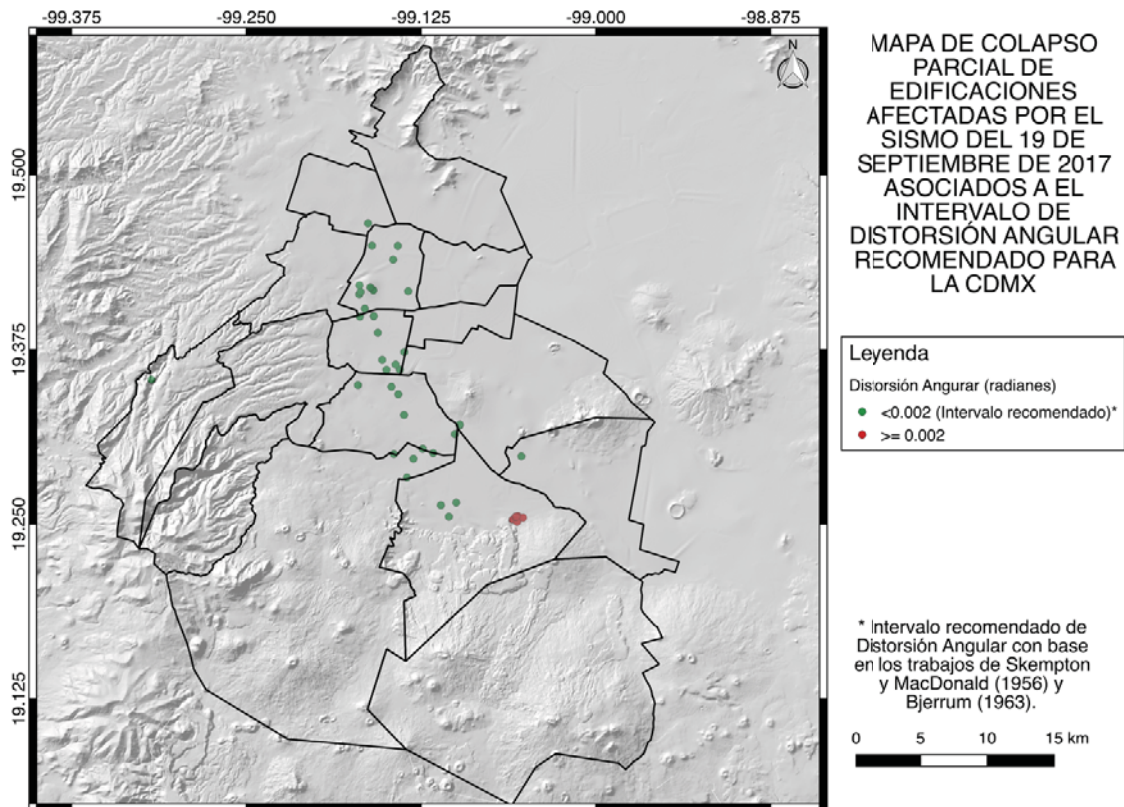


Figura 7.30. Mapa de Colapso Parcial de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 7.30. Número de Edificaciones que presentaron Colapso Parcial debido a el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Edificaciones	Porcentaje (%)
<0.002 (intervalo recomendado)	39	84.78
≥0.002	7	15.22
Totales	46	100.00

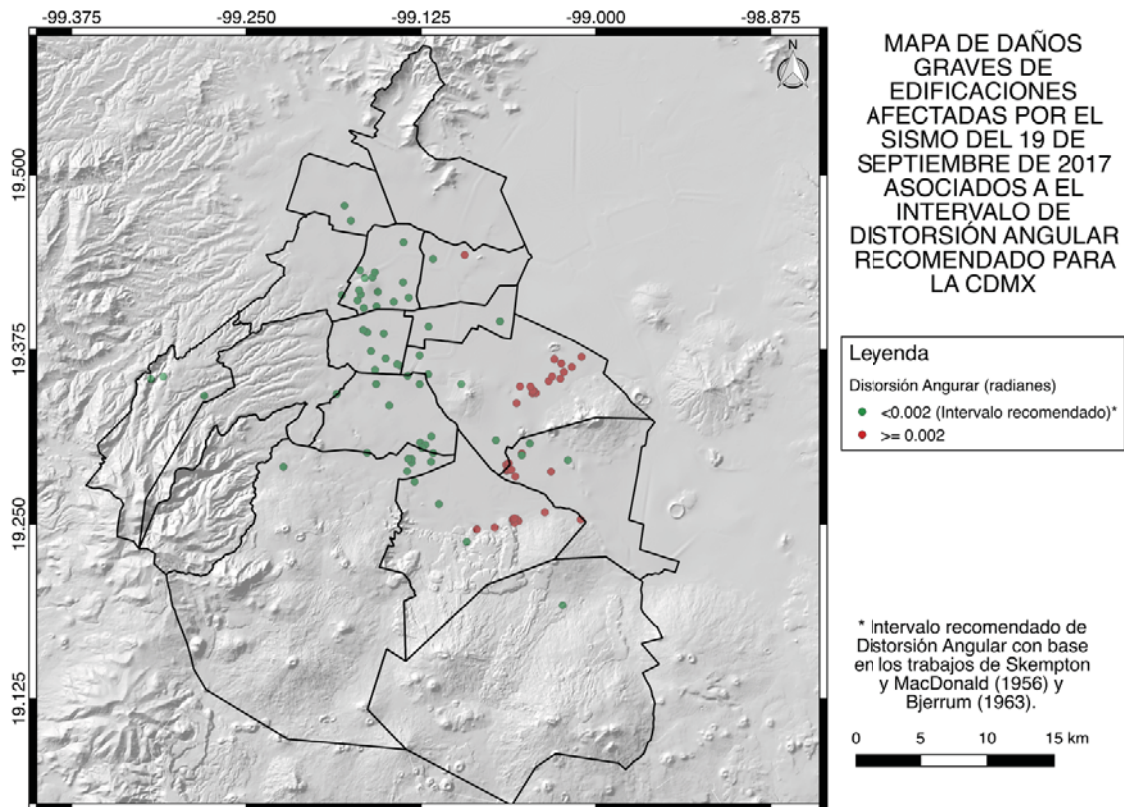


Figura 7.31. Mapa de Daños Graves de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 7.31. Número de Edificaciones que presentaron Daños Graves debido a el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Edificaciones	Porcentaje (%)
<math><0.002</math> (intervalo recomendado)	61	61.62
>=0.002	38	38.38
Totales	99	100.00

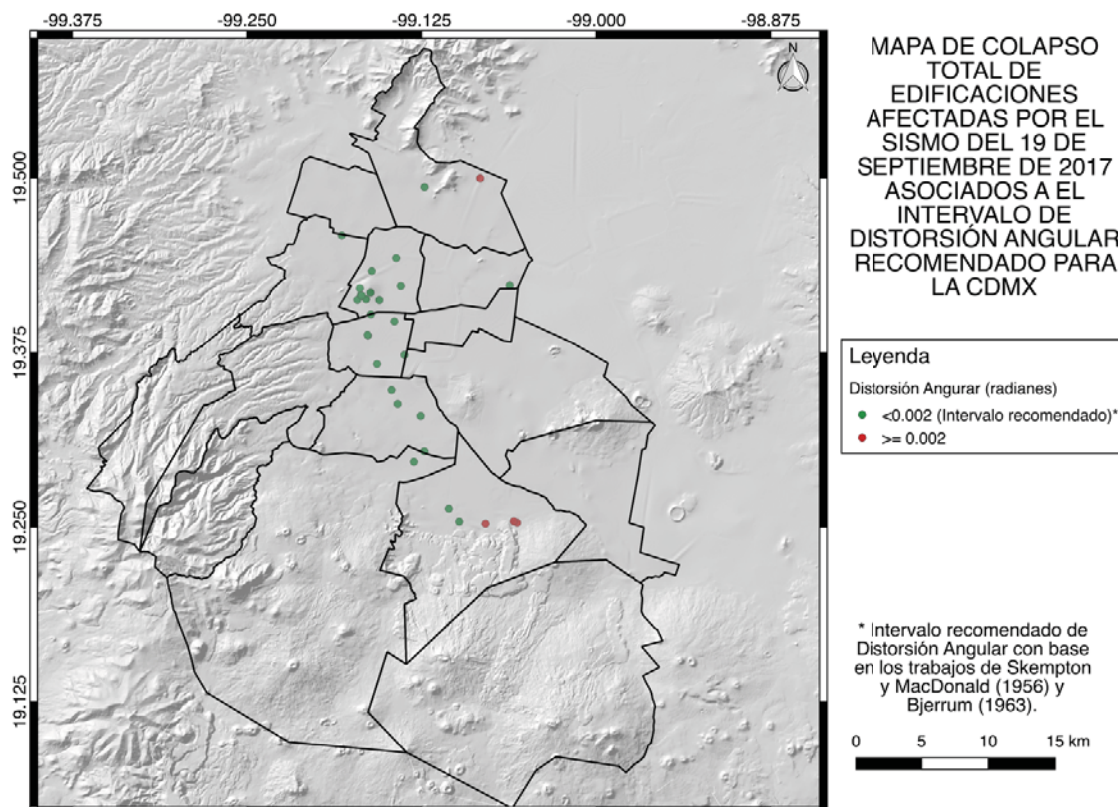


Figura 7.32. Mapa de Colapso Total de edificaciones afectadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017.

Tabla 7.32. Número de Edificaciones que presentaron Colapso Total debido a el sismo del 19 de septiembre de 2017 y que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular para la zona urbana de la Ciudad de México (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963).

Distorsión Angular (radianes)	Número de Edificaciones	Porcentaje (%)
<math><0.002</math> (intervalo recomendado)	27	87.10
≥ 0.002	4	12.90
Totales	31	100.00

7.3. Resultados y discusión

El análisis del mapa de distorsión angular para edificaciones indica que hacia el oriente de la ciudad se encuentran las áreas que poseen una distorsión angular por encima del intervalo recomendado de 0.002 radianes (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963; Wahls, 1981), afectando 12% del área urbana de la ciudad y el 13% de su población (Figura 7.33). Es importante destacar que, aunque la zona dañada por distorsión angular no es tan extensa en términos de superficie (97.49 km²), la misma producirá que más de un millón de habitantes sufran las consecuencias de la formación de fracturas o daños significativos en sus edificaciones. Esta situación es producto de que hacia esta zona de la ciudad se encuentran las alcaldías que poseen las mayores densidades poblaciones (Capítulo 4).

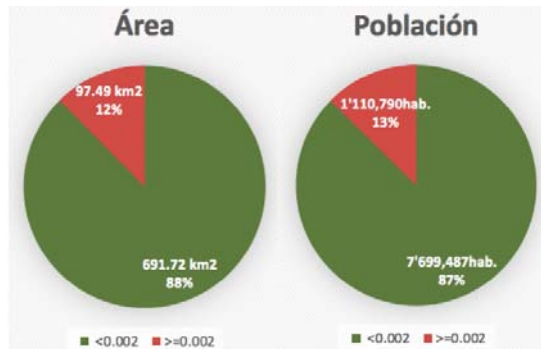


Figura 7.33. Conteos de áreas y población de las zonas de la Ciudad de México que se encuentran dentro (color verde) y fuera (color rojo) del intervalo de distorsión angular recomendado.

Para el caso del comportamiento de las cimentaciones someras, profundas, edificios de armazón o de ladrillos, se puede señalar que los tipos de edificaciones en las que fueron considerados un intervalo de confianza de 95% afectan más en área y población que aquellas donde se consideró el factor de seguridad de 1.5. Esto equivale a una diferencia promedio de 14.64% en área y 16.65% entre estos dos criterios (Figuras 7.34 y Tabla 7.33), lo que equivale a una diferencia de 115.53 km² y 1'467,646 habitantes entre estos (Figuras 7.35 y Tabla 7.34). La razón de este hecho es que los valores admisibles para edificaciones con un intervalo de confianza de 95% son menos permisivos que aquellos en los que se considera el factor de seguridad de 1.5, ya que los primeros provienen de un modelo más robusto y restrictivo que los derivados de un factor de seguridad de 1.5 (Zhang y Ng, 2007). Con base en los resultados obtenidos (Figuras 7.34 – 7.35 y Tablas 7.33 – 7.34) las edificaciones menos recomendadas para la ciudad, son aquellas que poseen cimentaciones profundas. Esto debido a que si se toma en cuenta los valores de límites de distorsión angular registrados para el período noviembre 2014 – noviembre 2017, las áreas y población afectadas en la zona urbana de la Ciudad de México para este tipo de cimentaciones serían 41% y 43% respectivamente, esto si se considera un intervalo de confianza de 95%. Por lo que se recomienda ser muy cuidadoso en las consideraciones que se deben tomar si se decide construir con este tipo de cimentaciones.

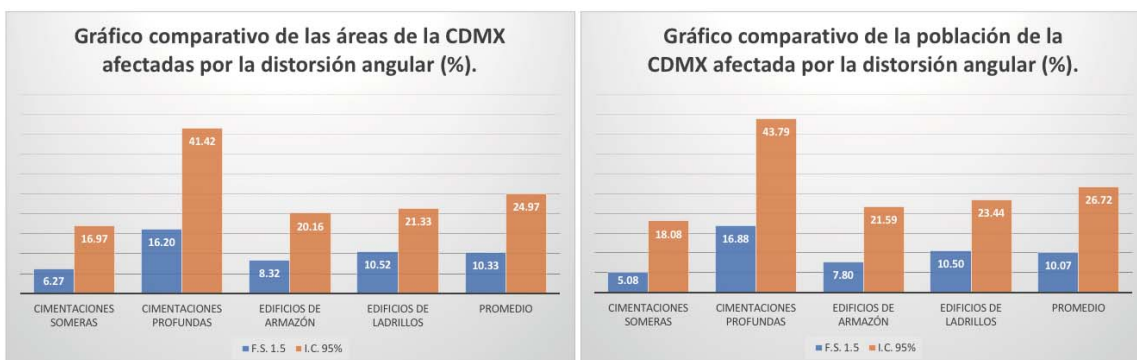


Figura 7. 34. Gráficos comparativos de las áreas y población en porcentaje que se encuentran afectadas por la distorsión angular para los diferentes tipos de edificaciones consideradas en este estudio. Considerando un Factor de Seguridad de 1.5 (F.S. 1.5) y un Intervalo de Confianza de 95% (I.C. 95%) para la Ciudad de México.

Tabla 7.33. Conteos y promedio de áreas y población en porcentaje que se encuentra afectadas por la distorsión angular asumiendo diferentes tipos de edificaciones consideradas en este estudio, y considerando un Factor de Seguridad de 1.5 (F.S. 1.5) y un Intervalo de Confianza de 95 % (I.C. 95%) para la Ciudad de México.

Área	F.S. 1.5	I.C. 95%	Población	F.S. 1.5	I.C. 95%
Cimentaciones Someras	6.27	16.97	Cimentaciones Someras	5.08	18.08
Cimentaciones Profundas	16.20	41.42	Cimentaciones Profundas	16.88	43.79
Edificios de Armazón	8.32	20.16	Edificios de Armazón	7.80	21.59
Edificios de Ladrillos	10.52	21.33	Edificios de Ladrillos	10.50	23.44
Promedio	10.33	24.97	Promedio	10.07	26.72

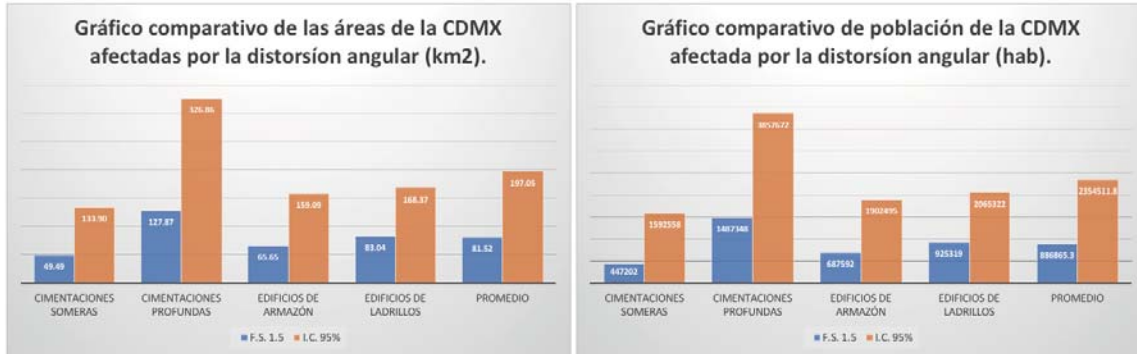


Figura 7. 35. Gráficos comparativos de las áreas y población que se encuentran afectadas por la distorsión angular asumiendo diferentes tipos de edificaciones consideradas en este estudio y considerando un Factor de Seguridad de 1.5 (F.S. 1.5) y un Intervalo de Con Confianza de 95 % (I.C. 95%) para la Ciudad de México.

Tabla 7.34. Conteos y promedio de áreas y población que se encuentra afectados por la distorsión angular para los diferentes tipos de edificaciones consideradas en este estudio. Considerando un Factor de Seguridad de 1.5 (F.S. 1.5) y un Intervalo de Confianza de 95 % (I.C. 95%) para la Ciudad de México.

Área	F.S. 1.5	I.C. 95%	Población	F.S. 1.5	I.C. 95%
Cimentaciones Someras	49.49	133.90	Cimentaciones Someras	447202	1592558
Cimentaciones Profundas	127.87	326.86	Cimentaciones Profundas	1487348	3857672
Edificios de Armazón	65.65	159.09	Edificios de Armazón	687592	1902495
Edificios de Ladrillos	83.04	168.37	Edificios de Ladrillos	925319	2065322
Promedio	81.52	197.05	Promedio	886865.3	2354511.8

En los mapas de escenarios a futuro, para que la Ciudad de México alcance un umbral de desplazamiento vertical total acumulado en sus estructuras de 0.049 m, se puede observar que a medida que transcurre el tiempo aumentan las áreas y población presente en zonas no favorables. Se estima que, en los próximos 50 años, más de 450 km² sobrepase el desplazamiento relativo de 0.049 m, lo que afectaría a más de 5'000,000 de personas (asumiendo la población del 2010; Figura 7.37). Por su parte si consideramos el desplazamiento absoluto, es decir, tomando en cuenta los movimientos positivos y negativos del terreno, se espera que para dentro de 50 años, poco más del 92% del área urbanizada de la ciudad sufra los efectos de la subsidencia, afectando a más del 94% de la población (Figura 7.38).

Por tanto, se puede señalar que el deterioro de la infraestructura debido a la subsidencia será progresivo si las condiciones de velocidad de subsidencia a causa de la sobreexplotación del sistema acuífero se mantienen en el tiempo. El valor de desplazamiento vertical total acumulado en estructuras de 0.049 m pertenece al valor admisible para edificaciones con

cimentaciones someras con un intervalo de confianza de 95% (Tabla 7.2), este valor fue escogido para la realización de los mapas de escenarios a futuro, debido a que gran parte de las viviendas más vulnerables de la ciudad, poseen este tipo de cimentaciones. Además, el intervalo de confianza de 95%, como ya se mencionó, es menos permisivo que los valores admisibles del factor de seguridad de 1.5, por tanto, se puede evaluar las edificaciones bajo las condiciones menos favorables, con el fin de obtener los resultados menos optimistas.

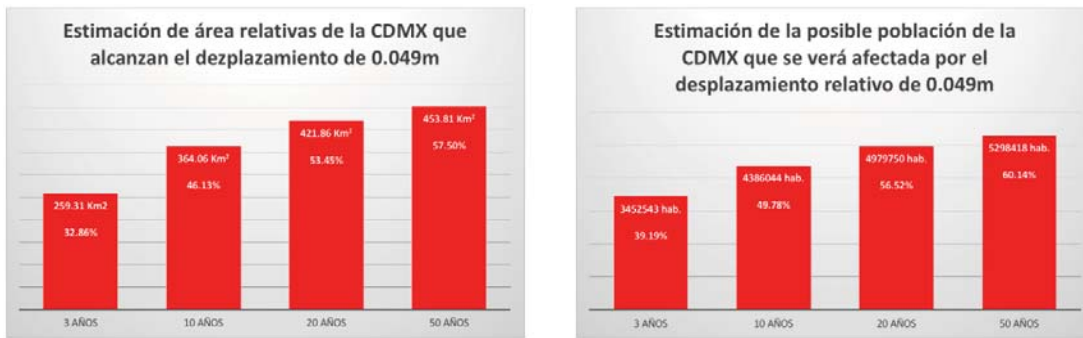


Figura 7.36. Estimación de áreas y población de la Ciudad de México que alcanzan los 0.049 metros de desplazamiento relativo.

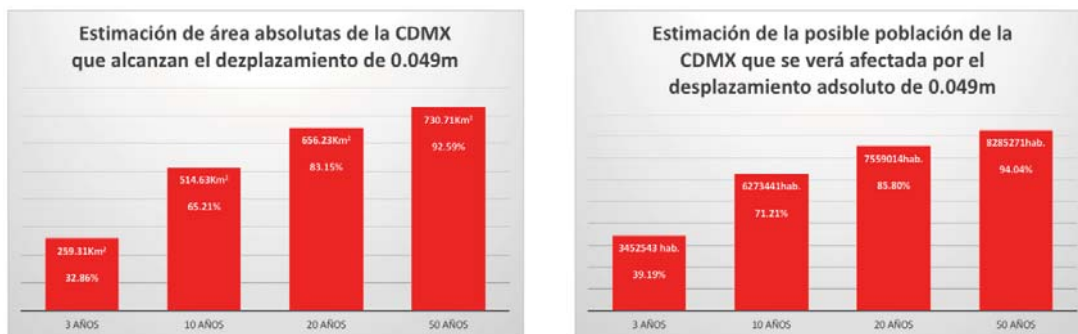


Figura 7.37. Estimación de áreas y población de la Ciudad de México que alcanzan el umbral de 0.049 m de desplazamiento acumulado en su estructura civil.

En el caso de las estructuras vitales, es posible observar que entre el 0% al 12.84% se encuentran en zonas de distorsión angular por encima del valor recomendado (Figura 7.38), presentándose el caso más favorable para las radioemisoras AM/FM, ya que ninguna de las estaciones se encuentra en la zona desfavorable. Para el restante de las categorías de edificaciones vitales, se observa que están preferentemente ubicadas en la zona donde la distorsión angular no sobrepasa los valores recomendados (Skempton y MacDonald, 1956; Bjerrum, 1963) ya que solo se tiene entre 8 y 13% de esta infraestructura en lugares donde el valor recomendado de distorsión angular es superado (Figura 7.38).

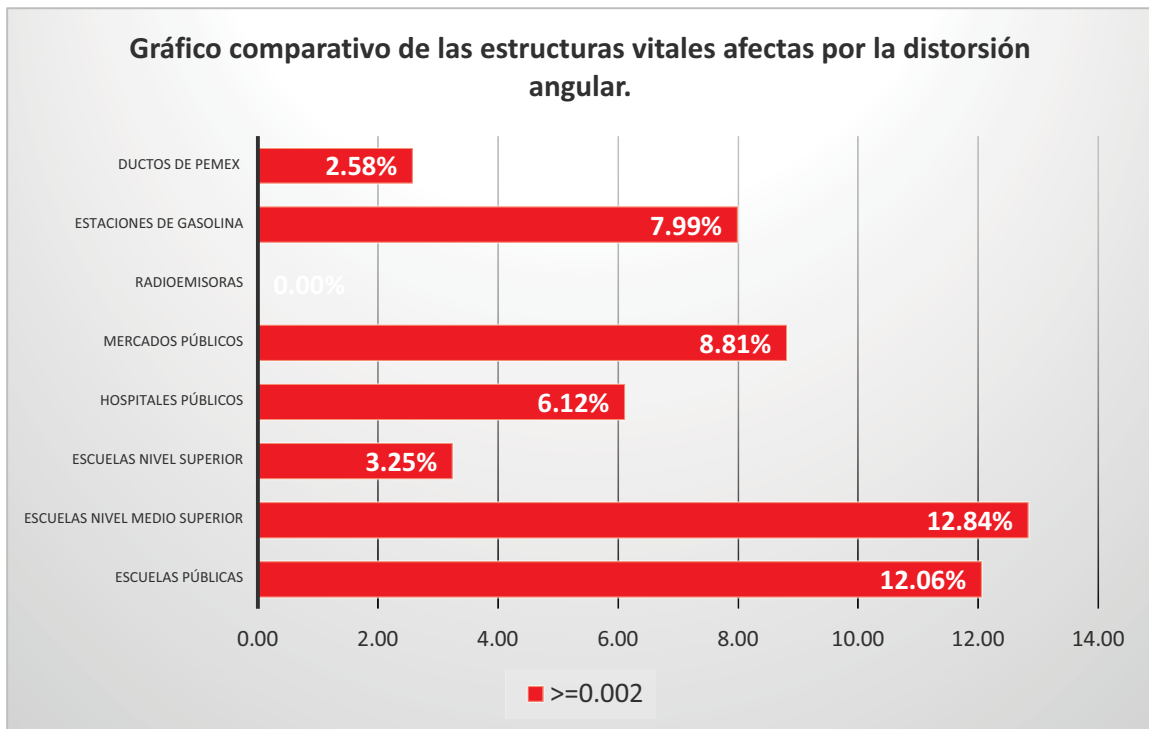


Figura 7.38. Gráfico comparativo para la Ciudad de México de las estructuras vitales afectadas por la distorsión angular.

Los mapas de las edificaciones dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017 reflejan que entre el 6% y el 38% de las edificaciones civiles que fueron afectadas por el sismo se encontraban por encima del valor de distorsión angular recomendado (Figura 7.39). Por lo que una parte importante de la infraestructura ya era susceptible a sufrir daños a consecuencia de algún fenómeno natural y/o inducido por el hombre. Se debe destacar que, a medida que la categoría de daño es mayor, el porcentaje de edificaciones que estaban por encima del valor recomendado de distorsión angular tiende a aumentar.

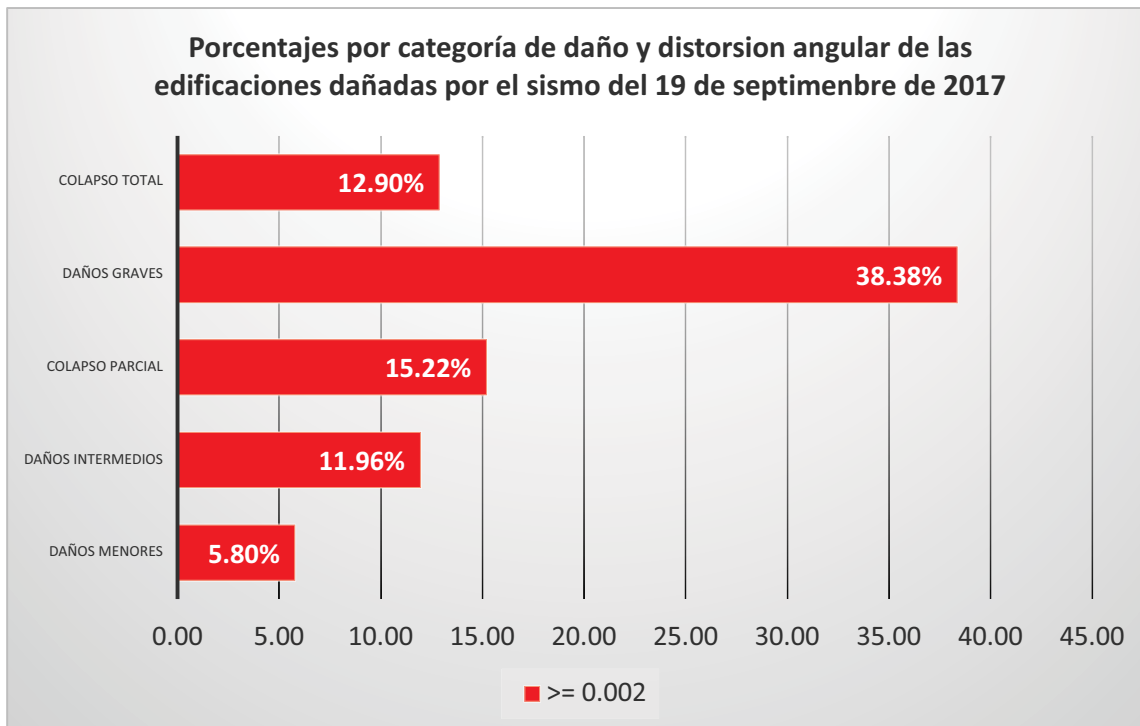


Figura 7.39. Porcentaje por categoría de daño y Distorsión Angular de las Edificaciones dañadas debido al sismo del 19 de septiembre de 2017.

El comportamiento de la Ciudad de México ante la distorsión angular está condicionado en parte por las características geológicas y/o geotécnicas presentes. En efecto, hacia el poniente sur hasta el valle de Chalco, en el norte del Peñón de los Baños, la Sierra de Guadalupe, cerro de la Estrella, Sierra de Santa Catarina, los cerros del Chiquihuite y El Tigre, se observan unidades litológicas (Figura 2.3) producto de erupciones que en su mayoría corresponden a grandes volcanes andesíticos estratificados. Los materiales naturales que se encuentran en esta zona son tobas, lahares, arenas pumíticas y basaltos (Vázquez y Palomera, 1989; Mooser et al., 1975; 1996). Desde el punto de vista geotécnico, esta área corresponde a la Zona de Lomas (Figura 7.2), la cual se caracteriza por poseer rocas o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre, que en sus zonas aluviales está conformado por arenas y limos intercalados con capas de arcillas altamente resistentes (Marsal y Mazari, 1959; Santoyo-Villa et al., 2005; Auvinet et al., 2017). Estas características crean condiciones poco favorables para el desarrollo de subsidencia y por consiguiente muy baja distorsión angular.

Hacia el oriente y bordeando los aparatos volcánicos, se presenta un conjunto litológico con composición preferentemente arcillosa (Figura 2.4), con intercalaciones de limos y capas de arenas cuyos espesores decimétricos de arcilla aumentan en dirección oriente y a medida que se alejan de los aparatos volcánicos. Estos materiales constituirían los depósitos sedimentarios del antiguo sistema lacustre de la cuenca de México (Vázquez y Palomera, 1989; Mooser et al., 1975; 1996). Desde el punto de vista geotécnico, estos componentes litológicos están enmarcados en las zonas de transición y zona de lago que se caracterizan por la presencia de arcillas altamente compresibles y con alto contenido de humedad. Estas características hacen que los materiales presentes sean poco resistentes a los esfuerzos compresivos y por tanto,

muy deformables y susceptibles a sufrir aumento de esfuerzos efectivos, como producto de la disminución de la presión de poro a consecuencia de la sobreexplotación del sistema acuífero. Esto genera procesos de subsidencia (Carrillo, 1948; Marsal y Mazari, 1959; Santoyo-Villa et al, 2005; Auvinet et al., 2017), que dada su heterogeneidad litológica y adyacencia con los aparatos volcánicos tienden a generar subsidencia diferencial y por consiguiente distorsión angular. Por tanto, las edificaciones ubicadas en estas áreas son las de mayor vulnerabilidad estructural.

Capítulo 8. Conclusiones

Los mayores valores de velocidades de subsidencia y gradiente de subsidencia se ubican en las alcaldías que se encuentran hacia el nororiente y suroriente de la Ciudad de México; siendo estas las de Tláhuac (-0.27 m/año; 0.02722%), Iztapalapa (-0.26 m/año; 0.02603%), Xochimilco (-0.22 m/año; 0.02548%) y Venustiano Carranza (-0.20 m/año; 0.2745%). De la misma manera, el mayor desarrollo del fenómeno de subsidencia hacia estas zonas de la ciudad es consecuencia de que gran parte de las mismas coinciden con las arcillas altamente compresivas que conformaban el fondo de los antiguos lagos, las cuales son susceptibles a sufrir compactación debido al bombeo excesivo del sistema acuífero, y estos a su vez se ponen en contacto con los materiales estables que conformaban antiguos aparatos volcánicos. Esto crea las condiciones propicias para la formación de fallas y fracturas asociadas a la subsidencia diferencial.

La definición de los límites de los intervalos de clase del Gradiente Horizontal de Subsidencia a partir de la asociación y precisión en el seguimiento de las fallas medidas en campo, permite establecer un criterio cuantitativo, el cual estipula a partir de qué valor se puede considerar un gradiente de subsidencia alto o muy alto, ya que se evalúa la asociación del mismo fenómeno obtenido a partir de dos fuentes independientes. Esto es de gran utilidad en la elaboración de los mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado, esto permite delimitar cuales son los valores de gradiente para los cuales el peligro es máximo, nulo o poco probable el desarrollo de fallamiento asociado a el fenómeno de subsidencia.

El estudio de la densidad de población y la vulnerabilidad socioeconómica permite valorar la distribución espacial de estos dos elementos, los cuales representan los entes susceptibles a sufrir las consecuencias a causa de fenómenos naturales y/o inducidos, como es el caso del proceso de subsidencia. A partir de este análisis se puede concluir que la Ciudad de México presenta valores de densidad de población excepcionalmente altos. Obteniéndose que más del 28% del área urbanizada tienen >14 habitantes por cada 900 m², cuando la media nacional es de apenas 0.0513 habitantes por 900 m². Las alcaldías con mayor densidad de población son Iztapalapa (19 hab/900 m²), Iztacalco (18 hab/900 m²) y Cuauhtémoc (16 hab/900 m²).

En cuanto a la vulnerabilidad socioeconómica el 24.2% de la superficie urbanizada de la Ciudad de México se encuentra en las categorías de vulnerabilidad alta y muy alta, lo que corresponde a un total de 190.94km², en estas áreas de gran vulnerabilidad vive un total de 3,254,672 habitantes, lo que representa el 32.94% de la población total de la ciudad (@ censo 2010). Las alcaldías que presentan mayor vulnerabilidad son Iztapalapa (18.66), Milpa Alta (17.85) y Tláhuac (17.22). A partir de este análisis se desprende que la mayoría de las alcaldías donde se registran los valores más altos de densidad de población y vulnerabilidad socioeconómica coinciden con las alcaldías en las que se observa los mayores valores de velocidad de subsidencia y gradiente de subsidencia.

La generación de varios escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado permite explorar las posibles vías para expresar el riesgo y exposición. A partir de este análisis se obtuvo un comportamiento similar en cuanto a las alcaldías que presentaron mayor riesgo y exposición, esto debido a que las

áreas que presentan mayor vulnerabilidad y densidad poblacional son las que tienen también el mayor peligro asociado a la subsidencia. Estando estas ubicadas hacia el nororiente y suroriente de la Ciudad de México. Para los escenarios de mapas de Riesgo Socioeconómico por Subsidencia y Fallamiento asociado las alcaldías que presentan mayores áreas y población dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto son Iztapalapa (32.64 – 24.58) km^2 y (514,607 – 353,906) habitantes, Gustavo A. Madero (24.25 – 6.16) km^2 y (405,793 – 94,578) habitantes y Venustiano Carranza (30.91 – 10.13) km^2 y (384,009 – 43,228). Por su parte para los escenarios de mapas de Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado las alcaldías que presentan mayores áreas y población dentro de las categorías de riesgo intermedio, alto y muy alto son Iztapalapa (19.30 – 11.49) km^2 y (384,770– 262,892) habitantes, Gustavo A. Madero (19.68–4.51) km^2 y (401,075 – 103,846) habitantes y Venustiano Carranza (15.71– 2.44) km^2 y (329,338 – 43,216)

Para este estudio se establece al escenario 2 como el mejor para expresar el Riesgo Socioeconómico y Exposición Poblacional por Subsidencia y Fallamiento asociado. Debido a que este considera tanto la velocidad de subsidencia como al potencial de desarrollo de fallamiento a consecuencia del gradiente de subsidencia, así como, la importancia relativa de cada uno de estos elementos. Los escenarios 1 y 3 no son los suficientemente robustos, ya que, en el caso del escenario 1 no toma en cuenta la importancia relativa de los elementos generadores de peligro y para el escenario 3 solo se toma el gradiente de subsidencia y no considera los valores de velocidad de subsidencia, los cuales también son importantes para evaluar el potencial de generar daños a causa de estos eventos. En este escenario se obtuvo que el área total urbanizada de la ciudad que se ubica en las categorías intermedio alto y muy alto para el mapa de riesgo socioeconómico y exposición poblacional son 119.51 km^2 y 64.31 km^2 respectivamente. Por su parte, la población total de afectada por las categorías intermedio alto y muy alto para el mapa de riesgo socioeconómico y exposición poblacional son de 1'644,421 y 1'358,873 respectivamente. Este representa que un número significativo de población de la ciudad que se ve afectado por el proceso de subsidencia de acuerdo a las consideraciones de este escenario.

En el mapa de distorsión angular de la CDMX se puede observar que hacia la zona oriental de la ciudad se encuentran ubicadas las áreas donde la distorsión angular supera el valor umbral recomendado 0.002 radianes, afectando a estructuras civiles dentro de un área de 97.49 km^2 , en los cuales más de un millón de habitantes posiblemente verán afectadas sus viviendas a consecuencia de la distorsión angular.

En la evaluación del comportamiento de las cimentaciones someras, profundas, edificios de armazón o de ladrillos se concluye que la principal diferencia entre estos mapas se puede observar entre aquellos cuyos valores de corte son basados en el factor de seguridad de 1.5 con respecto a aquellos cuyo valor de corte derivan de un intervalo de confianza de 95%. Esto es debido a que estos últimos poseen valores límites para el intervalo admisible ligeramente menores. Por tanto, las zonas de la ciudad que están fuera de los valores admisibles de distorsión angular son en promedio un 14.64% en área y un 16.65% en población más altos para aquellos mapas que poseen un intervalo de confianza de 95% con respecto a aquellos en los que se toma un factor de seguridad de 1.5, lo que equivale a una diferencia promedio de 115.53 km^2 y 1'467,646 habitantes entre ambos criterios.

En los mapas de futuros escenarios, se puede observar que a medida que transcurre el tiempo aumentan las áreas y población presente en zonas no favorables, estimándose que en los próximos 50 años las estructuras civiles dentro de un área de $\sim 450 \text{ km}^2$ sobrepase el umbral de desplazamiento relativo recomendado de 0.049 m, pudiendo afectar a más de 5'000,000 de personas (asumiendo la población del 2010). Por otra parte, si consideramos el desplazamiento absoluto, se esperaría que dentro de 50 años, poco más del 92% del área urbanizada de la ciudad sufra los efectos acumulados de la subsidencia del terreno, afectando a más del 94% de su población.

Del análisis de la influencia de la distorsión angular en las estructuras civiles se desprende que entre el 0% y 12.84% se encuentran en zonas de distorsión angular por encima del valor recomendado. Presentándose el caso más favorable para las radioemisoras AM/FM, ubicándose 0% de éstas en la zona desfavorable. Adicionalmente, para el restante de las categorías de edificaciones vitales se observa que están preferentemente ubicadas en la zona donde la distorsión angular no sobrepasa los valores admisibles, teniéndose un porcentaje que oscila entre 8% y el 13% de edificaciones afectadas.

En cuanto a las edificaciones dañadas durante el sismo del 19 de septiembre de 2017 se puede señalar que entre el 6% y el 38% de las edificaciones civiles que fueron reportadas como afectadas se encontraban por encima de los valores de distorsión angular admisibles. Esto debido a que la infraestructura ya era susceptible a sufrir importantes daños a causa de algún fenómeno natural y/o inducido por el hombre. Es de igual manera importante señalar que en el porcentaje de edificaciones dañadas aumenta a medida que la categoría de daños se incrementa.

Finalmente, se puede establecer que el comportamiento de la Ciudad de México ante la distorsión angular está condicionada por las características geológicas y/o geotécnicas que predominan en la ciudad y por la deficiente administración de sus recursos hídricos. Se observa la adyacencia en proporciones de área muy similares entre materiales con comportamientos mecánico muy diferente ante la extracción de fluidos. Este fuerte contraste produce que las áreas de la ciudad que están subyacidas por materiales arcillosos, sufran una fuerte compactación del terreno a consecuencia de la sobreexplotación del sistema acuífero, produciéndose fallas y distorsión angular de las estructuras civiles sobreyacentes. Por otra parte, aquellas zonas que son subyacidas por materiales volcánicos, no son propensas a sufrir subsidencia del terreno, y por tanto las estructuras civiles sobreyacentes son menos susceptibles a ser afectadas por distorsión angular.

Capítulo 9. Referencias Bibliográficas

Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Morán-Zenteno, D., Alba- Aldave, L., (2002a) *Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern México*: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118, 1-14.

Atkinson, B.K., (1987) *Fracture Mechanics of Rock*, Academic Press, London.

Auvinet, G., (2008) *Fracturamiento de los suelos, estado del arte*, Volumen especial Conferencias temáticas: avances recientes, Memoria, XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Aguascalientes, México, pp. 299-318.

Auvinet, G; Méndez E y Moises, J., (2017) *El Subsuelo de la Ciudad de México*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Vol. III, 2017, México.

Arce, J.L., Layer, P.W., Martínez, I., Salinas, J.I., Macías-Romo, M.C., Morales-Casique, E., J., Benowitz, J.A., Escolero, O., y Lenhardt, N., (2015a) *Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67, 123-143.

Bates, R y Jackson, J., (1980) *Glossary of Geology*, Published by Alexandria, American Geological Institute, Virginia, USA.

Bjerrum, L., (1963) *Discussion*. Proc European Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering, Wiesbaden , vol III, P 135.

Brunori, C.A., Bignami, C., Zucca, F., Groppelli, G., Norini, G., Davila Hernández, N., y Stramondo, S., (2015) *Ground Fracturation in Urban Area: Monitoring of Land Subsidence Controlled by Buried Faults with InSAR Techniques* (Ciudad Guzmán: Mexico), in Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., and Luino, F. eds., Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5, Springer International Publishing, p. 1027–1031.

Burland, J. B. y Wroth, C. P., (1974) *Settlement of Buildings and Associated Damage*, in: Proceedings of the Conference on Settlement of Structures – Session V, Cambridge, England, 611–654.

Bürgmann, R; Rosen, P y Fielding, E., (2000) *Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation*, Earth Planet Sciences, 28: p. 169-209.

Cabral-Cano, E., Dixon T.H., y Sánchez-Zamora, O., (2002) *InSAR and GPS analysis of ground subsidence in Mexico City*. American Geo- physical Union, Fall Meeting, Sn Fco. Abstracts. P. 51.

Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Diaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., y Carande, R. E., (2008) *Space geodetic imaging of rapid land subsidence in Mexico City*. Geological Society of America Bulletin, 120(11–12), 1556–1566, <http://dx.doi.org/10.1130/B26001.1>.

Cabral-Cano, E; Molina, O y Delgado, H., (2011) *Subsidencia y mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol 63, número 1, 2011, p. 53-60.

Cabral-Cano, E; Solano-Rojas, D; Oliver-Cabrera, T; Wdowinski, S; Chaussard, E; Salazar-Tlaczani, L; Cigna, F; Demets, C. y Pachecho-Martínez, J., (2015) *Satellite geodesy tools for ground subsidence and associated shallow faulting hazard assessment in central Mexico*, Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (ISSN 2199-8981, eISSN 2199-899X). v. 371, p. 355- 360. DOI:10.5194/piahs-372-255-2015.

Canadian Geotechnical Society (CGS) (1992) *Canadian foundation engineering manual*, 3rd edition. Technical Committee on Foundations, CGS, Canada.

Carreón-Freyre, D. y Cerca, M., (2006) *Integration of geological properties in the study of the subsidence and fracturing phenomena in two urban areas of Mexico*. In: 10th international association of engineering geology congress, Nottingham, paper 291.

Carreón-Freyre D.C., Cerca M.L. y Ochoa G.H., (2009) *Estudio de propagación del fracturamiento ocasionado por subsidencia en dos áreas urbanas geológicamente contrastantes de México: las ciudades de México D.F. y Querétaro*. in Proc. XVIIth IMSSGE. Conf. Geotechnical engineering in urban areas affected by land subsidence. Ed. Auvinet. G. and Juárez. M. vol. 36, Alejandria Egypt, pp. 49-57.

Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Ochoa, González, H., Ortiz-Villaseñor, I., Gámez-González, J. y Gutiérrez-Calderón, R., (2011) *Land subsidence and ground fracturing affecting major cities of central Mexico and related groundwater management*. In: Proceedings of the 14th Pan-American conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Toronto. <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/authors.html#c>. Accessed on Jan 2014.

Carrillo, N., (1948) *Influence of Artesian Wells on the Sinking of Mexico City*, Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2, pp. 156-159, Rotterdam, Netherlands.

CEN (2001): Eurocode 7 part 1: geotechnical design: general rules. Final Draft prEN 1997-1, December 2001, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

CENAPRED, (2014) *Guía básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*.

CENAPRED, (2017) *Análisis de la Vulnerabilidad Física a la Subsistencia y agrietamiento en la Ciudad de México*, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., y Amelung, F., (2014) *Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series*, *Remote Sens. Environ.*, 140, 94–106, doi:10.1016/j.rse.2013.08.038, 2014.

CONAGUA, (2018) *Estadísticas del Agua en México 2018*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, disponible en: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (Consultado en febrero de 2019).

CONEVAL, (2018) *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social: Medición de la pobreza*. Disponible en: https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2010.aspx (Consultado el 20 de noviembre de 2018 a las 18:25hrs).

Crichton, D., (1999) *Natural disaster management*. Leicester: Tudor Rose. The risk triangle; p. 102-03.

Davis, G. H., y Reynolds, S. J., (1984) *Structural geology of rocks and regions* (2nd ed., 776 p). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Demant, A., (1978) *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*: *Revista Instituto de Geología*, 2, 172-187.

Di Mauro, C., Bouchon, S., Carpignana, A., Golia, E., y Peressin, S., (2006) *Definition of multi-risk maps at regional level as management tool: experience gained by civil protection authorities of Piemonte region*, in: 5th Conference on Risk Assessment and Management in the Civil and Industrial Settlements, 17–19 October 2006, University of Pisa, Italy.

Engelder, T., (1987) Joints and some fractures in rocks, in Atkinson, B., ed., *Fracture Mechanics of Rock*, Academic Press, 27-69.

ERN, (2018) *Visualizador de inmueble con daños en México*, disponible en: <http://serv.ern.com.mx:8081...> (Consultado el 16 de agosto de 2018).

Estaciones de Gasolina”, [CRE]; <https://datos.gob.mx/busca/dataset/estaciones-de-servicio-gasolineras-y-precios-comerciales-de-gasolina-y-diesel-de-cre>, [2019-01-31].

Fattahi, H y Amelung, F., (2013) *DEM error correction in InSAR time series*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(7), 4249-4259.

Fossen, H. (2010) *Structural geology*. Cambridge: Cambridge University Press.

Galloway, D. L., Jones, D. R., e Ingebritsen, S. E., (1999) *Land subsidence in the United States*: U. S Geological Survey Circular 1182, 175p.

Galloway, D. L., y Burbey, T. J., (2011) *Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction*, Hydrogeology Journal, 19(8), 1459-1486.

Galloway, D. L., Erkens, G., Kuniatsky, E. L., & Rowland, J. C., (2016) *Preface: Land Subsidence processes*, Hydrogeol J 24:547–550, Springer, DOI 10.1007/s10040-016-1386-y

Saaty, T., (1980) *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill. Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised editions, Paperback Pittsburg: RWS Publications.

Gayol, R., (1925) *Estudios de las perturbaciones que en el fondo del valle de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo*, Primera parte, Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, vol. III, no. 3 pp. 96-132, México, marzo 1925; Segunda parte, Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, vol. III, no. 8 pp. 507-559, México, Agosto 1925.

GDF (Gobierno del Distrito Federal), (2004a) *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 29 de enero de 2004, Ciudad de México, México.

GDG (Gobierno del Distrito Federal), (2004b) *Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de cimentaciones*, Gaceta Oficial del Distrito Federal, Décima Cuarta Época, 6 de octubre de 2004, Tomo I, No. 103-bis:11-39, Ciudad de México, México.

Gómez, A; Orozco, M y Ferrari, L., (2005) *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. Conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, número 3, 2005, p. 227-283.

González, P., (2018) *Introducción a la interferometría en Ciencias de la tierra*, seminario web, Proyecto COMET, Universidad de Liverpool (Fecha del seminario: 29 de noviembre de 2019).

Hatcher, R. D. (1995) *Structural Geology: Principles, Concepts and Problems* 2nd Ed., Prentice-Hall, New Jersey.

Hellan K. (1984) *Introduction to fracture mechanics*, McGraw-Hill, New York, USA.

Hernández-Espriú, A., Reyna-Gutiérrez, J. A., Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., Macías-Medrano, S., Falorni, G., y Colombo, D. (2014): *DRASTIC- Sg Model, a new extension to the standard DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in urban aquifers sub-ject to differential land subsidence*. Application to Mexico City, Hydrogeology. J., 22, 1469–1485, doi:10.1007/s10040-014-1130-4, 2014.

Holzer, Thomas L., (1988) *Ground failure caused by groundwater withdrawal from unconsolidated sediments* - United States: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 25, p. 108, doi:10.1016/0148-9062(88)92325-X.

INEGI, (2011a) *Conteos de población y vivienda 2010*: INEGI:
<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/default.aspx>
(Consultado en mayo de 2013).

INEGI, (2012b) *Vectorial de localidades amanzandas y números exteriores, Urbanas. Cierre de planeación del Censo de Población y Vivienda 2010*.
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825308117>
(Consultado en septiembre de 2018).

INEGI, (2013) *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*,
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/index.jsp>
(Consultado en marzo 2019).

INEGI, (2018) *Marco Geoestadístico* <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?ag=00>
(Consultado en junio 2019).

Jenks, (2007) *Natural Breaks, ESRI, ArcGIS 9.2 Desktop Help*:
[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_\(jenks\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_(jenks))
(Consultado en septiembre de 2018).

Kulander, B. R., Barton, C.C. y Dean, S.L., (1979) *The application of fractography to core and outcrop fracture investigation*, U.S. Dept. of Energy, METC/SP-79/3; National Technical Information Service, U.S. Dept. of Commerce, Springfield. VA 22161.

López-Quiroz, P., Doin, M.P., Tupin, F., Briole, P. y Nicolas, J.M., (2009) *Time-series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry*. J Appl Geophys 69(1):1–15. doi:10.1016/j.jappgeo. 2009.02.006

Lyell, C., (1834) *Principles of Geology, Being an Inquiry How Far the Former Changes of the Earth's Surface are Referable to Causes Now in Operation* (Murray, London) 4 vols, 3rd edn.

Marsal R.J. y Mazari, M., (1959) *El subsuelo de la ciudad de México*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.

Meyerhof, G. G., (1956) *Discussions on paper by Skempton, A. W and McDonald, D. H.* The allowable settlements of buildings. Proc Inst Civ Engrs, Part II, Vol 5, pp 774.

MOC (2002): Code for the design of building foundations. Ministry of Construction, Beijing.

Moreira, A., Prats-iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., y Papathanassiou, K. P., (2013) *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*, IEEE GEoscience and Remote Sensing Magazine, 1(1). <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>.

Mooser, F., (1975) *Historia Geológica de la Cuenca de México: Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México*, DF, Departamento del Distrito Federal, Tomo 1, p.7-38.

Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga A., (1996) *Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos: México*, Comisión Federal de Electricidad. México, 27 p.

Novelo-Casanova y Rodríguez-Vangort, (2016) *Flood risk assessment. Case of study: Motozintla de Mendoza, Chiapas, Mexico*: Geomatics, Natural Hazards and Risk, v. 7, p. 1538–1556, doi:10.1080/19475705.2015.1089327.

Osmanoglu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., y Jiang, Y. (2011) *Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR*. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 13(1), 1–12, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2010.05.009>.

Polshin, D. E y Tokar, R. A., (1957) *Maximum allowable non-uniform settlement of structures*. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, p 402.

Pritchard, M. E., (2006) *InSAR, A Tool for Measuring Earth's Surface Deformation*, Phys. Today, 59(7), 68–69. <https://doi.org/10.1063/1.2337843>

Ragan, D.M., (2009) *Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques*: Cambridge, Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9780511816109.

RCDG, (2017) *Reglamento publicado en Gaceta Oficial del Distrito Federal, el 29 de enero de 2004. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, el 15 de diciembre de 2017*, http://www.paot.org.mx/centro/reglamentos/df/pdf/2018/RGTO_CONS_15_12_2017.pdf (Consultado en febrero de 2019).

Ricceri, G y Soranzo, M., (1985) *An analysis on allowable settlement of structures*. Riv. Ital. Geotec., 4, 177–188.

Rosen, P; Gurrola, E y Radar, G., (2012) *The InSAR Scientific Computing Environment*, Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, pp. 730-733.

Saaty, T., (1980) *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw Hill. Translated to Russian, Portuguese, and Chinese, Revised editions, Paperback Pittsburg: RWS Publications.

Santoyo-Villa, E; Ovando, E; Mooser, E y León, E., (2005) *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*: Publicaciones TGC, México.

Santoyo-Villa, E y Ovando, E., (2008) *Catedral y Sagrario de la Ciudad de México*, TGC, CONACULTA, Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural, México.

Skempton, A.W y MacDonald, D. H., (1956) *Allowable settlement of buildings*. Proc Inst Civ Engrs, Part III, Vol 5, pp 727-768.

Solano-Rojas, D., (2013) *Evaluaciones de Riesgo por Fallamiento Asociado a Subsistencia de INSAR*, (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Solano-Rojas, D., (2018) *Geological Hazard Assessment for Mexico City and its surroundings based on Synthetic Aperture Radar Interferometry (INSAR) Observations*, (tesis de doctorado). University of Miami, Florida, USA.

Tellez, A., (1899) *Apuntes acerca de los Cimientos de los Edificios en la Ciudad de México. Estudio dedicado a la Sociedad Científica Antonio Alzate*, Secretaria de Fomento, Reimpresión de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Twiss, R. J., and E. M. Moores (1992) *Structural Geology*, 532 pp., W. H. Freeman, New York.

Vazquez, E y Palomera, R., (1989) *Geología de la Cuenca de México*, Geofísica Internacional, Revista de la Unión Geofísica Mexicana, Vol. 28, número 2, 1989, p. 1-57.

Wahls, H. E., (1981) *Tolerable settlement of buildings*. *J. Geotech. Engng*, ASCE 107, No. 11, 1489–1504.

Wahls, H. E., (1994) *Tolerable deformations*, Geotech, Special publication No. 40, A.T. Yeung, and G. Y. Félio, eds., ASCE, New York, 1611-1628.

Younes, A., y Engelder, T., (1999) *Fringe cracks: Key structures for interpretation of progressive Alleghanian deformation of Appalachian Plateau*: Geological Society of America Bulletin, v.111, p.219-239.

Zhang, L. M. y Ng, A. M. Y., (2005) *Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations*, Géotechnique 55, No. 2, 151-161.

Zhang, L. M. y Ng, A. M. Y., (2007) *Limiting Tolerable Settlement and Angular Distortion for Building Foundations*, GSP 170 Probabilistic Applications in Geotechnical Engineering, ASCE, Geo-Denver 2007: New Peaks in Geotechnics.