



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL**

**SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN UNA REGIÓN DE LA
ALCALDÍA DE TLÁHUAC, UNA APROXIMACIÓN CON
APRENDIZAJE MÁQUINA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. ILCE NALLELY CASTILLO GALVÁN

DIRECTORA DE TESINA:

DRA. SILVIA RAQUEL GARCÍA BENÍTEZ

MÉXICO, CDMX. JUNIO 2021



Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente al Instituto de Ingeniería por permitirme realizar mis estudios de posgrado.

A mi asesora, la **Dra. Silvia Raquel García Benítez** por sus enseñanzas, su paciencia y confianza al permitirme ser parte de su equipo de trabajo. A **Paulina Trejo** por su sosiego y trabajo en equipo para producir lo que aquí se presenta.

A cada uno de mis profesores que compartieron sus conocimientos y vivencias en la práctica profesional. En particular a el **M.I. Hugo Sergio Haaz Mora**, la **Ing. Araceli Angelica Sánchez Enríquez**, el **M.I. Valentín Castellanos Pedroza** y el **M.I. Juan Luis Umaña Romero**; por su tiempo y dedicación al revisar este trabajo.

Gracias a mi familia, a mi madre **Luz María Galván**, a **Cesar Hernández** y a **Iker Torres**, por su amor y confianza. A **Mariel Brito** por brindarnos siempre su amor incondicional.

A **M.I. Jose L. Aguirre** por su paciencia en cada una de mis dudas, por apoyarme y ayudarme a ser realidad este proyecto.

Al **Dr. EMQ** por su orientación durante el desarrollo de este trabajo.

A mis queridos amigos **Carolina Guerrero**, **Gael Muratalla**, **Daniela Fernández** y **Rubén Domínguez** por su amistad y apoyo durante la especialidad.



Índice

1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivo general.....	1
1.2.1 Objetivos específicos	1
1.3 Alcances.....	1
1.4 Metodología.....	2
2. Geo-Características en Tláhuac.....	3
2.1 La Cuenca del Valle de México	3
2.2 Geología.....	7
2.3 Zonificación geotécnica	11
2.4 Zonificación sísmica.....	13
2.5 Subsistencia en el Valle de México.....	14
2.6 Hidrogeología en la zona	16
3. Agrietamiento en Tláhuac	21
3.1 Modelo de Riesgo por Agrietamiento.....	22
3.2.1 Pruebas realizadas en el área de estudio	24
3.3 Modelo matemático	31
3.3.1 Amenaza	33
3.2.2 Exposición	38
3.3.3 Susceptibilidad.....	42
3.4 Resumen sobre mapas.....	56
Conclusiones	65
Apéndice	67
A. Redes neuronales.....	67
A.1 Elementos de una Red Neuronal.....	68
A.2 Ventajas de las Redes Neuronales	69
A.3 Topologías principales de las redes neuronales.....	70
A.3.1 Función de Entrada	72
A.3.2 Función de activación.....	73
A.3.3 Función de salida.....	75
A.3.4 Pesos sinápticos	75



A.3.5 Mecanismos de aprendizaje.....	75
A.4 Algoritmo de aprendizaje Backpropagation	77
Referencias	81



Índice de figuras

Figura 2. 1 Geología de la Cuenca del Valle de México (Tomada de Mooser, 2019).....	5
Figura 2. 2 Sistemas de fallas en la Cuenca de México (Tomada de Mooser, 2019).	6
Figura 2. 3 Mapa geológico de la línea 12 del metro (Tomada de Mooser, 2019).....	8
Figura 2. 4 Mapa geológico de la Alcaldía Tláhuac.	11
Figura 2. 5 Zonificación geotécnica de la Alcaldía Tláhuac, (NTCDCC, 2017).	12
Figura 2. 6 Zonificación sísmica de la Alcaldía Tláhuac (Modificado de NTC, 2017).....	14
Figura 2. 7 Hundimiento diferencial de Tláhuac (Modificado del Atlas CDMX, 2014).	15
Figura 2. 8 Distribución espacial de la subsidencia del suelo en la Ciudad de México, período 2003-2010, en mm / año (Tomada de Hernández-Espriú et al., 2014).....	16
Figura 2. 9 Hidrogeología de Tláhuac (Tomada del Atlas CDMX, 2014).	17
Figura 2. 10 Acueductos y canales en la Alcaldía Tláhuac (Tomada de CONABIO, 2014.....	18
Figura 2. 11 Entorno geológico e hidrogeológico. Unidad a: acuitardo, Unidad b: Acuífero granular superior, Unidad c: Acuífero inferior fracturado, Unidad d: Basamento del Cretácico. An-andesita, B-basalto (Tomada de Hernández-Espriú et al., 2014).	20
Figura 3. 1 Ubicación de algunos de los pozos de bombeo en la Alcaldía Tláhuac.	22
Figura 3. 2 Polígonos de estudio en Tláhuac (García-Benítez et al., 2019).....	23
Figura 3. 3 Localización de los polígonos de estudio I y II.....	24
Figura 3. 4 Mapa de periodo dominante del suelo (Ts) de la subcuenca de Xochimilco- Chalco (Tomada García et al., 2019.....	26
Figura 3. 5 Mapa de isoprofundidad a la cima de los derrames basálticos o al contacto entre la arcilla inferior y los depósitos profundos (Hs) (Tomada García et al., 2019).	26
Figura 3. 6 Posición de los Sondeos Mixtos en los polígonos I y II.....	27
Figura 3. 7 Sondeos de penetración estándar.	28
Figura 3. 8 Estratigrafía de la Alcaldía Tláhuac.....	28
Figura 3. 9 Variación del contenido de agua.....	29
Figura 3. 10 Ejemplo de la variación de los límites de consistencia en el polígono I, se observa el diagrama de caja y bigotes.	30



Figura 3. 11 Manifestación de grietas antes y después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Modificado de CENAPRED).....	31
Figura 3. 12 Mecanismo de agrietamiento en la Alcaldía de Tláhuac (Tomada de García et al., 2019).	33
Figura 3. 13 Funcionamiento de la red neuronal para el análisis del NAF.....	34
Figura 3. 14 Variación espacial del NAF en el polígono I.	35
Figura 3. 15 Variación espacial del NAF en el polígono II.	35
Figura 3. 16 Intensidad sísmica del sismo de 2017.	37
Figura 3. 17 Posición de la capa rígida, basamento, en el polígono I y II.....	38
Figura 3. 18 Variación espacial del espesor de arcillas en el polígono I.	39
Figura 3. 19 Variación espacial del espesor de arcillas en el polígono II.	39
Figura 3. 20 Mapa de exposición por basamento en el polígono I y II de la alcaldía Tláhuac.	41
Figura 3. 21 Ubicación de la frontera en la Alcaldía de Tláhuac, representa un cambio en la resistencia del material.	42
Figura 3. 22 Cortes estratigráficos en el polígono I.....	43
Figura 3. 23 Corte a: Estratigrafía en el polígono I.....	44
Figura 3. 24 Corte c: Estratigrafía en el polígono I.....	45
Figura 3. 25 Análisis del contenido de agua en la zona de estudio.	46
Figura 3. 26 Variación espacial del contenido de agua en el Polígono I.	47
Figura 3. 27 Variación espacial del contenido de agua en el Polígono I.	47
Figura 3. 28 Ubicación de los sondeos virtuales y reales.....	48
Figura 3. 29 Arquitectura de la red neuronal para establecer propiedades espaciales. La salida es el valor de propiedad que se modela para la inclusión.	49
Figura 3. 30 Comparación entre los valores medidos y evaluados con la RN.	49
Figura 3. 31 Variación del número de golpes, inclusión semi-rígida en el polígono I.	50
Figura 3. 32 Variación de la posición con respecto a la superficie de la inclusión semi-rígida en el polígono I.	50
Figura 3. 33 Variación del espesor, inclusión semi-rígida en el polígono I.	51



Figura 3. 34 Variación de la posición con respecto a la superficie de la inclusión semi-rígida en el polígono II.	52
Figura 3. 35 Variación del espesor, inclusión rígida en el polígono II.	52
Figura 3. 36 Análisis de peligrosidad.	53
Figura 3. 37 Análisis para determinar el nivel de impacto en la zona de estudio.	54
Figura 3. 38 Niveles de peligrosidad en el polígono I.	55
Figura 3. 39 Niveles de peligrosidad en el polígono II.	55
Figura 3. 40 Descenso acelerado y heterogéneo del NAF en el polígono I y II.	57
Figura 3. 41 Exposición por basamento en el polígono I y II.	59
Figura 3. 42 Área donde existe peligro por el cambio abrupto de W%.	61
Figura 3. 43 Zonas de peligro en el polígono I y II.	62
Figura 3. 44 Índice socioeconómico de la Ciudad de México.	63
Figura A. 1 Analogía de neuronas biológicas con una neurona artificial.	68
Figura A. 2 Red neuronal artificial multicapa. Modificada de (Matich, 2001).	69
Figura A. 3 Red neuronal artificial monocapa.	71
Figura A. 4 Red neuronal multicapa feedforward o perceptrón.	72
Figura A. 5 Red neuronal multicapa recurrente (feedback).	72
Figura A. 6 Función lineal de activación. Modificada de (Matich, 2001).	74
Figura A. 7 Función de activación sigmoide. Modificada de (Matich, 2001).	74
Figura A. 8 Función de activación hiperbólica. Modificada de (Matich, 2001).	75
Figura A. 9 Diagrama de cuerpo libre del aprendizaje Backpropagation.	78



Índice de tablas

Tabla 3. 1 Propiedades geotécnicas de los suelos.	31
---	----



1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

A raíz de los sismos del 7 y 19 de septiembre de 2017 se registró la aparición y magnificación de discontinuidades al sur de la Cuenca del Valle de México, particularmente en la Alcaldía Tláhuac. La respuesta del entorno fue y sigue siendo tan compleja que diversos equipos de científicos y tecnólogos han estudiado, desde diversos enfoques, las causas de lo manifestado. En este trabajo de investigación se presenta una aproximación a la cuantificación del riesgo por agrietamiento en Tláhuac mediante mapas parcelados que conectan aspectos geotécnicos, geológicos y antrópicos. Se describe la susceptibilidad al fenómeno de las comunidades asentadas en la parte de la Alcaldía más afectada, que coincide con la Transición Abrupta de la CDMX.

1.2 Objetivo general

Establecer con técnicas de la inteligencia artificial, la causalidad y correlación entre factores geotécnicos y geológicos (plasmados en mapas) y el riesgo por agrietamiento en una región de la Alcaldía Tláhuac. Se reconocen y entienden la(s) amenaza(s) que se desprenden de la actividad humana, que agravan este riesgo.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Definir los mapas de Amenaza, Susceptibilidad y Exposición con modelos espaciales neuronales entrenados con propiedades derivadas de campañas de exploración geotécnica y determinaciones paramétricas con técnicas geofísicas.

2. Definir los factores más estrechamente vinculados con la(s) Amenaza(s), en su forma actual y proponer escenarios de evolución.

3. Analizar las capas de información de 1. y 2. para enunciar posibles causas→efectos en una región acotada a conveniencia.

1.3 Alcances

- Comprender, con base en los hallazgos obtenidos con las técnicas de la inteligencia artificial, los factores de los que se desprende y el impacto que genera el fenómeno del agrietamiento.
- Como alternativa a la visión mecanicista de establecer elementos que actúan de forma independiente, relacionar en un modelo integral al medio natural, al antrópico, a las fuerzas de la naturaleza y a las acciones humanas por medio de las manifestaciones más claras del agrietamiento.



- Proponer un método simple y económico de interpretar mapas de variables cuyo significado sólo se entiende desde lo *espacial* y que requieren, además, de la superposición *inteligente* para su correcto dimensionamiento.

1.4 Metodología

El proyecto general del que se desprende esta investigación comprende el estudio de cinco polígonos en la Alcaldía Tláhuac (figura 3.2), en esta investigación se abordan las experiencias, análisis y conclusiones para dos importantes polígonos que comprenden las siguientes colonias/pueblos (figura 3.1):

- I. Colonia Del Mar, Colonia Miguel Hidalgo y Colonia Nopalera.
- II. Pueblo San Francisco Tlaltenco, Ampliación José López Portillo, Ampliación Selene, El Triángulo, Guadalupe Tlaltenco, López Portillo, Ojo de agua, Zacantenco y Selene.

La recolección, análisis y sistematización de la información del proyecto, teniendo en cuenta que el objetivo es acercarse a la identificación del riesgo por agrietamiento, se realizó de la siguiente manera:

- a. Caracterización del agrietamiento

Realizar mapas parcelados del basamento que subyace a las secuencias arcillosas, reconocer los sistemas de fracturamiento y los tipos de grietas en el área de estudio:

- i. grietas por fractura hidráulica (zonas de encharcamiento).
- ii. grietas por transición abrupta.
- iii. grietas por contactos (heterogeneidad).
- iv. grietas por evapo-transpiración.
- v. grietas por estructuras sepultadas.

- b. Estudios geotécnicos/geológicos.

Ejecutar pruebas en campo y análisis en gabinete que permitan extraer información relacionada con el agrietamiento. En secuencia obligada se tratan:

- Exploración del marco geológico regional.
- Estudio de propiedades de suelos a partir de lo reportado en sondeos de exploración mixtos.
- Análisis 3D de las propiedades mecánicas e índice de los suelos de interés (desde lo reportado en las pruebas de laboratorio).

- c. Variación espacial de propiedades críticas del GEO.

Mapas parcelados de las secuencias altamente compresibles y de muy baja capacidad de carga, de interstratificaciones y de posibles estructuras enterradas.

- d. Conclusión sobre la Micro-zonificación de la Susceptibilidad, Amenazas y Vulnerabilidad.



CAPÍTULO 2.

2. Geo-Características en Tláhuac

2.1 La Cuenca del Valle de México

La cuenca de México (CM), es una cuenca endorreica con una longitud de 110 km en dirección N-S y un ancho E-O de 80 km, con una superficie aproximada de 9540 km². La planicie lacustre de la CM esta geográficamente limitada por un conjunto de sierras volcánicas, al norte por las sierras de Tepotzotlán, Tezontlalpan y Pachuca; al oriente por la Sierra de Río Frío y por la Sierra Nevada; el límite sur está constituido por el campo volcánico del Chichinautzin y Ajusco, y al poniente por la Sierra de Las Cruces (de Cserna *et al.*, 1988; Enciso-De la Vega, 1992; García-Palomo *et al.*, 2002, 2008; Zamorano-Orozco *et al.*, 2002; Siebe *et al.*, 2004; Macías *et al.*, 2012).

El Valle de México es un área compleja, desde el punto de vista tectónico, por su localización dentro de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), la cual constituye uno de los rasgos más característicos de la geología de México (Aceves-Quesada, 1998). De acuerdo con Mooser (1963) y Demant y Robin (1975), la cuenca debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos que se han estado desarrollando a partir del Eoceno, tras haber emergido del océano gran parte de lo que ahora es México.

La base de la Cuenca del Valle de México está formada por depósitos marinos del Mesozoico superior, a profundidades que oscilan entre los 1500 y 3000 m, además de calizas y lutitas del Cretácico superior intensamente plegadas. Al norte de la cuenca obedecen a pliegues laramídicos con ejes anticlinales dirigidos al suroriente, mientras que las del sur obedecen a anticlinales formados en el Cenozoico inferior por empujes de la masa Xolapa (Mooser, 2018). Sobre el basamento marino fueron acumulándose, desde la emersión de la masa continental a principios del Cenozoico a la actualidad, productos del vulcanismo que consisten en lavas, tobas, cenizas, brechas, lahares, depósitos fluviales y aluviales, paleosuelos y arcillas lacustres con un espesor total de 1500 a 3000 m. Las erupciones volcánicas fueron irrumpiendo a través de numerosas fracturas y fallas que rompieron la corteza desde profundidades de 5, 10 y a 15 km, donde se localizan las cámaras magmáticas (Mooser, 2018) (figura 2.1).

Mosser (1975) sostiene que la geomorfología de la cuenca del VM se debe a siete principales eventos geológicos:

- La primera fase (Paleógeno): se originaron rocas volcánicas, que no afloran en la superficie (a profundidad de 2265 m).
- Segunda fase (Oligoceno Medio), se caracteriza por la presencia de varias coladas de lava de composición ácida e intermedia (en Huehuetoca y Coyotepec).
- Tercera fase (Oligoceno Superior): Se desarrolla la base de las Sierras Mayores del este y oeste de la actual cuenca. Su principal composición es ácida y forma grandes



depósitos de dacitas. Algunas pequeñas elevaciones aisladas como Peñón de los Baños, Chapultepec, Tlapacoya, Zacaltépetl corresponden a este período.

- El inicio de la cuarta fase se ve marcada por la aparición de la Sierra de Guadalupe la cual corresponde al Mioceno, se caracteriza por la emisión de grandes masas de lavas intermedias y ácidas. Otras estructuras asociadas son las sierras de Tepotzotlán, Los Pitos, Patlachique y El Tepozán.
- Al finalizar el Mioceno empieza la quinta fase volcánica, donde se originan las Sierras Mayores; en el oeste la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo; al este la Sierra Nevada y Río Frío. Estas Sierras son de composición intermedia y ácida.
- La sexta fase volcánica se desarrolla durante el Pleistoceno, donde abundan materiales de composición andesito-basálticos que formaron los cerros de Chimalhuacán, Chiconautla, el Peñón del Marqués, el Cerro de la Estrella y el Cerro Gordo.
- La última fase culminó en el Cuaternario Superior con la formación de la Sierra de Chichinautzin en la parte sur del antiguo Valle de México, dando como resultado la edificación de varios conos, derrames lávicos y material piroclástico.

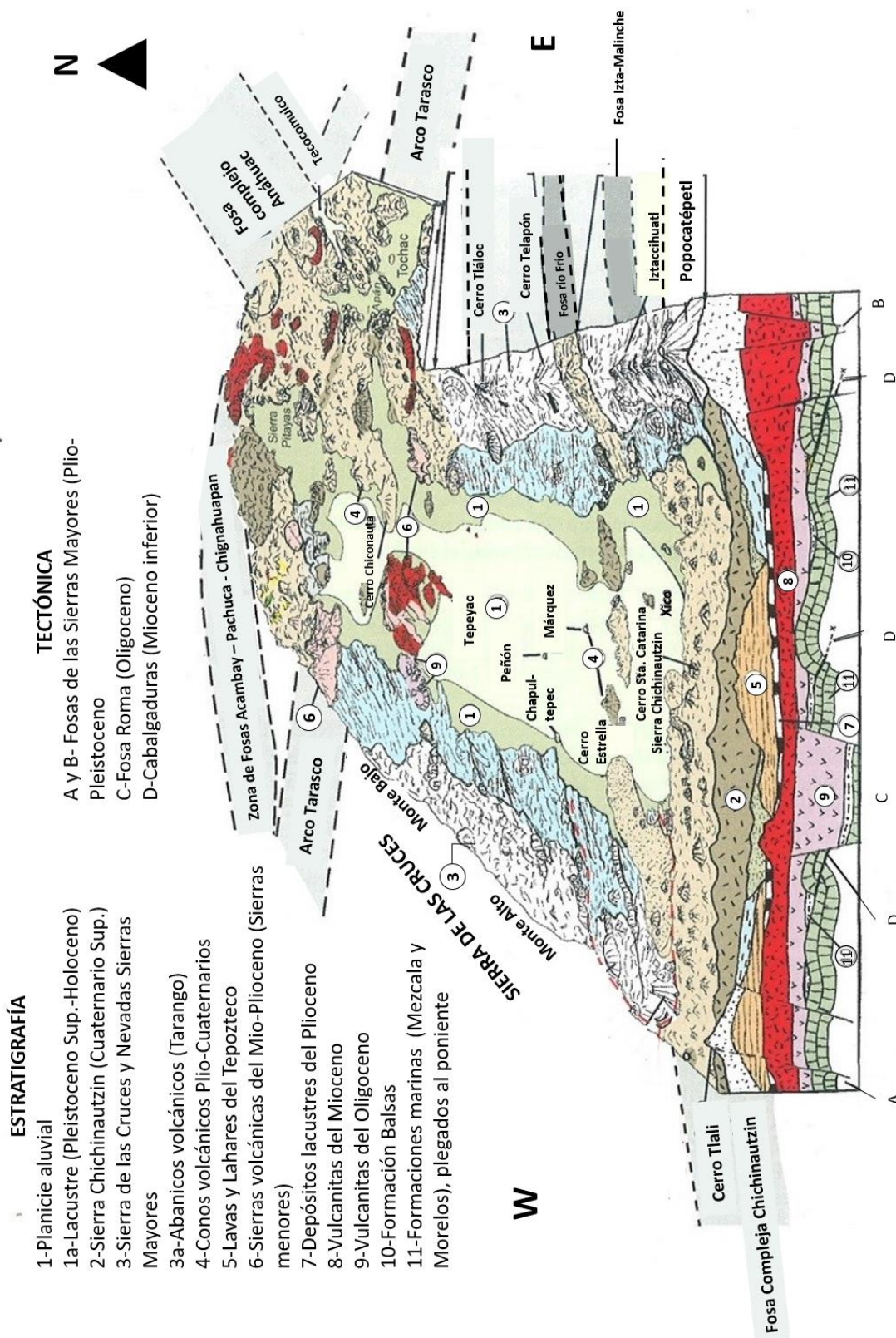


Figura 2. I Geología de la Cuenca del Valle de México (Tomada de Mooser, 2019).



Estudios tectónicos han comprobado la existencia de cinco sistemas de fallas en la Cuenca de México (figura 2.2).

1. Sistema Chichinautzin-Santa Catarina WSW-ENE.
2. Sistema Grandes Sierras y Fosas NNW-SSE.
3. Sistema Tláloc-Apan SW-NE
4. Sistema Tarasco-Acambay-Zumpango WNW-ESE.
- A. Pliegues Laramídicos.
- B. Pliegues Xolapa.

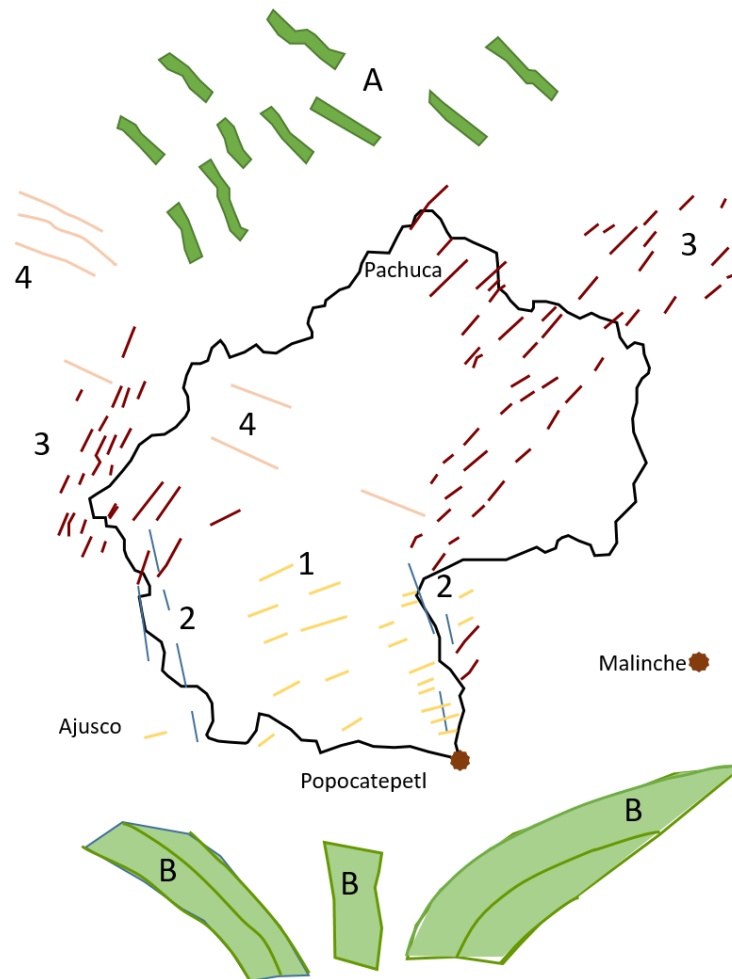


Figura 2. 2 Sistemas de fallas en la Cuenca de México (Tomada de Mooser, 2019).

Entre el conjunto de eventos geológicos de naturaleza volcánica destacan también aquellos que forman lagos. Cuando fluyen lavas y éstas rellenan los fondos de los valles, las aguas detrás de dichas lavas forman con frecuencia lagos en los que se depositan sucesivamente sedimentos de arcillas. Así es la historia de la formación de la Cuenca de



México (CM). Hubo tres eventos importantes de formación de lagos (Mooser et al., 1956; Marsal y Mazari, 1959; Mooser, 2018):

- El primero sucedió después de la erupción de lavas y lahares del Tepozteco, cuyas masas obstruyeron las salidas de aluviales de la CM al sur a finales del Mioceno. Por lo que se formó un potente estrato de arcillas (~100 m) en el subsuelo de la cuenca a unos 1000 m debajo de la superficie.
- Después en el norte de la cuenca, por Tula, otras erupciones volcánicas cerraron importantes cauces fluviales durante el Cenozoico superior, dando origen a los depósitos de arcillas lacustres Taxhimay de 50 a 100 m de espesor.
- En el Cuaternario superior, al crecer la Sierra de Chichinautzin se cerró la cuenca por segunda vez, formándose sobre toda su extensión desde Xochimilco a Huehuetoca, generando las arcillas blandas del Valle.

2.2 Geología

El proyecto de la Línea 12 del metro de la Ciudad de México representa la referencia más importante acerca de la geología en la parte poniente de la Alcaldía Tláhuac. La sección del trayecto en Tláhuac se construyó a partir de información de unos 150 barrenos de exploración (80 sondeos de cono eléctrico SCE y el resto sondeos mixtos SM -sondeos SPT combinados con algunos tramos de tubo Shelby) (Mooser, 2017).

El trazo (figura 2.3) comprende siete unidades morfológicas:

1. Los pies de las lomas
2. Las praderas
3. La planicie lacustre meridional de la Ciudad de México
4. Los pies occidentales y meridionales del Cerro de la Estrella
5. La planicie lacustre de Tezonco-Xochimilco
6. Los pies meridionales de la Sierra de Santa Catarina y
7. La planicie lacustre de Tláhuac-Chalco

En este trabajo se abordarán tres unidades consideradas de mayor relevancia: la planicie lacustre de Tezonco-Xochimilco que está conformada de arcillas lacustres de la series superior e inferior, los pies meridionales de la Sierra de Santa Catarina en donde se presentan tres cuerpos de lavas de la misma sierra y entre ellas tramos de tobas y arcillas lacustres de las dos Series Lacustres. Las arcillas lacustres más antiguas de la Sierra Inferior, subyacen a las lavas profundas más antiguas de la Sierra de Sta. Catarina y, por último, la planicie lacustre de Tláhuac-Chalco compuesta de arcillas de las dos series lacustres a una mayor profundidad (Lugo-Hubp et al., 1994; Arce et al., 2015; Mooser, 2018).

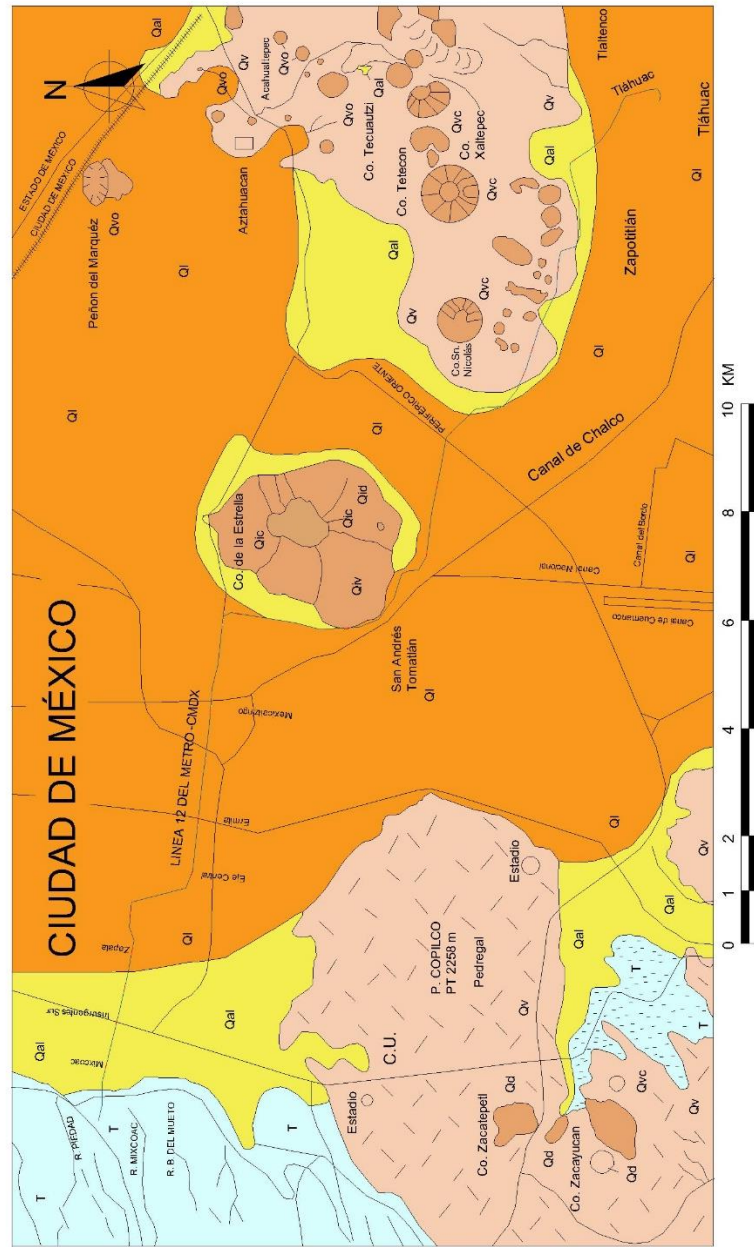
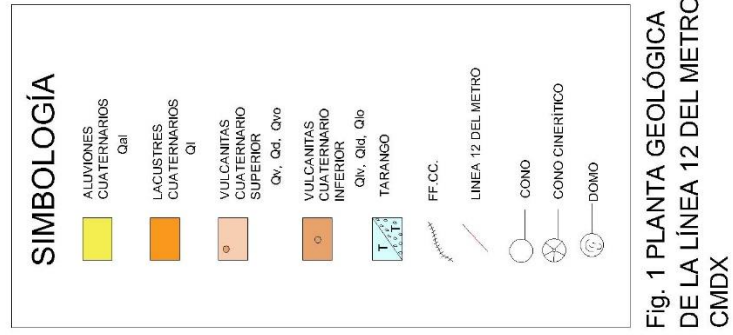


Figura 2. 3 Mapa geológico de la línea 12 del metro (Tomada de Mooser, 2019).



Se reconocen tres erupciones de ceniza o pómez (horizonte tefracronológico), bien definidas y diferenciadas entre el conjunto de la multitud de erupciones que han caído y rellenado la Cuenca meridional de México. Dentro de la serie lacustre superior se ubica un estrato de ceniza volcánica denominada “La Negra Durazo”. Aparece con regularidad y con espesor grueso (10 a 20 cm) en el centro de CM, al norte hasta El Caracol, en el oriente hasta Texcoco y en el sur tiene como límite Chalco, aunque menos gruesa. Su edad fue determinada por radio-carbón en $28,690 \pm 20$ años bp, la cual fue probablemente emitida por el volcán Sta. Catarina y su caldera. Otro horizonte tefracronológico destacado está representado por la Capa Dura. De acuerdo con barrenos con buena recuperación se sabe que esta capa, mide aproximadamente unos 4 metros de espesor debajo del centro de la ciudad de México, consiste de 7 a 8 erupciones de pómez interestratificadas en arcillas lacustres. Su origen se calculó estar en el volcán del Cerro de la Palma. El tercer horizonte está constituido por una capa de pómez granular de unos 10 a 20 cm de espesor, que se detectó dentro del conjunto de suelos que cubren la formación Tarango y que yacen debajo de la Serie Lacustre inferior. Esta formación se originó, por una erupción del volcán Ajusco (Mooser, 1967; Santoyo et al., 2005; Mosser, 2018).

Los principales rasgos físicos de la Alcaldía Tláhuac se deben principalmente a la Sierra de Santa Catarina y en menor proporción al volcán Teuhtli, figura 2.4. La Sierra de Santa Catarina es un conjunto de conos volcánicos Cuaternarios con dirección general oeste-este, ocupa una superficie aproximada de 75 km^2 , en una extensión de 12 km y con un ancho de 6 km. Está compuesto de seis conos cineríticos y un domo central. Su prominencia más elevada es el cono escoriático Santa Catarina (2700 msnm) (Mooser, 2018). Lugo-Hubp (1994) observa que esta sierra está formada por conos de escorias compuestos por flujos de lavas y depósitos de piroclásticos. El volcán Teuhtli, por otro lado, es un cono volcánico de composición andesítica. Las estribaciones de la Sierra de Chichinautzin están dominadas en el área de interés por el volcán Teuhtli (de Tecuhtli, gran señor). Los productos de las manifestaciones eruptivas llegaron a cubrir parte de la zona lacustre por los que se considera de transición abrupta y presenta un agrietamiento similar al de la periferia de la Sierra de Santa Catarina.

Los depósitos lacustres aumentan de espesor hacia el oriente, la Sierra de Santa Catarina está rodeada por depósitos con espesores que oscilan entre los 100 m aproximadamente. En estos depósitos lacustres aparecen interestratificados numerosos horizontes de cenizas y pómezes, testigos de las erupciones volcánicas en el centro de la Cuenca de México. Estos depósitos se dividen en dos partes por la Capa Dura. En la parte superior de esta capa predominan arcillas poco consolidadas de la Serie lacustre Superior y por debajo las arcillas de la Serie Lacustre Inferior (Mooser, 2018).

A los pies meridionales de la Sierra de Santa Catarina, los estratos de cenizas y pómezes (arcillas de serie superior) obedecen a ondulaciones, a cambios repentinos de espesor y a duplicaciones junto con fallas curvas del tipo falla de talud. Esto último se puede explicar como consecuencia de deslizamientos de los sedimentos arcillosos hacia partes más bajas en el sur, mecanismo que explica su duplicación por superposición. El análisis de la secuencia



de estos hundimientos permite concluir que no son modernos; al contrario, son antiguos y han ocurrido a partir de la formación del horizonte de la Capa Dura (Arellano, 1953; Hernández-Espriú, 2014).

Hay líneas de investigación que apuntan a que estos movimientos siguen activos y que se comprueba con los agrietamientos que aparecen debajo de los edificios construidos sobre arcillas en los flancos meridionales de la Sierra de Santa Catarina. Estos deslizamientos superficiales se han acelerado en esta zona por la importante extracción de agua entre Chalco y Xochimilco, causando hundimientos extensos en el centro del área lacustre, que originalmente se encontraba por encima del nivel del Valle de México. En la actualidad el hundimiento en la Alcaldía Tláhuac supera al promedio en el Valle de México (Mooser, 2018).

Otra fuente de información importante, perforados cerca del sitio de estudio, lo proporciona los pozos profundos Tulyehualco-I y Santa Catarina 3a, de 3000 m y 1912 m de profundidad total respectivamente, muestran que los espesores de los depósitos lacustres son de aproximadamente 80 y 100 m para ambos sitios (Unda-López, 2016; Santiago-López, 2018).

De acuerdo al Programa Delegacional de Desarrollo Urbano, PDDU, (2008), en la Alcaldía Tláhuac la secuencia estratigráfica está representada por una planicie que consta de varias capas lacustres de material arcilloso, caliza y productos volcánicos. Superficialmente se hayan productos de la descomposición de la flora lacustre en espesores de hasta 700 m. El 56.64 % de los suelos lacustres ubicados en el centro de la demarcación esta urbanizado, mientras que el 60% de los suelos aluviales está libre de asentamientos urbanos.

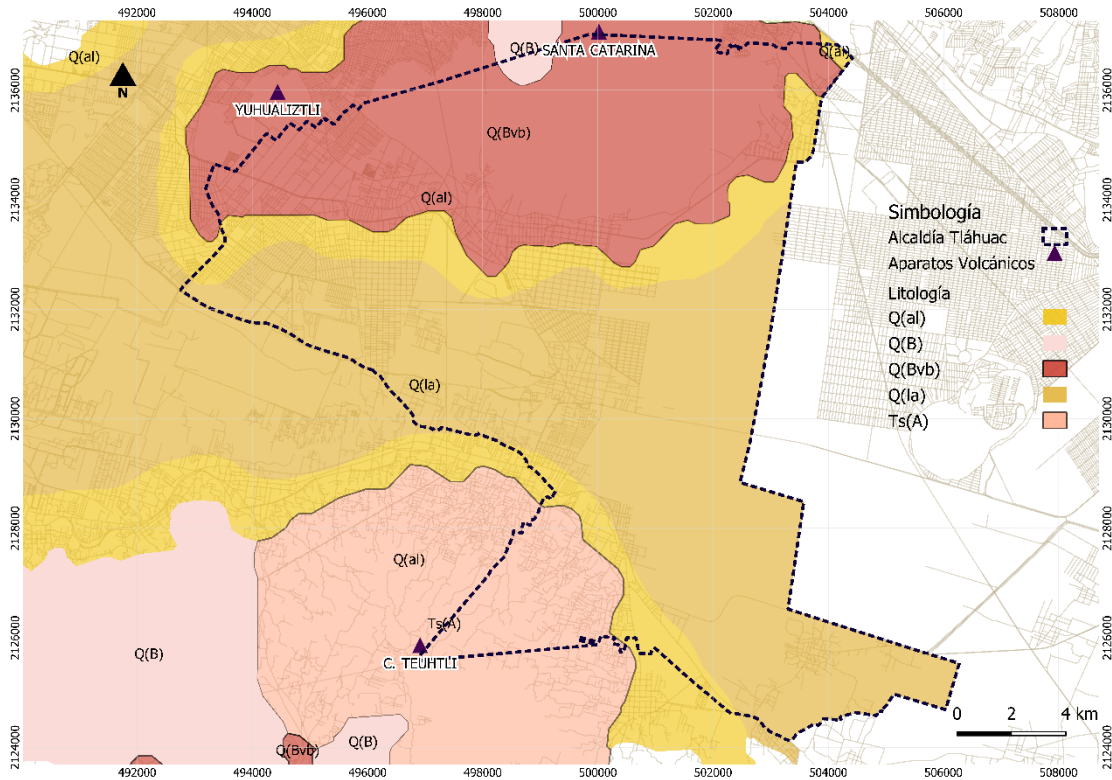


Figura 2. 4 Mapa geológico de la Alcaldía Tláhuac.

2.3 Zonificación geotécnica

La zonificación geotécnica de la Ciudad de México se divide en tres zonas, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, NTCDDC, (GOBCDMX, 2017), se definen como:

Zona I. *Lomas*, formadas por rocas o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre, de manera superficial o intercalados existen depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. Con frecuencia se tienen oquedades en rocas, cavernas y túneles excavados en suelos por actividad de minas de arena y rellenos no contralados.

Zona II. *Transición*, los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, está constituida por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor varía entre decenas de centímetros a pocos metros.

Zona III. *Lacustre*, constituida por grandes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable (de centímetros a varios metros, en conjunto puede superar los 50 m de espesor). Estos depósitos por lo general están cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales.



La figura 2.5 ilustra la zonificación geotécnica de la Alcaldía de Tláhuac, en la cual la mayor parte de su superficie se encuentra en la zona III, Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido variable de limo o arcilla. Estas capas arenosas, generalmente son medianamente compactas a muy compactas y de espesor de varios centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres pueden estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales. (NTCDCC, 2017).

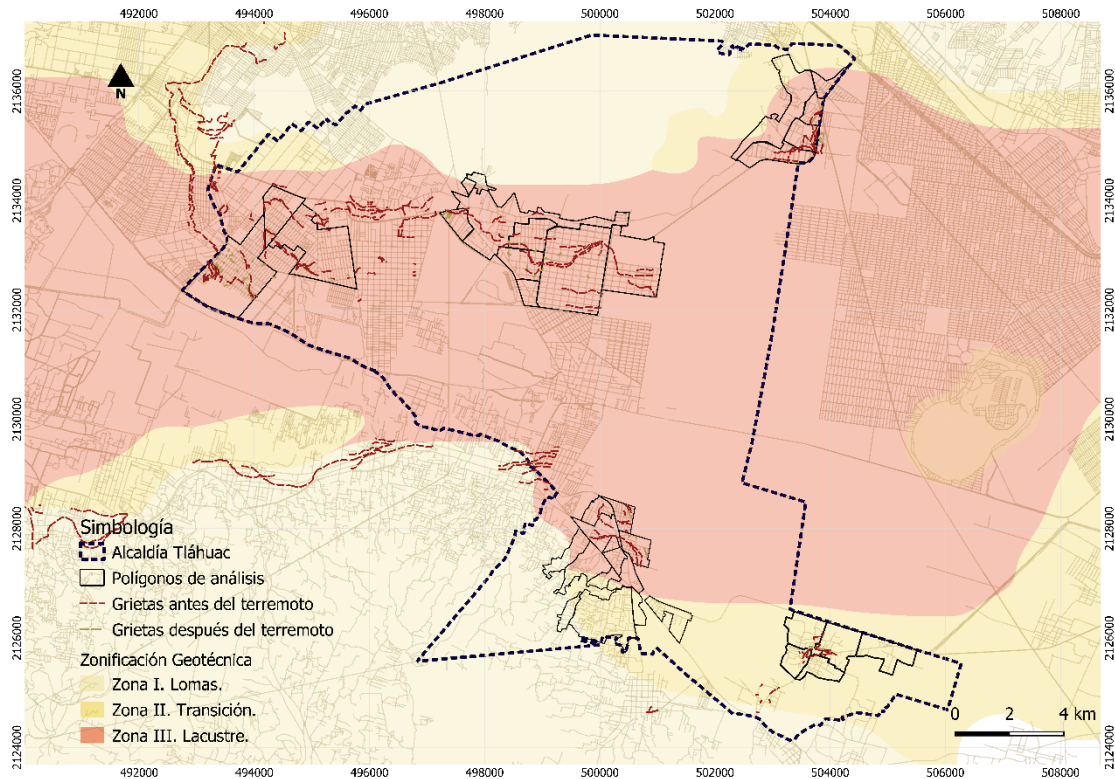


Figura 2. 5 Zonificación geotécnica de la Alcaldía Tláhuac, (NTCDCC, 2017).

De acuerdo con el Manual de Diseño Geotécnico del Metro (COVITUR) se tiene la siguiente zonificación, (Tamez et al., 1987).

Zona de lago. Las arcillas blandas que la constituyen tienen grandes espesores, su clasificación depende del espesor y de las propiedades de la costra superficial, así como de la consolidación inducida. Se divide en Lago Virgen (LV); Lago centro I (LCI), en general está sometido a sobrecargas por construcciones pequeñas; Lago Centro II (LCII), donde existen arcillas fuertemente consolidadas por rellenos y grandes construcciones, arcillas blandas y arcillas muy blandas.

Zona de transición. Según Marsal & Mazari (1959) la frontera entre la Zona de transición y la del lago es donde desaparece la serie arcillosa inferior y donde la primera Capa Dura está en los primeros 20 m de profundidad. Esta zona se divide en tres subzonas:



- Transición Alta (TAL). Está más cerca de la Zona de Lomas, tiene presencia de depósitos aluviales cruzados.
- Transición Baja (TBA). También conocida como la FAS, presenta intercalaciones de estratos limoarenosos de origen aluvial, que se originaron durante las regresiones del antiguo lago.
- Transición abrupta (TAB). Es el cambio entre la zona de lagos y los cerros aislados, presenta intercalaciones de las arcillas con lentes de minerales erosionados de los cerros, incluso hasta de travertino silicificado.

Zona de Lomas (LOM). Estos suelos presentan condiciones de cementación y compactación irregulares.

La transición entre el lago de Xochimilco y la Sierra de Santa Catarina, en la Alcaldía Tláhuac, se caracteriza por ser una transición abrupta (TAB). La mayor parte de la superficie de la Alcaldía pertenece a la zona de lago y una porción a la zona de lago virgen (LV).

2.4 Zonificación sísmica

La zonificación sísmica surge de las necesidades económicas de las ciudades, ya que, las edificaciones, obras públicas e industriales se deben edificar de modo que los sismos no alteren su funcionamiento normal.

Gran parte de la Ciudad de México esta edificada sobre grandes espesores de sedimentos blandos de los antiguos lagos que existieron en el Valle de México. Estos depósitos lacustres provocan grandes amplificaciones de las ondas sísmicas. La amplitud de las ondas sísmicas con periodos cercanos a dos segundos en la Zona del Lago puede llegar a ser 50 veces mayor que en un sitio de suelo firme de la Ciudad de México. Sin embargo, como las ondas también se amplifican en el suelo firme de la periferia con respecto a lugares lejanos de la CDMX, la amplitud puede ser de 300 a 500 veces mayor (Torres, 2017).

Las normas técnicas complementarias para diseño por sismo (NTCDS, 2017), detallan que la zonificación consta de tres zonas principales y 4 subzonas de la zona III. El Atlas de Riesgos de la Alcaldía Tláhuac, muestra que dicha alcaldía se encuentra dentro de las tres zonas sísmicas: Zona I (corresponde a la zona de lomas), Zona II (correspondiente a la zona de transición) y la Zona III (zona lacustre dividida en cuatro subzonas IIIa, IIIb, IIIc y IIId), figura 2.6.

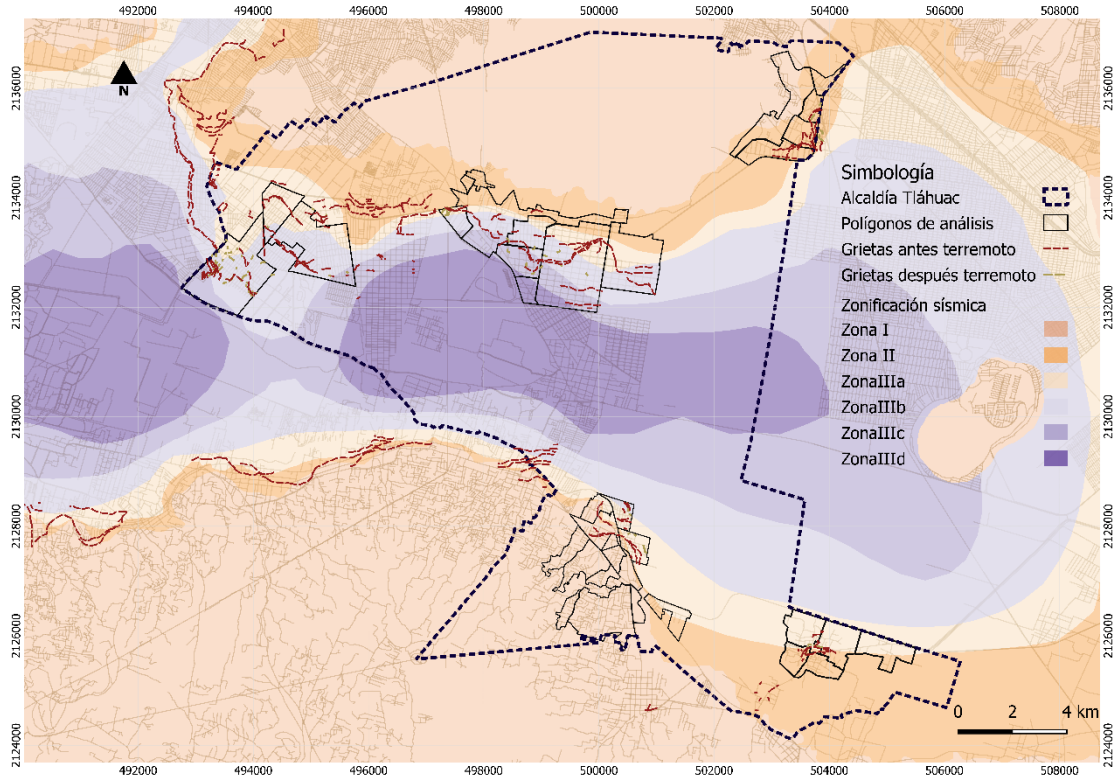


Figura 2. 6 Zonificación sísmica de la Alcaldía Tláhuac (Modificado de NTC, 2017).

2.5 Subsistencia en el Valle de México

El suministro de agua a una población en constante crecimiento representa un importante desafío de gestión. La mayoría de las extracciones de agua en la Ciudad de México se realizan del acuífero formado por materiales aluviales, constituidos esencialmente por gravas y arenas, intercaladas con productos volcánicos (lavas y escorias). Durante años, las extracciones han superado sistemáticamente la recarga natural (CONAGUA 2009).

La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce subsidencia del terreno, en la mayor parte de la cuenca varía de 5 a 10 cm anuales y existen zonas locales (Xochimilco) con hasta 35 cm/año, mientras que en áreas adyacentes a la CDMX como Zumpango, Texcoco y Chalco se tiene 40 cm/año (Ortega-Guerrero et al., 1993).

Gran parte del sistema de alcantarillado impulsado por gravedad de la Ciudad de México es fuertemente impactado por la subsidencia del terreno, debido a que modifica la pendiente, resultando deficiente. En el año de 1925 algunos ingenieros sostenían la teoría de que el lago de Texcoco se estaba azolvando y por eso ocurrían los hundimientos. Posteriormente se pensó que el secado del lago era el factor principal. En 1974 Nabor Carrillo encontró la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento (Hiriart y Marsal, 1969). La figura 2.7 ilustra el hundimiento que

se desarrolla en la Alcaldía Tláhuac, en la parte central, más del 50% de su superficie, tiene hundimientos máximos anuales de aproximadamente 20 cm.

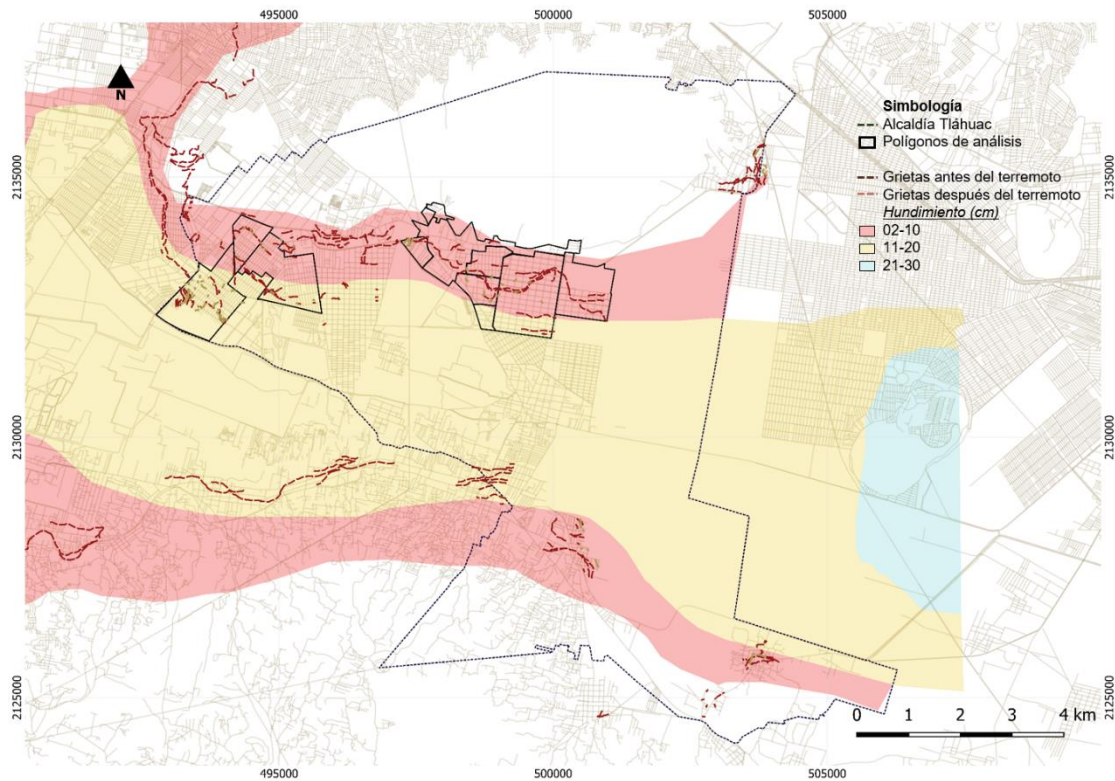


Figura 2. 7 Hundimiento diferencial de Tláhuac (Modificado del Atlas CDMX, 2014).

De acuerdo con Hernández-Espriú et al. (2014) las tasas máximas de hundimientos en la CDMX para el periodo 2003-2010 obtenidos con SqueeSAR (técnicas InSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar) de dispersión permanente (PSI) para la detección de desplazamientos del suelo utilizando datos de satélite son de -343 mm/año, figura 2.8.

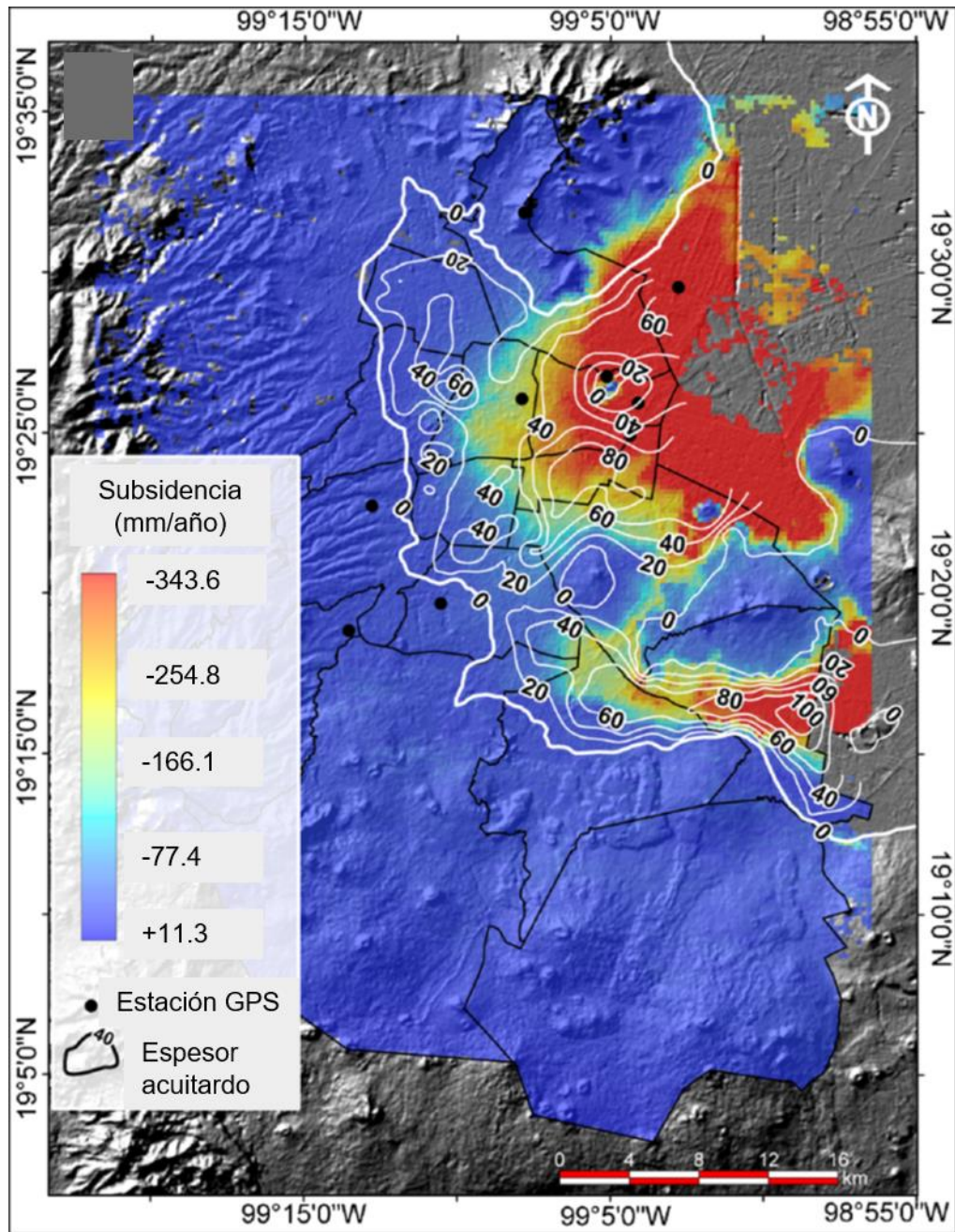


Figura 2. 8 Distribución espacial de la subsidencia del suelo en la Ciudad de México, período 2003-2010, en mm/año (Tomada de Hernández-Espriú et al., 2014).

2.6 Hidrogeología en la zona

La parte más baja de la cuenca del Valle de México (2230 msnm) formaba parte de un gran lago que, durante los períodos geológicos de mayor precipitación, media 80 km de norte a sur y unos 45 km de oriente a poniente (Marsal y Mazari, 1959; Mooser, 1963; Santoyo et al., 2005). Estos cuerpos de agua dieron origen a varios cuerpos lacustres, como el lago Zumpango y Xaltocan en la parte norte; San Cristóbal y Texcoco al centro;

Xochimilco y Chalco al sur, dependiendo de la época de inundación o sequía, estos dos últimos lagos se unían o separaban. La alcaldía de Tláhuac es un remanente del gran lago que caracterizaba a la cuenca, figura 2.9. Tláhuac fue fundada en el año 1222, los pobladores de la región cultivaban por medio de un sistema de chinampas por su localización entre el lago de Chalco y Xochimilco. La zona permaneció inmersa en actividades agrícolas por varios siglos, actualmente la constituyen 7 pueblos y la mancha urbana ha crecido en las tierras ejidales.

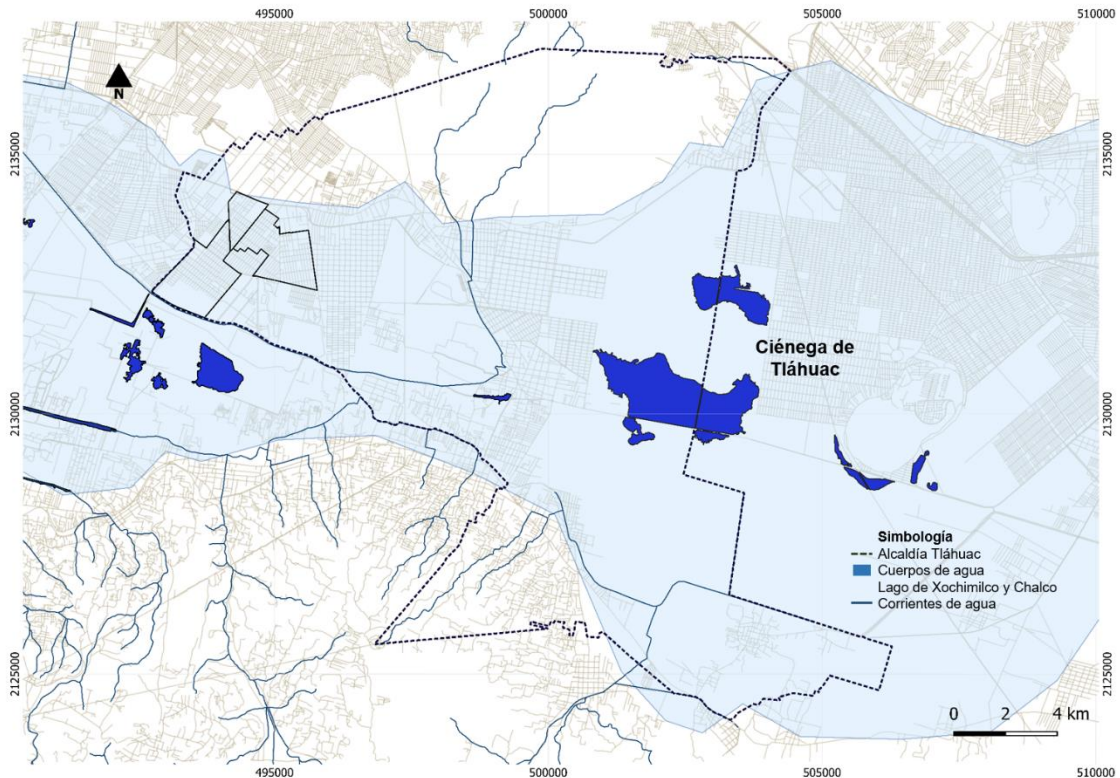


Figura 2. 9 Hidrogeología de Tláhuac (Tomada del Atlas CDMX, 2014).

La alcaldía de Tláhuac pertenece a la región hidrológica del Pánuco, a la cuenca del río Moctezuma y a la subcuenca del lago de Texcoco-Zumpango. En Tláhuac fluyen cuatro canales Chalco, Guadalupano, Atecuyac y Amecameca, los dos primeros son de importancia para la zona chinampera. Además, existen canales de menores dimensiones que configuran el sistema de riego de la zona agrícola de la región, figura 2.10.

En la parte sur oriente de la Alcaldía se localiza una zona de inundación permanente conocida como “Ciénega de Tláhuac”, la cual constituye una importante reserva ecológica de la región. Este suelo de conservación dispone importantes zonas de recarga hidrológica, las cuales han sido afectadas por el sellamiento antrópico (PDDU, 2008).

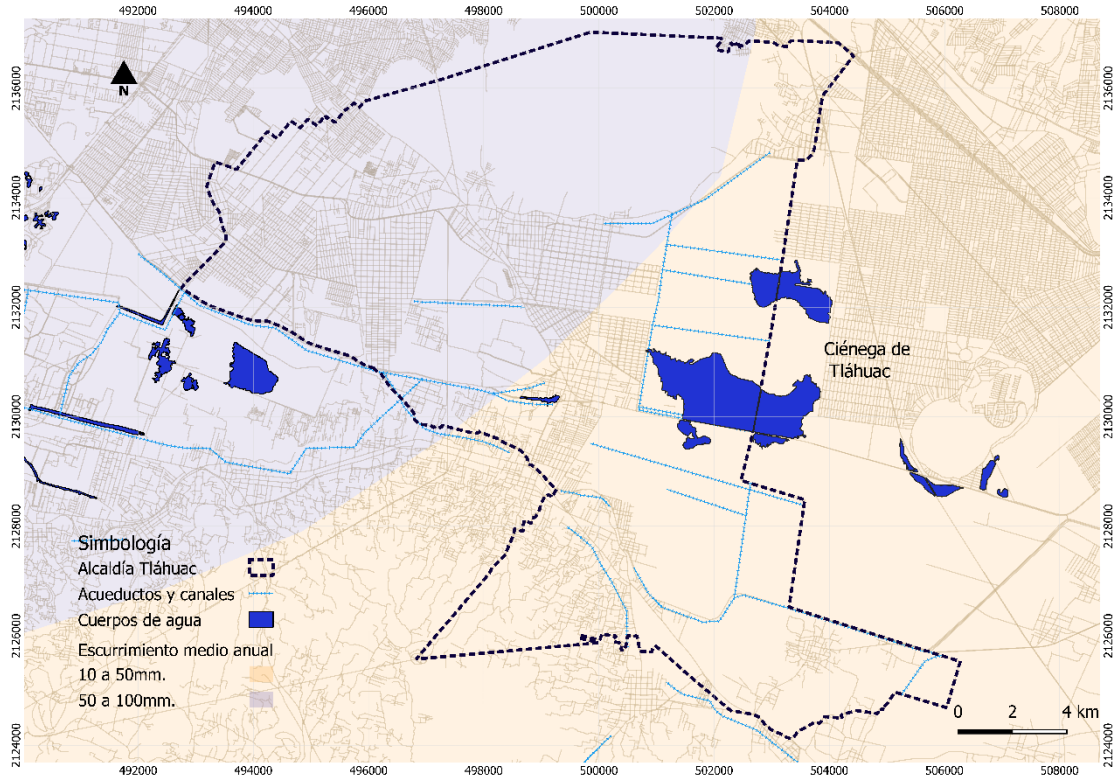


Figura 2. 10 Acueductos y canales en la Alcaldía Tláhuac (Tomada de CONABIO, 2014).

La hidroestratigrafía del sistema se puede resumir en las siguientes unidades principales (Mooser et al., 1996; Pérez-Cruz, 1988; Santoyo et al., 2005; Vázquez Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989), figura 2.11:

1. *Acuitardo confinante*: La unidad superior está formada por depósitos aluviales, fluviales y lacustres del Cuaternario, dominados por sedimentos finos saturados, intercalados con arenas, lentes pumíticos y gravas escasas. El espesor promedio del acuitardo es de ~ 40 a 50 m dentro de la Ciudad de México. Los sectores más gruesos (350-400 m) se encuentran fuera de los límites de la ciudad, alrededor de las áreas de la cuenca de Chalco y Texcoco (Vargas y Ortega-Guerrero, 2004).
2. *Acuífero granular superior*: Formado por depósitos aluviales cuaternarios, rocas volcánicas y piroclásticas, y rocas pliocuaternarias basálticas-andesíticas. Es el acuífero que proporciona agua potable a la mayor parte de la población de la CDMX. La profundidad del agua subterránea varía entre 60 y 170 m, mientras que el espesor saturado puede exceder los 800 m en algunas áreas. Los pozos de extracción se colocan después de los 300-400 m de esta unidad (Herrera et al., 1989). El área de la Ciudad de México se extiende a lo largo de ~ 1.500 km², de los cuales el 30% corresponde a la superficie del acuitardo. Por tanto, una gran parte del acuífero no está confinado. Antes de la extracción intensa (década de 1950), el acuífero principal



se comportaba como un acuífero con fugas en toda la extensión del acuitardo. Actualmente, hay varias partes donde la superficie potenciométrica está debajo de la interfaz acuitardo-acuífero.

3. *Acuífero fracturado inferior*: Esta unidad está formada por rocas andesíticas del Mioceno y materiales basálticos y riolíticos del Oligoceno. En la parte superior predominan las arcillas lacustres pliocénicas, mientras que en el sector inferior predominan los conglomerados y lutitas de la Formación Balsas y Mezcala, respectivamente (Mooser et al., 1996). El espesor oscila entre 830 y 2590 m, según datos de los pozos Mixhuca y Roma-I. Estos pozos fueron perforados por la compañía petrolera estatal de México (PEMEX) a finales de la década de 1980.

4. *Basamento del Cretácico*: La unidad inferior está formada por calizas, areniscas y lutitas masivas plegadas y fracturadas. Los pozos Mixhuca, Texcoco-I y Tulyehualco, llegaron a esta unidad a 1600, 2060 y 2100 m de profundidad respectivamente. La existencia de zonas kársticas y/o fracturadas se infirió a partir de la pérdida de fluidos de perforación (Huizar-Alvarez et al., 2004). Recientemente (2012-2013), el Sistema de Agua de la Ciudad de México perforó un pozo de exploración de 2 km (pozo San Lorenzo Tezonco) en la Alcaldía de Iztapalapa para evaluar el potencial de la formación de la roca caliza para el suministro de agua. Aunque nunca se llegó a la unidad, se encontró que las rocas andesíticas saturadas (unidad volcánica inferior) eran permeables a profundidades de 1500 a 2000 m (Gaceta UNAM 2013).

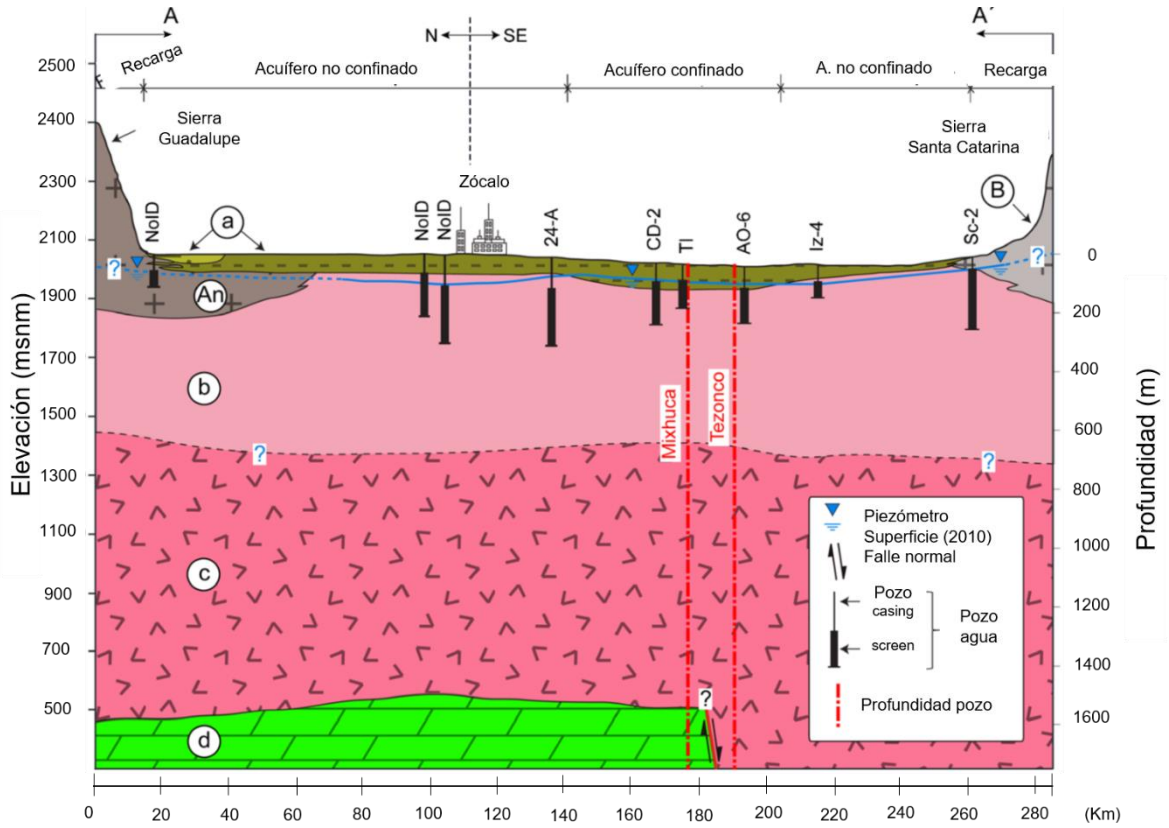


Figura 2. II Entorno geológico e hidrogeológico. Unidad a: acuitardo, Unidad b: Acuífero granular superior, Unidad c: Acuífero inferior fracturado, Unidad d: Basamento del Cretácico. An-andesita, B-basalto (Tomada de Hernández-Espriú et al., 2014).



CAPÍTULO 3.

3. Agrietamiento en Tláhuac

La posición geográfica de la Alcaldía Tláhuac (entre los lagos de Xochimilco y Chalco) favoreció el desarrollo de zonas chinamperas de cultivo que actualmente se encuentran urbanizadas tras una serie de modificaciones caóticas y sostenidas en informaciones poco técnicas sobre el mejor uso de los suelos. Tláhuac se limita en la parte norte con la Sierra de Santa Catarina y al sur con la Sierra de Chichinautzin, la discrepancia topográfica y de las propiedades entre la zona de sierra y lago, favoreció el agrietamiento del suelo justamente en la transición entre ambas.

Las capacidades y cualidades de los estratos de la transición son principalmente por los asentamientos diferenciales. La afectación por estos movimientos se da principalmente en las estructuras bajo-superficie y sobre-superficie. Los asentamientos se relacionan con el proceso de consolidación de los suelos blandos con características heterogéneas y este fenómeno se incrementa o exacerba por la explotación de los mantos acuíferos que intentan satisfacer la demanda de agua potable de los habitantes del Valle de México (Marsal y Sáinz, 1956; Lesser y Cortés, 1998).

El Atlas de Peligro y Riesgo de las Alcaldías de Iztapalapa, Xochimilco, Milpa Alta, Tláhuac (SPC, 2014) argumenta que los factores que desencadenan los agrietamientos son:

1. La sobre explotación de los acuíferos
2. La heterogeneidad

La figura 3.1 representa la ubicación espacial de los pozos de CONAGUA y las grietas registradas en la Alcaldía Tláhuac. Observe que sin duda hay relación entre la posición de los pozos y la mayor concentración de discontinuos. Habrá que sumar a esta coincidencia espacial que en estas regiones se presentan rellenos superficiales con pobre a nula capacidad de carga.

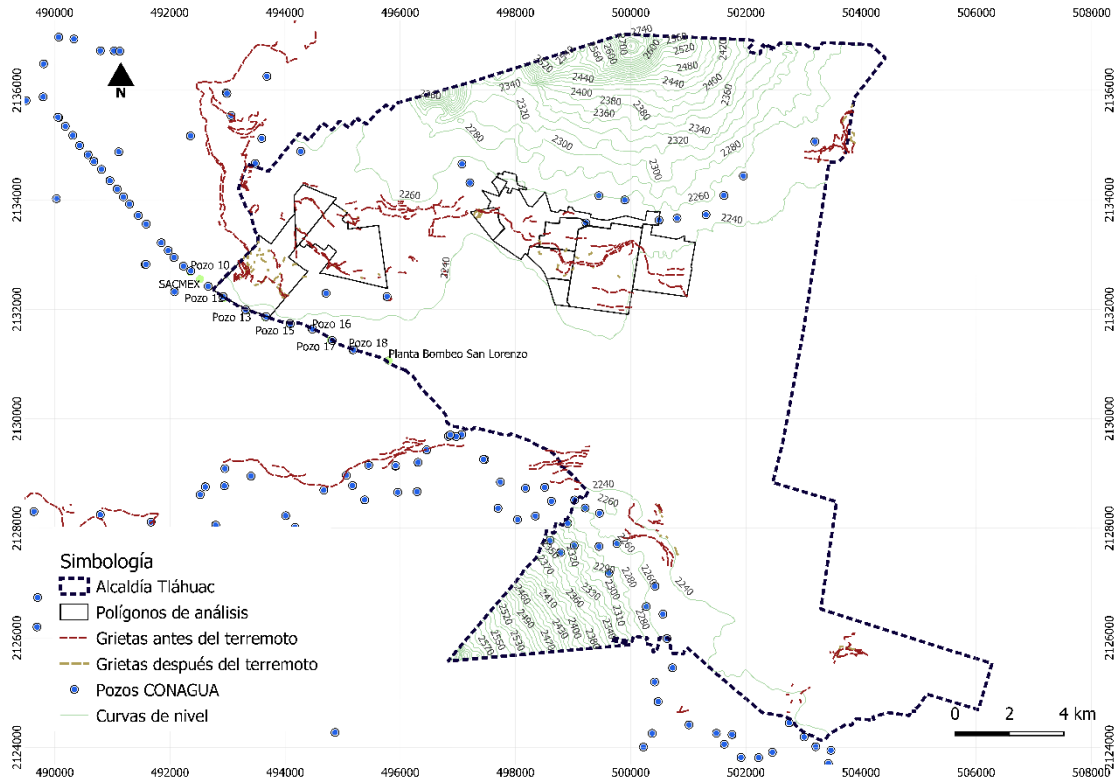


Figura 3. 1 Ubicación de algunos de los pozos de bombeo en la Alcaldía Tláhuac.

En la zona agrietada se reconocen discontinuos que serán llamados “grietas por fractura hidráulica (zonas de encharcamiento)”, “grietas por transición abrupta” y iii. “grietas por contactos (heterogeneidad)”.

3.1 Modelo de Riesgo por Agrietamiento

La región bajo estudio en Tláhuac (figura 3.2) se dividió en cinco polígonos de acuerdo con las zonas de mayor afectación causadas por el sismo de 2017.

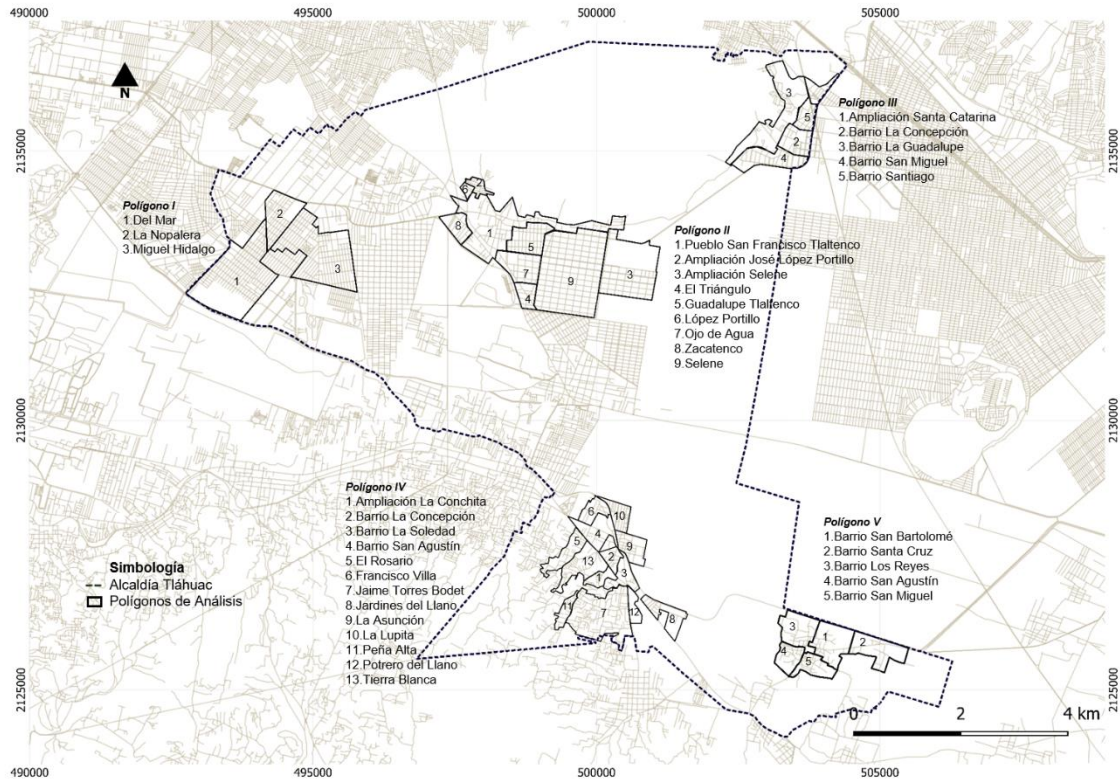


Figura 3. 2 Polígonos de estudio en Tláhuac (García-Benítez et al., 2019).

El presente trabajo se enfoca en dos polígonos (figura 3.3), los más fuertemente agrietados, para mostrar el método de análisis y el tipo de resultados obtenidos. Las colonias/pueblos contenidos en cada uno son:

1. Polígono I-Colonia Del Mar, Colonia Miguel Hidalgo y Colonia Nopalera.
2. Polígono II-Pueblo San Francisco Tlaltenco, Ampliación José López Portillo, Ampliación Selene, El Triángulo, Guadalupe Tlaltenco, López Portillo, Ojo de agua, Zacatenco y Selene.

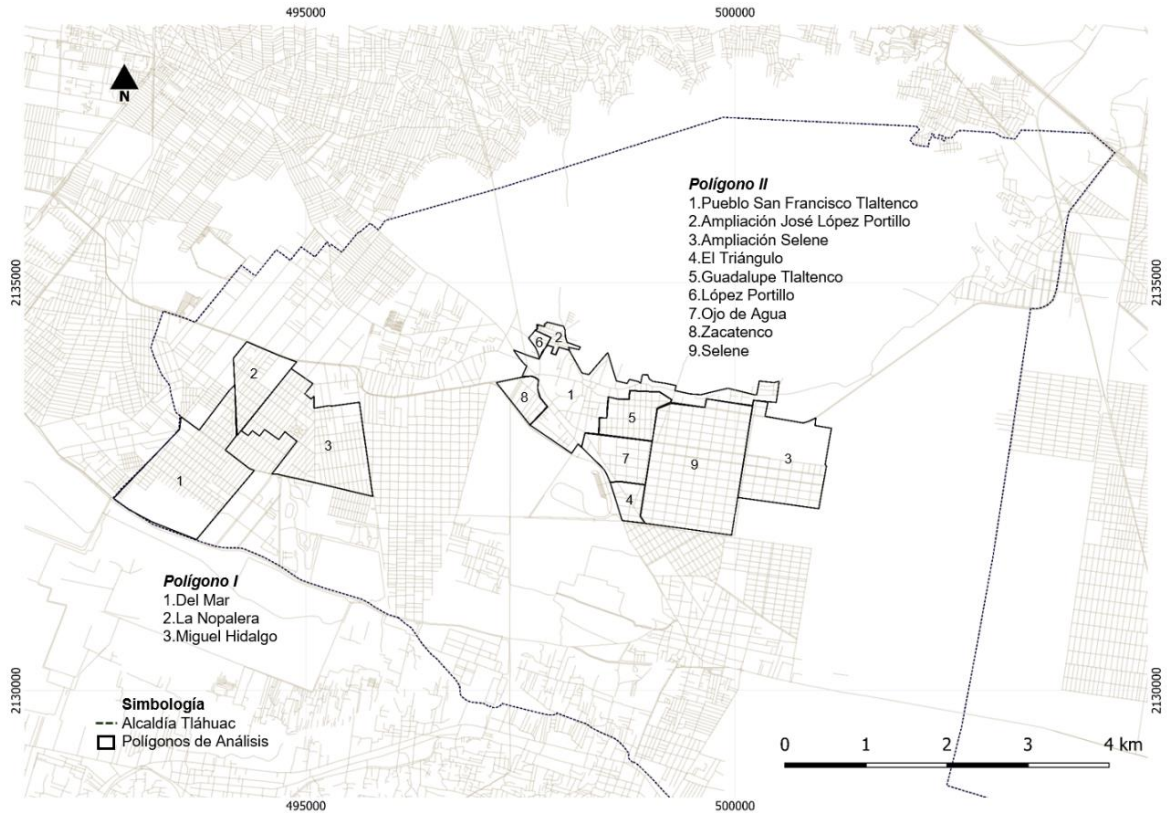


Figura 3. 3 Localización de los polígonos de estudio I y II.

3.2.1 Pruebas realizadas en el área de estudio

La campaña de exploración consistió en estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos. Los sondeos realizados se ubicaron en sitios estratégicos con el fin de caracterizar las zonas afectadas. Entre los estudios realizados destacan:

- Análisis de microtremores

Se ejecutaron 716 registros de ruido sísmico ambiental o mediciones de microtremores en las Alcaldías de Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuc, específicamente en áreas donde se tuvo mayor afectación por el sismo de 2017, con los datos obtenidos se establecieron los periodos dominantes del suelo, sus niveles de amplificación y el espesor de los estratos blandos, y así determinar las zonas de lomas, transición y lago en la Alcaldía Tláhuc (García et. al., 2019).

Los periodos de vibración del suelo se realizaron con la técnica del cociente espectral H/V, como resultado se obtuvo el mapa de isoperiodos para la subcuenca Xochimilco-Chalco, figura 3.4. Los periodos más grandes se presentan en el centro del lago de Xochimilco (5.6 s) y en el centro del lago de Chalco (5.9 s). La zona que separa a los lagos presenta un periodo menor a 4.0 s. El cambio en el periodo es más suave en la Sierra de Santa Catarina que en la Sierra de Chichinautzin, donde ocurre de manera abrupta de 0.5 a



4.0 s. Los periodos en la parte suroeste de la Sierra de Santa Catarina muestran un comportamiento complicado. En el límite entre las Alcaldías Iztapalapa y Tláhuac existe un cambio abrupto, hacia el oeste, se muestra una estructura que parte del volcán Yuhualixqui, al oeste de la Sierra de Santa Catarina y alcanza los límites de la alcaldía Tláhuac con el lago de Xochimilco. Esta estructura se asocia a un derrame basáltico del volcán.

Los resultados de los periodos son diferentes de los periodos de las NTC, la curva de isoperiodos más grande para el mapa de las normas técnicas es de 4.0 en las zonas de Xochimilco y Chalco, mientras que los resultados de García et. al., 2019 muestra periodos mayores a 5.0 s para ambas ubicaciones.

La distribución de los agrietamientos muestra que se ubican en la zona de transición entre las Sierra de Chichinautzin y Santa Catarina, y los lagos de Xochimilco y Chalco. La gran mayoría de los agrietamientos se presentan entre las curvas de isoperiodos de 0.5 y 2.0 s, así como los daños estructurales.

La máxima profundidad a los depósitos profundos se encuentra en la zona del lago de Chalco (mayores a 120 m) junto con el lago de Xochimilco que alcanza valores mayores a 90 m. Las normas técnicas complementarias muestran valores de H_s para la zona del lago de Xochimilco un valor máximo de 40 m, mientras que para la zona del lago de Chalco es mayor a 50 m. En los trabajos realizados para la línea 12 del metro de la Ciudad México se encontró que en la última estación y en el punto TLHB las profundidades a los depósitos profundos oscilan entre los 80 y 100 m, para este sitio los espesores calculados varían entre 70 y 90 m. El punto TLHD tiene un valor aproximado de 50 m, mientras que el valor calculado esta entre 40 y 50 m, figura 3.5. Para los pozos profundos Tulyehualco-I y Santa Catarina 3A, el valor observado se encuentra entre 80 y 100 m, el valor calculado oscila entre 70 y 80 m. Para la zona de Chalco, el perfil realizado por Chouteau et al. (1994) muestra que el espesor de la capa de arcilla en la zona profunda del lago es mayor a los 100 m, mientras que el valor calculado es de 120 m.

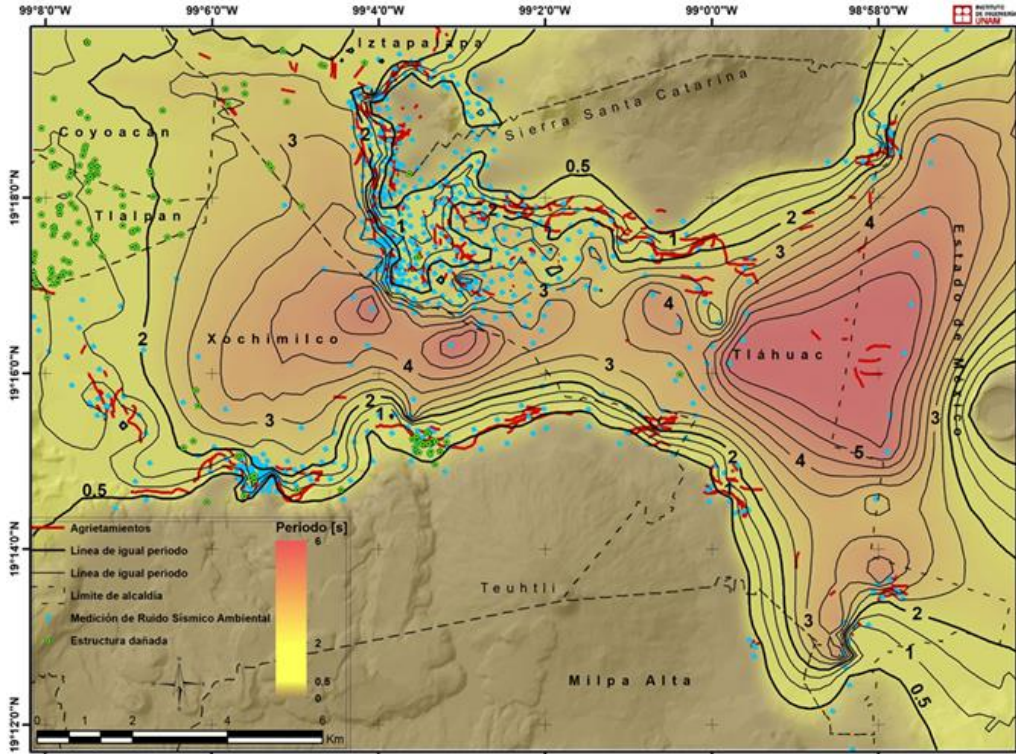


Figura 3. 4 Mapa de periodo dominante del suelo (T_s) de la subcuenca de Xochimilco-Chalco (Tomada García et al., 2019)

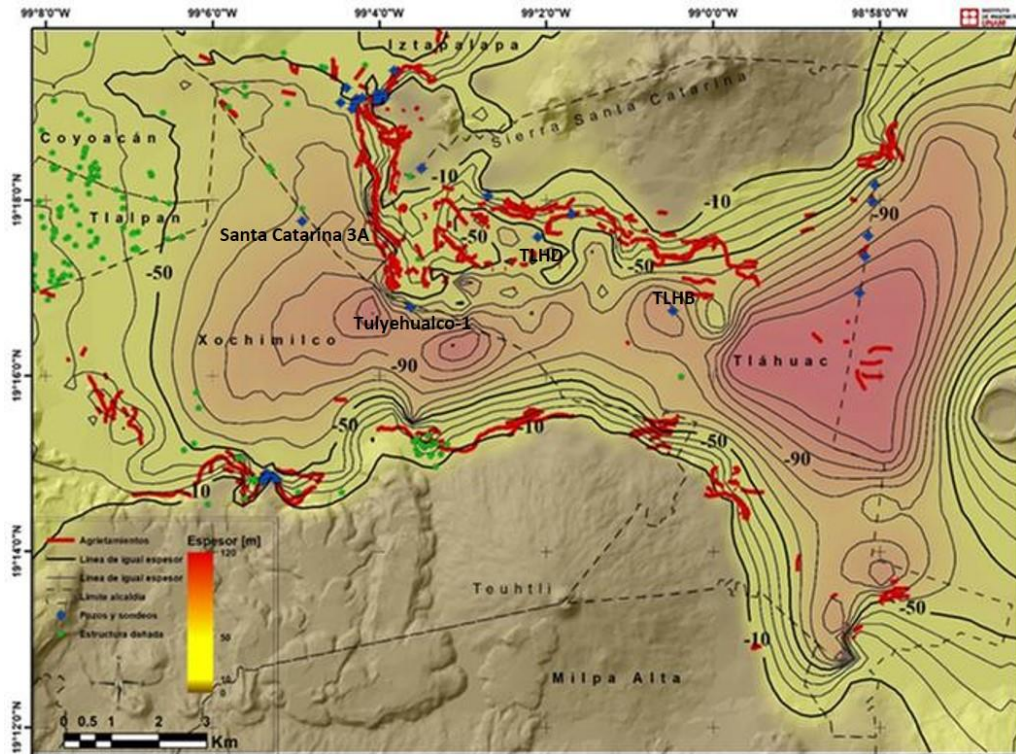


Figura 3. 5 Mapa de isopropfundidad a la cima de los derrames basálticos o al contacto entre la arcilla inferior y los depósitos profundos (H_s) (Tomada García et al., 2019).

- Pruebas SPT

Terzaghi en 1947 la denominó Prueba de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en inglés). En 1958 fue adaptada por la ASTM, como la Norma D1586, precisando las dimensiones del muestreador y el procedimiento de ensayo (ASTM, 2008). Para identificar el tipo de suelo de cada estrato y con ello definir la estratigrafía del lugar de interés, se realizaron alrededor de 90 pruebas SPT (figura 3.6), además, con las muestras recuperadas, en el laboratorio se determinaron las propiedades índice de los materiales.

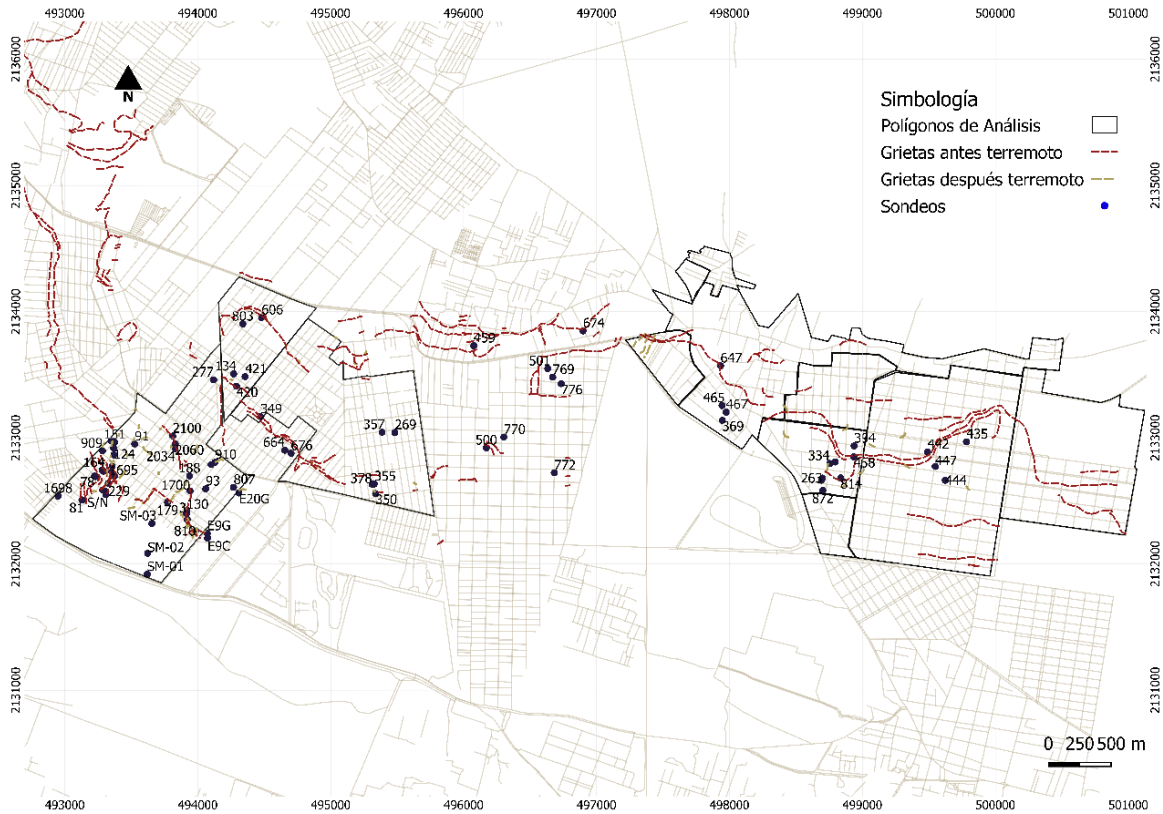


Figura 3. 6 Posición de los Sondeos Mixtos en los polígonos I y II.

La distribución del número de golpes en las pruebas de penetración estándar, se presenta en la figura 3.7 para el polígono I, en los primeros 8 m de profundidad existe un material de mayor resistencia a la penetración que el resto del suelo. En el polígono II, también se observa esta particularidad, pero a mayor profundidad y resistencia.

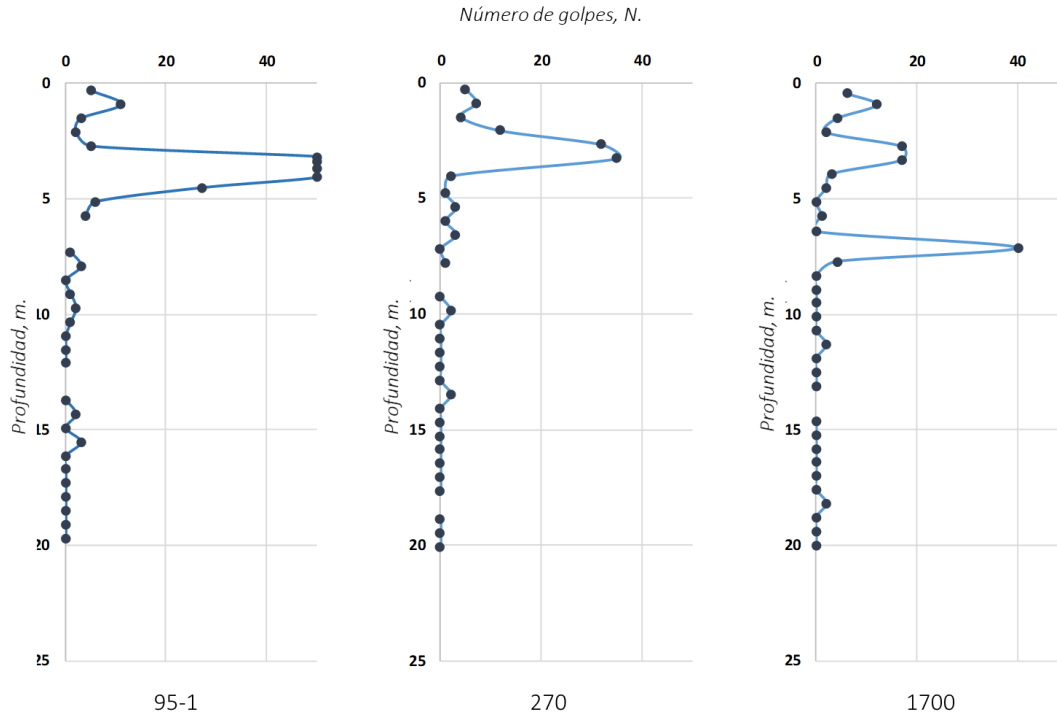


Figura 3. 7 Sondeos de penetración estándar.

La estratigrafía, en general, está constituida por un estrato de arcilla con grados de plasticidad y compresibilidad muy variantes y rellenos superficiales de pobre o nula capacidad de carga. En la figura 3.8 se observa la estratigrafía típica de la zona.

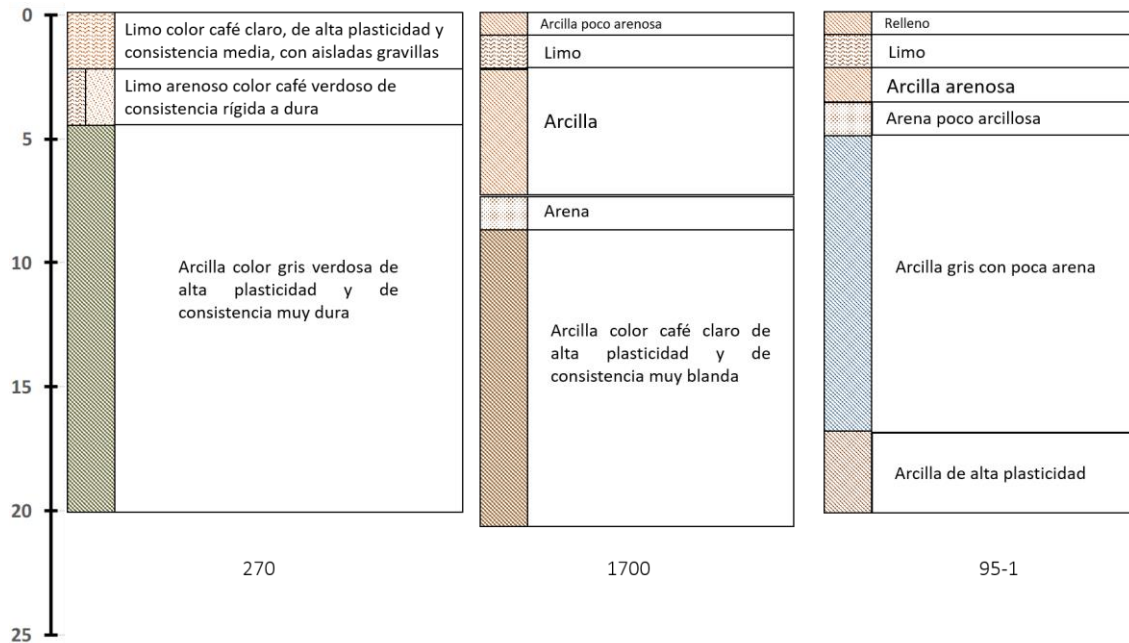


Figura 3. 8 Estratigrafía de la Alcaldía Tláhuac.

- Análisis en laboratorio (geotecnia) de muestras de suelo

Las propiedades índice sirven para clasificar de manera cualitativa al suelo, entre las que destacan son: el contenido de agua, relación de vacíos, peso unitario, distribución granulométrica, límites de consistencia, entre otras. El contenido de agua (w) es una propiedad muy importante, ya que, nos da indicadores del comportamiento del suelo, por ejemplo, cambios de volumen, cohesión y estabilidad mecánica. La norma ASTM D2216-19, describe el procedimiento para obtener esta propiedad en el laboratorio.

Los resultados del contenido de agua tanto para el polígono I y II tienen variaciones importantes, los valores mínimos oscilan entre 20% y menos de 80%, llegando a contenidos de agua máximos de más de 400% a diferentes profundidades. Una peculiaridad que se distingue en los primeros cinco metros de profundidad en la región, es el bajo contenido de agua pasando a un estrato de mayor contenido, figura 3.9.

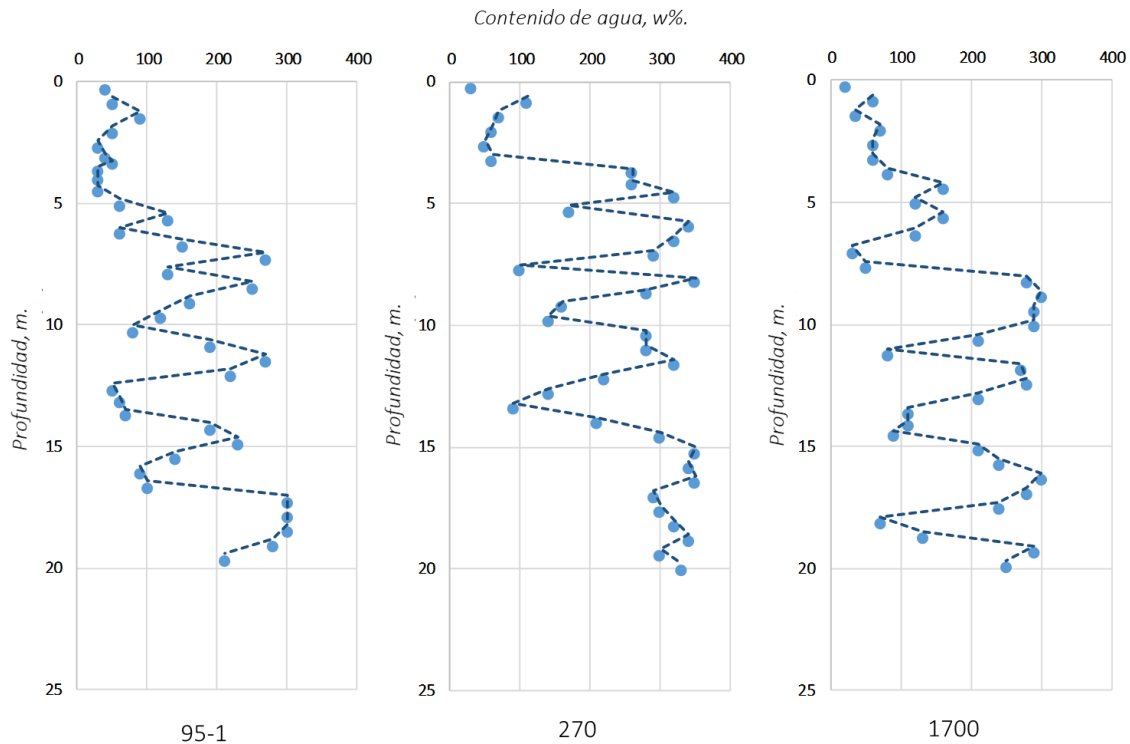


Figura 3. 9 Variación del contenido de agua.

Los límites de consistencia fueron propuestos inicialmente por Terzaghi & Peck (1967), quienes observaron que dependen directamente de la forma, del tamaño efectivo y la uniformidad de las partículas de un suelo (Mitchell & Soga, 2005). Atterberg propuso de manera convencional las fronteras entre cada uno de los estados que puede tener el suelo al ir perdiendo agua. Al límite entre el estado semilíquido y plástico, lo denominó límite líquido; la frontera entre el estado plástico y el semisólido, límite plástico. En total propuso 6 límites, pero los más utilizados en mecánica de suelos son los mencionados anteriormente.



El límite líquido y el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$) constituyen unidos una medida de la plasticidad del suelo, cuando el límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP) son grandes, se dice que son suelos muy plásticos, por el contrario, se denominan ligeramente plásticos. Un suelo de alta plasticidad requiere más fuerza para ser deformado y se deforma en mayor medida sin agrietarse, que a uno de baja plasticidad el cual se rompe más fácilmente. En la figura 3.10 se observa que en los primeros cinco metros los suelos presentan una baja plasticidad.

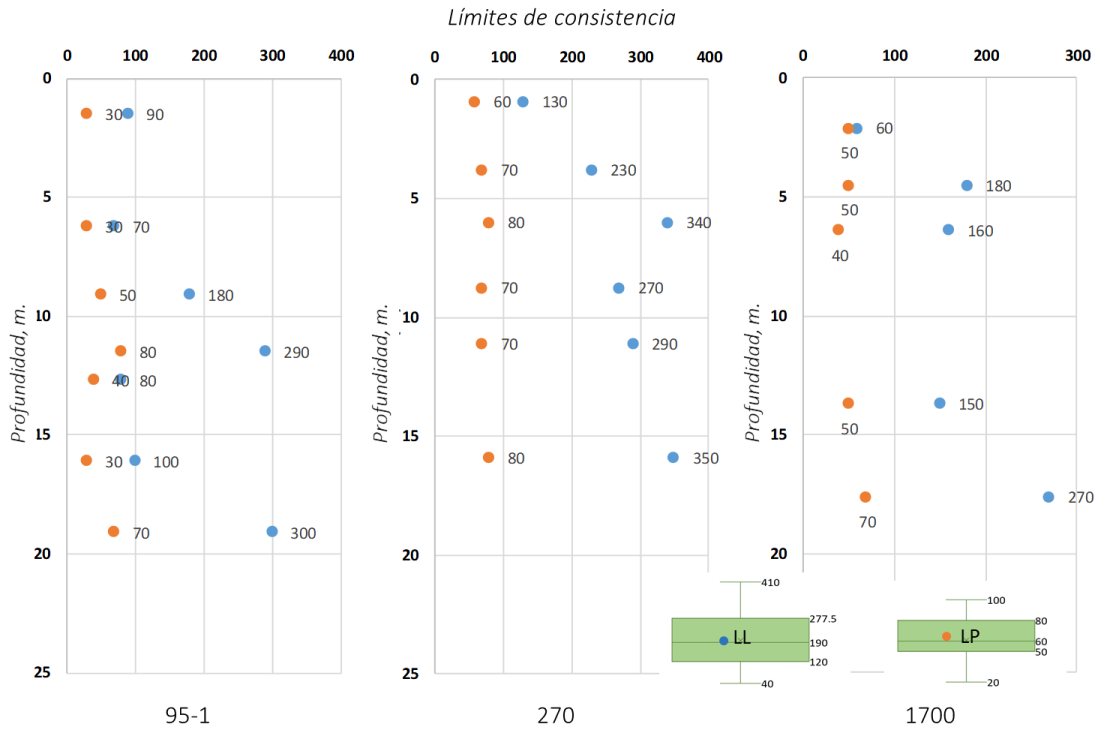


Figura 3. 10 Ejemplo de la variación de los límites de consistencia en el polígono I, se observa el diagrama de caja y bigotes.

La tabla 3.1 muestra las propiedades geotécnicas determinadas en el laboratorio de algunos pozos ubicados en el sitio.

Tabla 3. I Propiedades geotécnicas de los suelos.

Sondeo	95-1	270	1700
NAF (m)	2	1.6	2.1
Densidad de sólidos, Gs	2.53	2.41	2.52
Peso volumétrico, γ_m (t/m ³)	1.65	1.16	1.265
Relación de vacíos, e	1.4	6.145	3.93
Resistencia, q_u (t/m ²)	2.5	3.9	4.2
Cohesión, C (t/m ³)	0.5	3.4	8
Ángulo de fricción, ϕ	20	17	6

3.3 Modelo matemático

La Alcaldía Tláhuac ha sido afectada por la manifestación de discontinuidades que dañan su infraestructura con registro antes y después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Atlas de riesgo de la CDMX Y CENAPRED), figura 3.II. Dada la enorme cantidad de kilómetros que afectan a las zonas, que además están entre las más pobladas de la Alcaldía, es fundamental que se aclaren los niveles de riesgo en cada región.

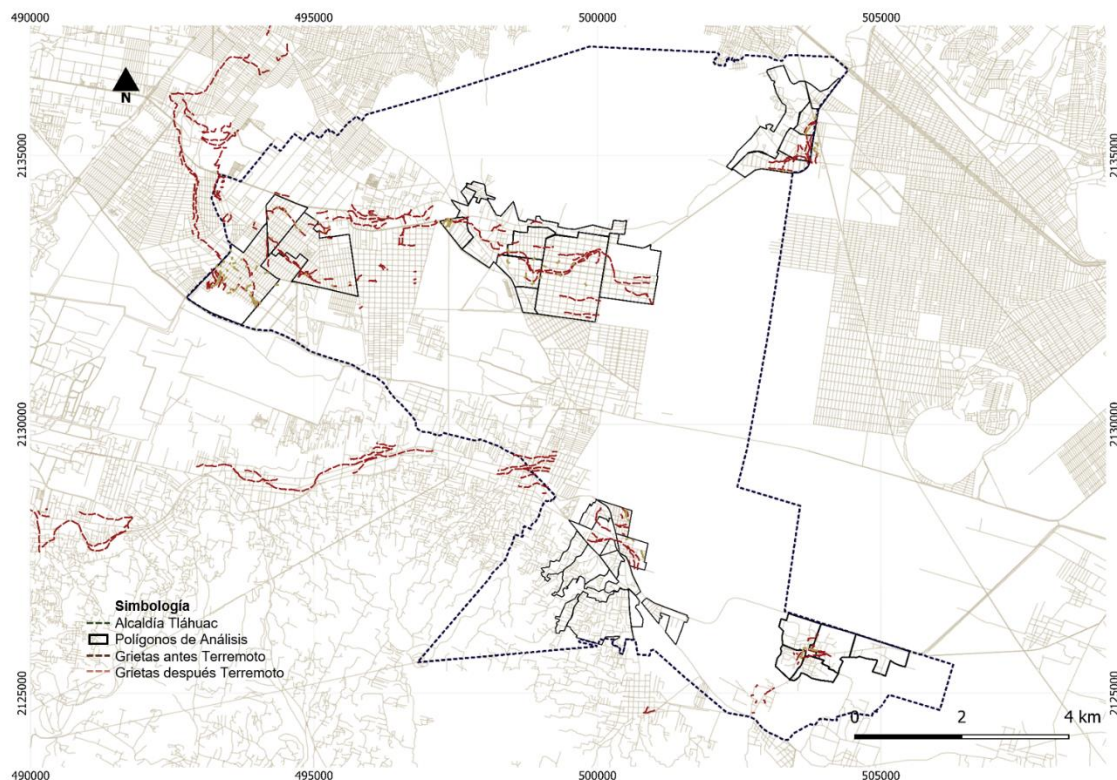


Figura 3. II Manifestación de grietas antes y después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Modificado de CENAPRED).



Para desarrollar el modelo primero es fundamental entender el significado de “riesgo”. De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres también conocido como ISDR por sus siglas en inglés, el **riesgo** se define como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. En esta investigación se aproxima al riesgo por agrietamiento con base en el siguiente planteamiento:

RIESGO = AMENAZA X VULNERABILIDAD

La **vulnerabilidad** son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza:

VULNERABILIDAD = EXPOSICIÓN X SUSCEPTIBILIDAD / RESILIENCIA

Donde:

Exposición: Es la condición de desventaja debido a la ubicación, posición o la localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo.

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

Resiliencia: La capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas.

La **amenaza** es un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales.

El **área geoestadística básica (AGEB)** se divide en urbana y rural, de acuerdo con el INEGI es una subdivisión de los municipios o delegaciones del país, perfectamente reconocible en el terreno, delimitada por rasgos topográficos identificables y perdurables (calles, avenidas, brechas, rasgos físicos naturales, entre otros), sus características geométricas, económicas y sociales son homogéneas. La AGEB urbana es un área geográfica dentro de una localidad urbana (población mayor o igual a 2500 habitantes) o en las cabeceras municipales, el uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comerciales. La AGEB rural es un área que contiene un conjunto de localidades rurales (< 2500 habitantes), asentadas en terreno de uso agropecuario o forestal (INEGI, 2010).

Entonces, el riesgo por agrietamiento se define como:

$$\text{RIESGO AGRIETAMIENTO} = \frac{\text{AMENAZA (ANTRÓPICA/NATURAL)}}{\text{LA AGEB}} \times \frac{\text{EXPOSICIÓN DE LA AGEB}}{\text{RECUPERACIÓN DE LA AGEB}} \times \frac{\text{SUSCEPTIBILIDAD DE LA AGEB}}{\text{RECUPERACIÓN DE LA AGEB}}$$

3.3.1 Amenaza

La explotación de los mantos acuíferos para satisfacer la demanda de agua potable representa el descenso del nivel de agua en la zona de estudio, este fenómeno es una de las principales amenazas, ya que, favorece la presencia de discontinuos en el área. La concentración de esfuerzos vence la resistencia de los materiales a romperse y este rompimiento se puede manifestar de diferentes maneras (figura 3.12). La geometría y continuidad de estos rompimientos dependen en gran medida de la forma del basamento.

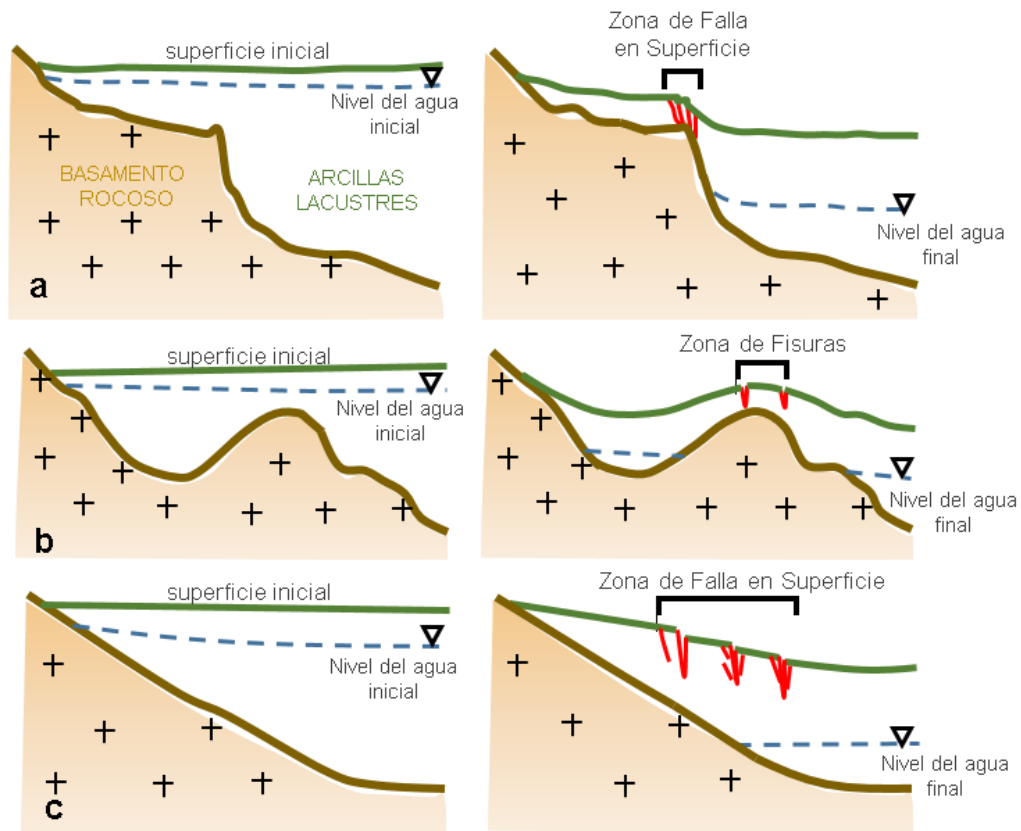


Figura 3. 12 Mecanismo de agrietamiento en la Alcaldía de Tláhuac (Tomada de García et al., 2019).

La variación del nivel de aguas freáticas (NAF), particularmente en la región donde cambia de manera abrupta de niveles casi superficiales a profundos (superiores a 4 m), es considerada la manifestación de la amenaza para la zona, figuras 3.14 y 3.15. La expresión espacial es producto del análisis de una base compilada de campañas ejecutadas posteriores al sismo de 2017. Para el análisis con redes neuronales, se estableció la estructura de los datos de entrada $NAF = f(X, Y, Z)$. Dentro del ciclo iterativo está el crecimiento de la base de datos que parte de los datos originales y que se va alimentando de valores virtuales en X, Y, Z distintos a los contenidos en el conjunto de entrenamiento. Durante este proceso de retroalimentación se refuerzan las relaciones espaciales a la vez que se integra una base de datos más homogénea y cuyos componentes virtuales cubren toda la zona de estudio.



Del total de ejemplos (instancias) para el entrenamiento de la red se separó el 90% del total de casos y el 10% restante se utilizó para validación, figura 3.13.

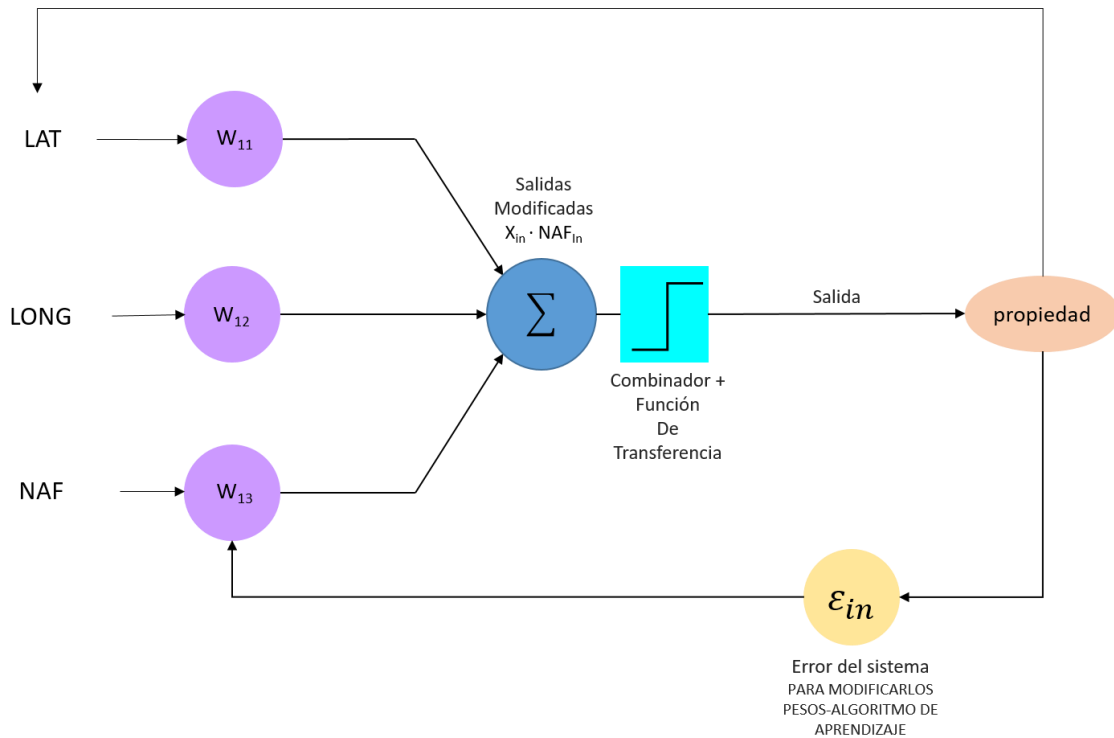


Figura 3. 13 Funcionamiento de la red neuronal para el análisis del NAF.

El polígono I presenta una variación del nivel del NAF de superficial > 0.5 m a una profundidad aproximada de 5 m. La colonia del Mar es una de las zonas más afectadas por el sismo de 2017, no es coincidencia que las grietas se manifiesten en zonas de alta amenaza (cambio abrupto del nivel), figura 3.14. Es importante entender que el valor de la profundidad del NAF no es tan importante como el significado de las Z's relativas.

La variación del nivel del NAF en el polígono II tiene un rango desde lo superficial (0.3 m) llegando a los 8 m de profundidad como máximo, estos valores se verán afectados, en la medida con que se cuente con mayor número de mediciones, figura 3.15.

Las zonas verdes en las figuras 3.14 y 3.15 representan las transiciones abruptas del contenido de agua (NAF) en el polígono I y II respectivamente. En estas zonas existe una alta amenaza y por ende el riesgo de agrietamiento del suelo.

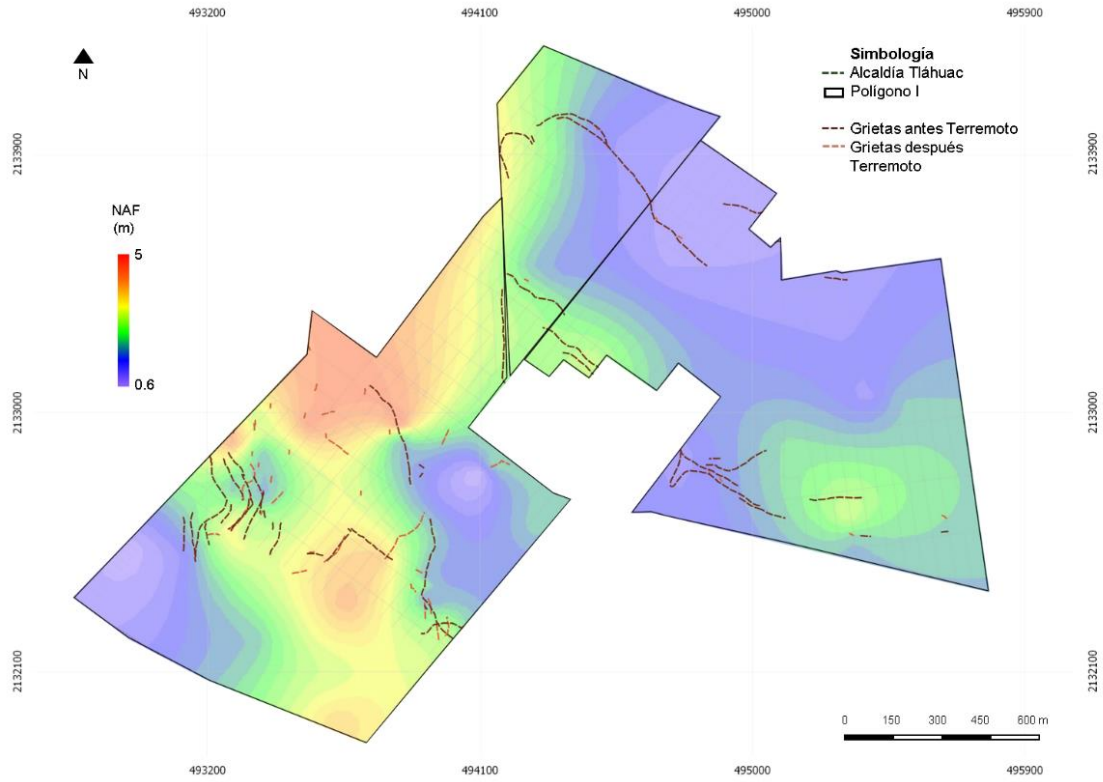


Figura 3. 14 Variación espacial del NAF en el polígono I.

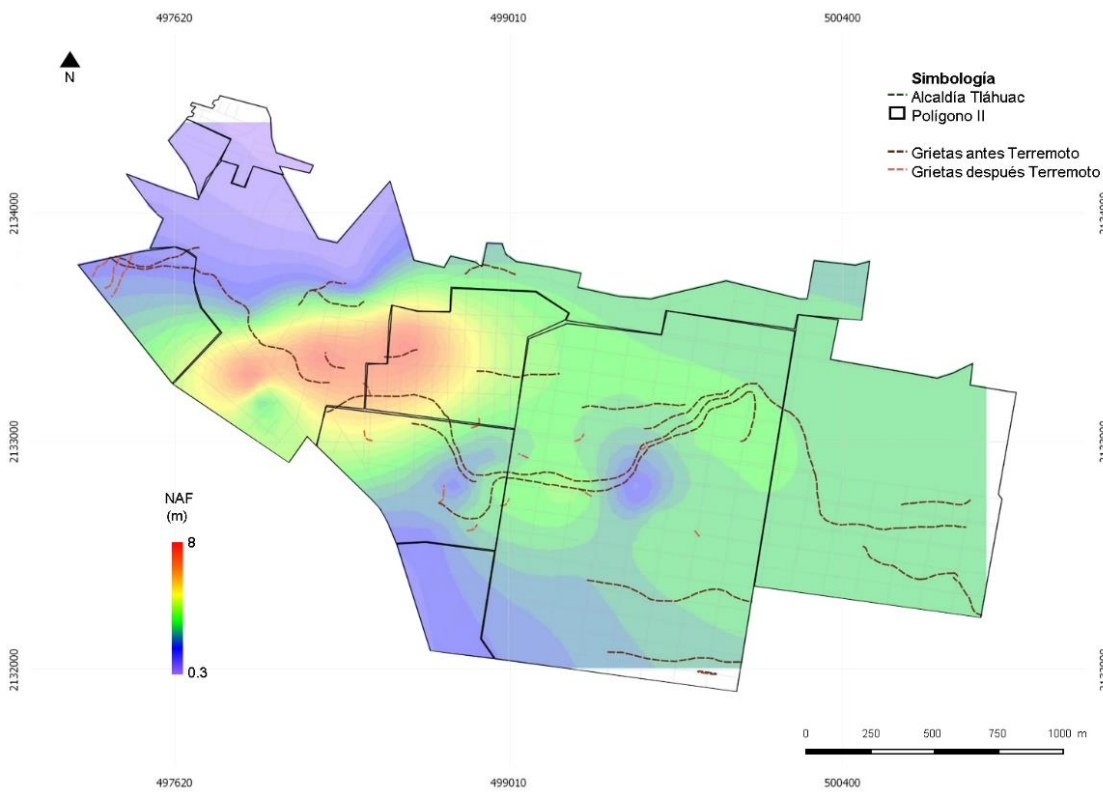


Figura 3. 15 Variación espacial del NAF en el polígono II.



El 19 de septiembre de 2017 ocurrió un sismo de magnitud M7.1 entre los estados de Puebla y Morelos, el epicentro se originó aproximadamente 120 km de la CDMX. El movimiento tectónico desarrolló un sismo de intraplaca, de profundidad intermedia, producido por esfuerzos extensivos a lo largo de la placa de Cocos. Las fallas geológicas asociadas a estos sismos se conocen con el nombre de “fallas normales”. Es preciso mencionar que este sismo ha sido el más fuerte vivido en la historia reciente de la CDMX y posiblemente el más grande reportado en todo el mundo, esto es posible a que la gran parte de la Ciudad de México está edificada sobre sedimentos blandos de los antiguos lagos que existieron en el valle, los cuales provocan una enorme amplificación de las ondas sísmicas (Cruz et al. 2017).

La aceleración máxima del suelo, PGA, en terreno firme del sismo de falla normal del 2017 es casi dos veces la del sismo de subducción de 19 de septiembre de 1985, figura 3.16 (Jaimes, 2017).

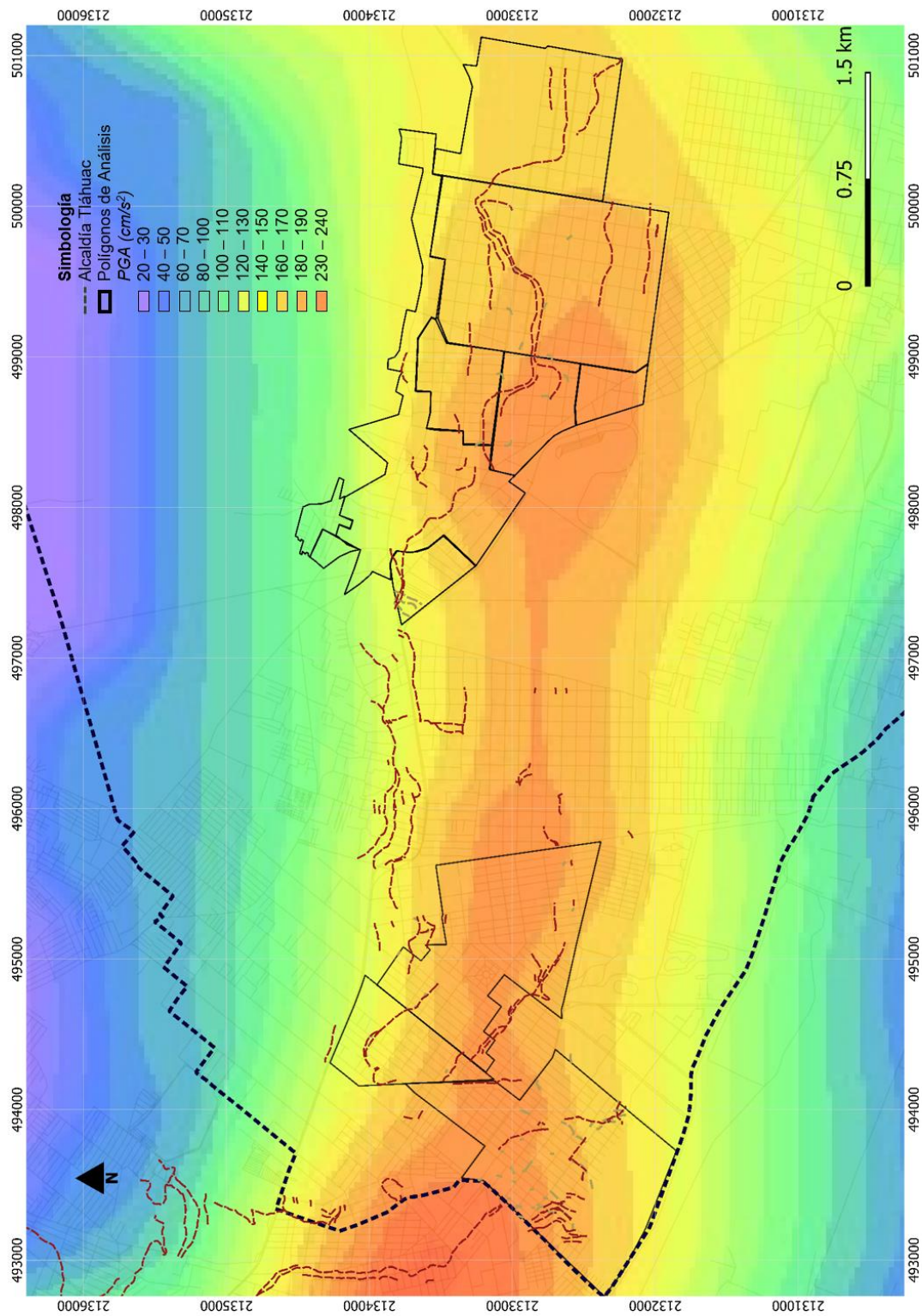


Figura 3. 16 Intensidad sísmica del sismo de 2017.

3.2.2 Exposición

La exposición, como la consecuencia del riesgo por la posición de un sujeto en el espacio, en las zonas de estudio hace referencia a la base rígida a semi rígida (basamento) que define el patrón de concentración de esfuerzos como respuesta a las fuerzas de consolidación. En las regiones en las que el basamento rocoso tiene pendientes significativas se agrava la concentración de esfuerzos en capas más superficiales. En las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se resaltan zonas (verdes) donde los cambios de espesor en la profundidad de la capa dura son muy drásticos y significan las peores manifestaciones, la mayor exposición se desarrolla donde se transita de profundidades menores a potentes estratos de suelos plásticos antes de llegar al basamento.

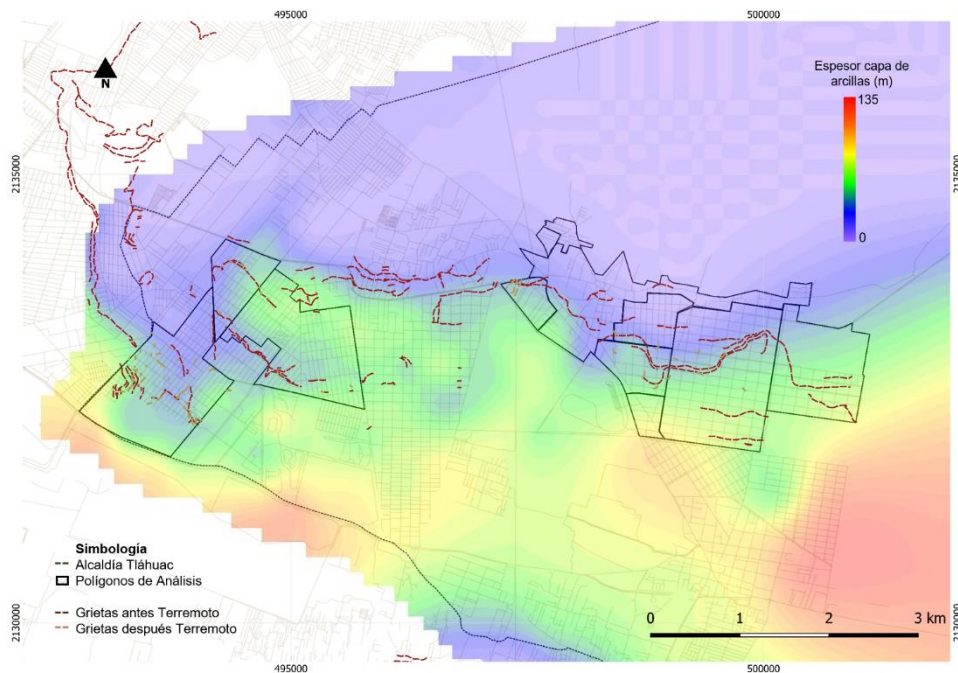


Figura 3. 17 Posición de la capa rígida, basamento, en el polígono I y II.

El espesor de la capa de arcilla se obtuvo a partir de los periodos de vibración del suelo, las áreas verdes en el polígono I y II representan las zonas de transición abrupta. En la figura 3.18 se percibe el cambio de espesor de los suelos finos de aproximadamente 20 m a más de 60 m en pocos metros, lo que significa que las isocurvas azules pasan a isocurvas verdes (mayor espesor) en distancias muy cortas. En el polígono II, el espesor de los suelos finos de ≈ 30 m cambia a más de 50 m en cortas distancias en el espacio, figura 3.19.

Tanto en el polígono I y II, se observa la alineación de las discontinuidades con las isocurvas de profundidad verdes, figuras 3.18 y 3.19.

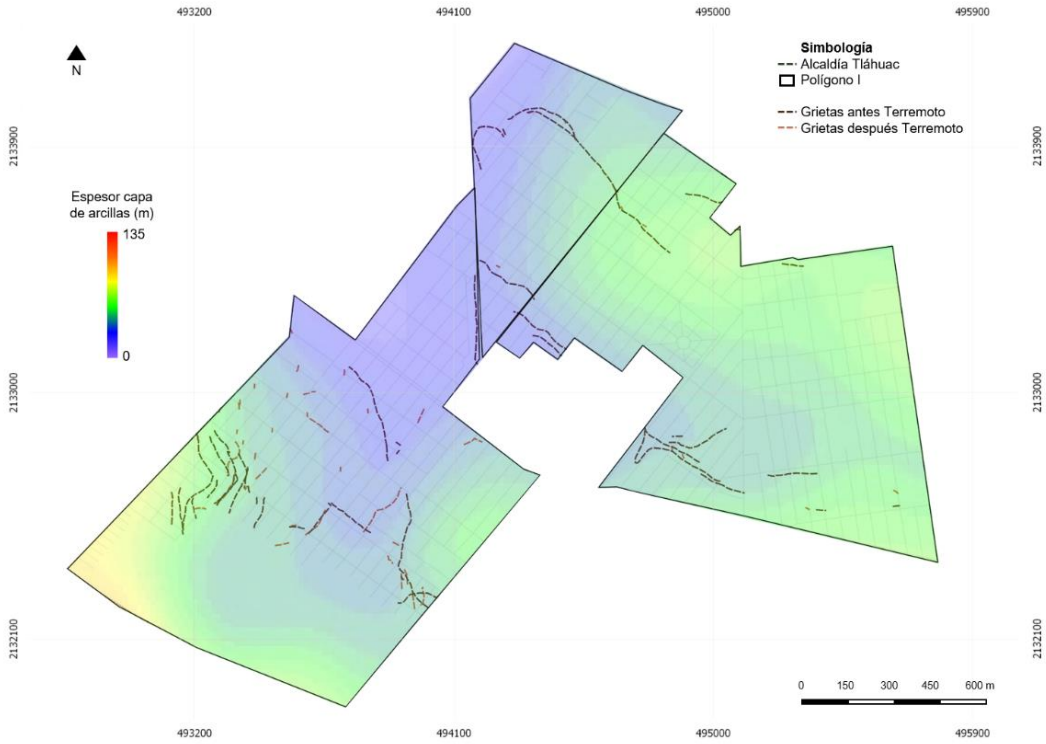


Figura 3. 18 Variación espacial del espesor de arcillas en el polígono I.

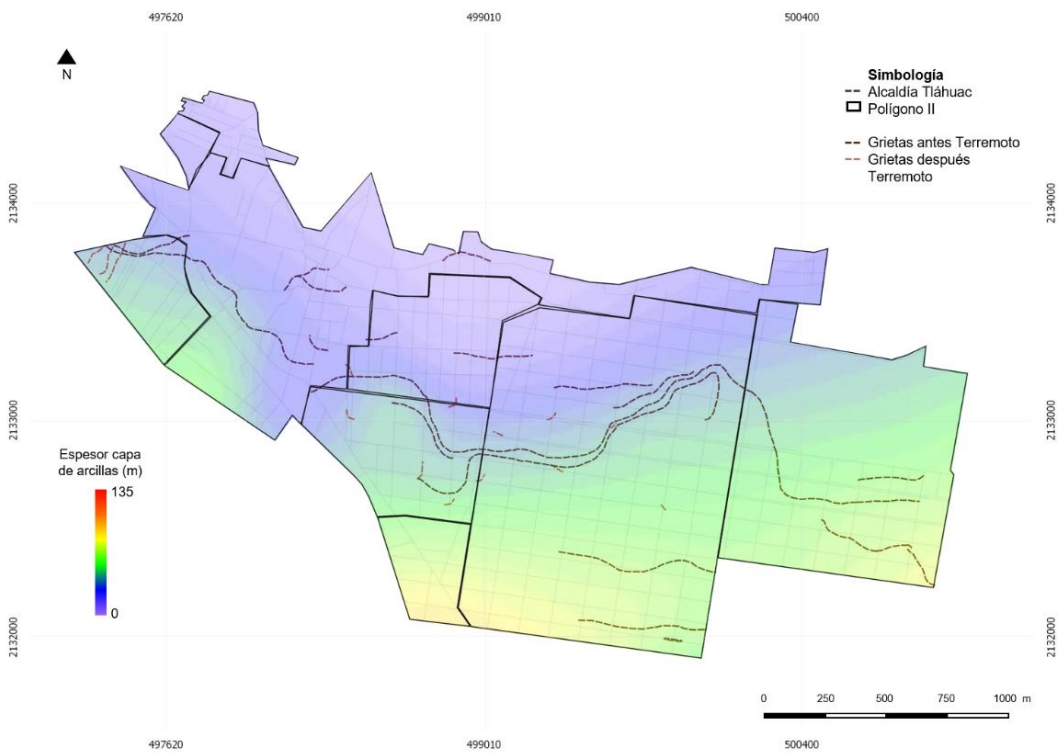


Figura 3. 19 Variación espacial del espesor de arcillas en el polígono II.



La determinación del espesor de arcilla (H) y el amortiguamiento del suelo se realizó con ruido sísmico ambiental (SRA o MHVSR por sus siglas en inglés) o relación espectral de microtemores, esta energía consiste principalmente de ondas Rayleigh (Nakamura, 1989; Lermo y Chavez-García, 1993) transmitidas al suelo para la caracterización de la respuesta de sitio.

La Exposición por Basamento es mayor en la zona sombreada (figura 3.20) y disminuye gradualmente conforme se aleja de la región.

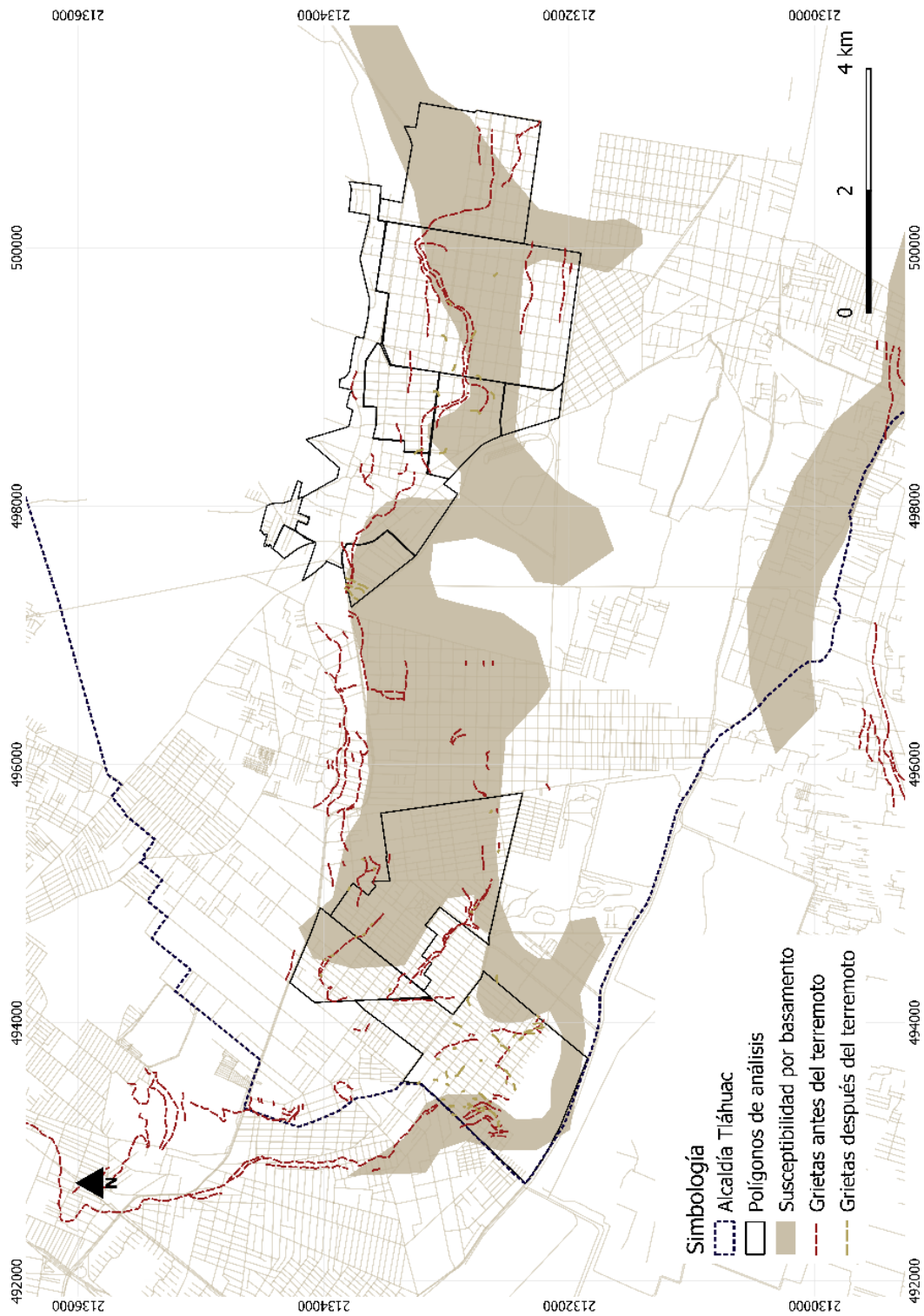


Figura 3. 20 Mapa de exposición por basamento en el polígono I y II de la alcaldía Tlahuac.

La recopilación de datos de sondeos geotécnicos permitió la interpretación de una frontera que se extiende en la parte superior de la Alcaldía Tláhuac y que representa un límite aproximado de cambio de columnas estratigráficas, una más cercana a las propias de la Loma y otras más relacionadas con la Transición. En la figura 3.21 se observa como la frontera coincide con las discontinuidades desencadenadas después del terremoto.

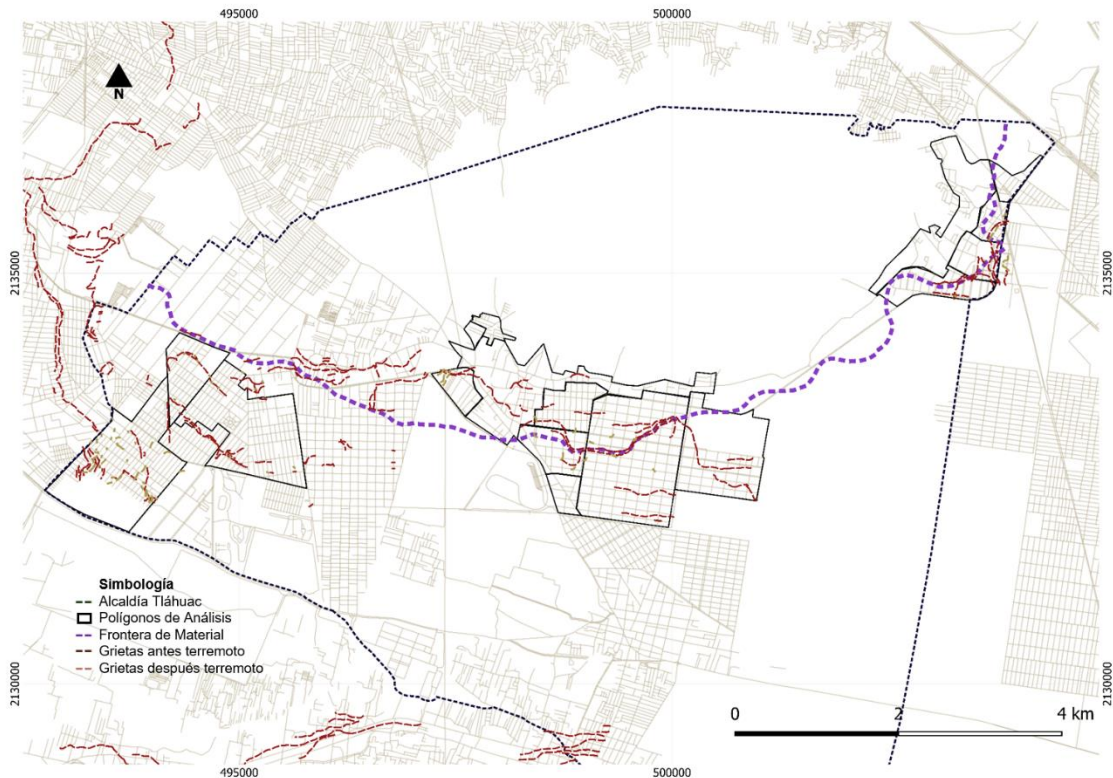


Figura 3. 21 Ubicación de la frontera en la Alcaldía de Tláhuac, representa un cambio en la resistencia del material.

3.3.3 Susceptibilidad

Las características y las circunstancias que incrementan la vulnerabilidad al agrietamiento en las zonas de estudio están ligadas a la heterogeneidad de los paquetes más superficiales de suelos. Estos paquetes de materiales además de ser heterogéneos en lo geométrico (no son horizontales ni continuos), figuras 3.23 y 3.24, tienen configuraciones mineralógicas y contenidos de agua ($w\%$) muy contrastantes en pocos metros de separación. Esto eleva la susceptibilidad del suelo a agrietarse.

Las figuras 3.22, 3.23 y 3.24 representa un corte estratigráfico típico del polígono I. Se observa la heterogeneidad de los materiales y la falta de continuidad lateral.

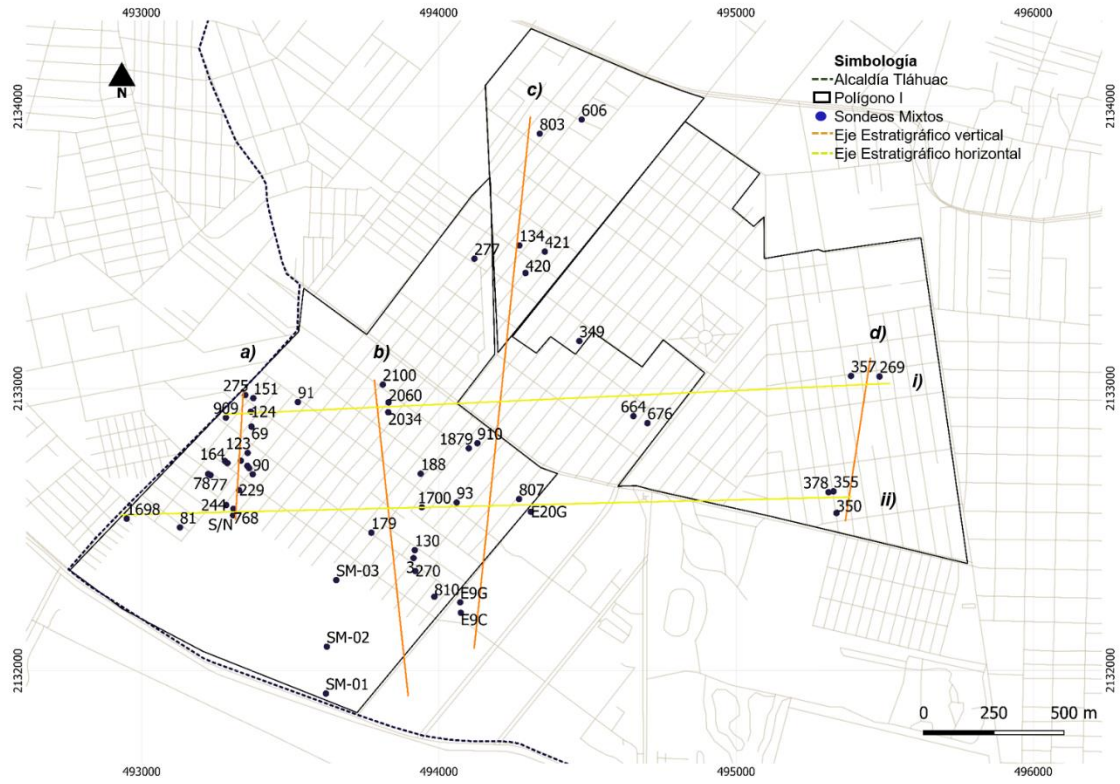


Figura 3. 22 Cortes estratigráficos en el polígono I.

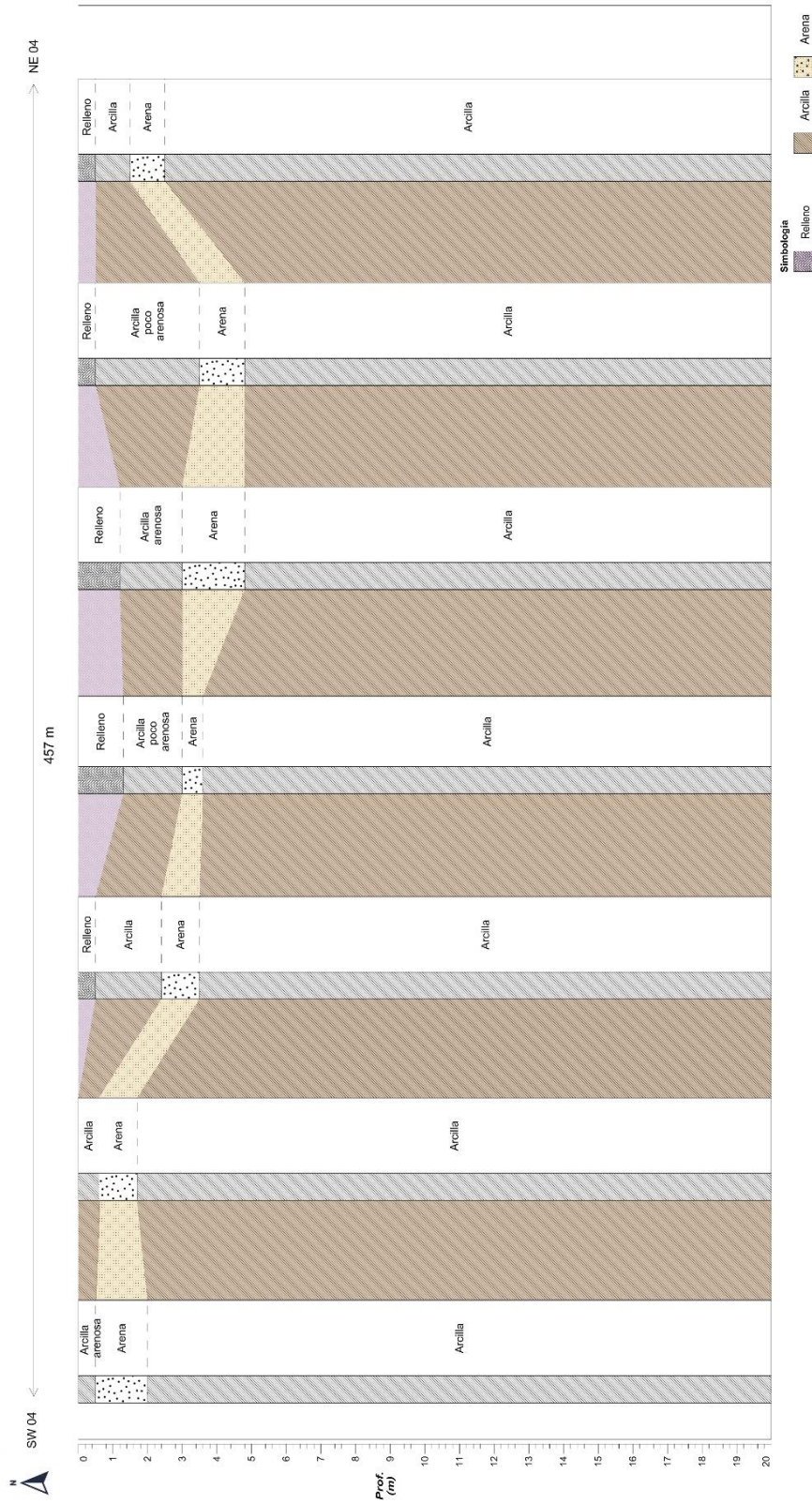


Figura 3. 23 Corte a: Estratigrafía en el polígono I.

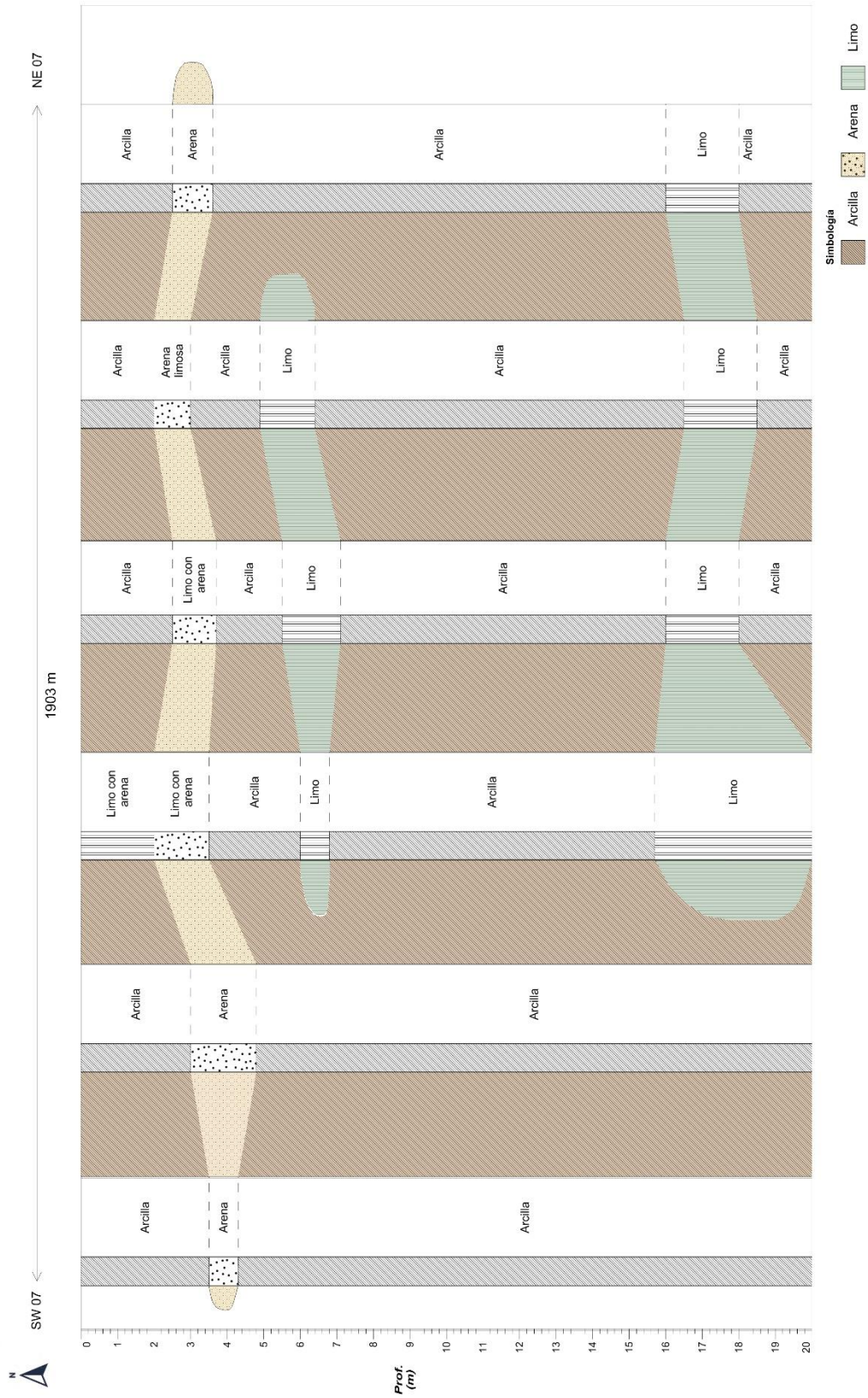


Figura 3. 24 Corte c: Estratigrafía en el polígono I.

▪ Contenido de agua y Límites de Atterberg

En los análisis de la variación del contenido de agua para el polígono I y II, se tomó en cuenta los contactos entre materiales que son i) susceptibles a cambios volumétricos extremos por desecación, ii) deformables en alta tasa, y iii) las posibles impedancias enfrentadas. En las figuras 3.26 y 3.27 se representa los espesores de paquetes de suelo con diferentes potenciales de cambio volumétrico (por clima o por la acción antrópica).

El contenido de agua en los polígonos a estudiar es muy heterogéneo y contrastante, esta condición se relaciona con límites plásticos muy variables en áreas reducidas. El análisis se realizó por paquetes con características similares a este respecto. El polígono I y II se caracterizan por presentar un paquete de materiales “secos y frágiles” en los primeros 5 m de profundidad, seguido de material con contenidos de agua mayores y alta plasticidad, figura 3.25.

La profundidad del paquete de secos en el polígono I se encuentra desde muy superficial (~ 0.5 m) hasta aproximadamente 10 m. El paquete de contenidos de agua máximo (245-462%) sobre yace a un paquete con contenidos de agua de 80 a 245%. La profundidad relativa de los materiales con contenidos de agua altos se encuentra desde los 4 m a ≈ 13 m, figura 3.26. En la figura 3.27 se observa la variación espacial del contenido de agua en el polígono II, el paquete de contenidos de agua mínimos se encuentra a una profundidad > 0.3 m y menor a 11 m, el paquete de máximos se encuentra a una profundidad aproximada entre 1.3 a 19.3 m.

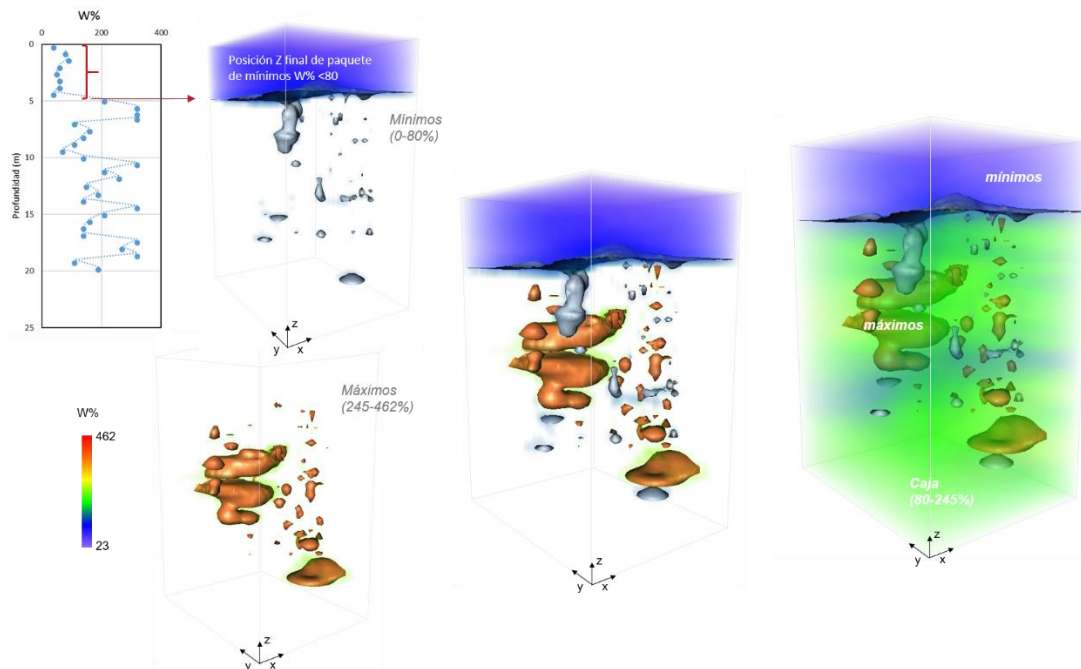


Figura 3. 25 Análisis del contenido de agua en la zona de estudio.

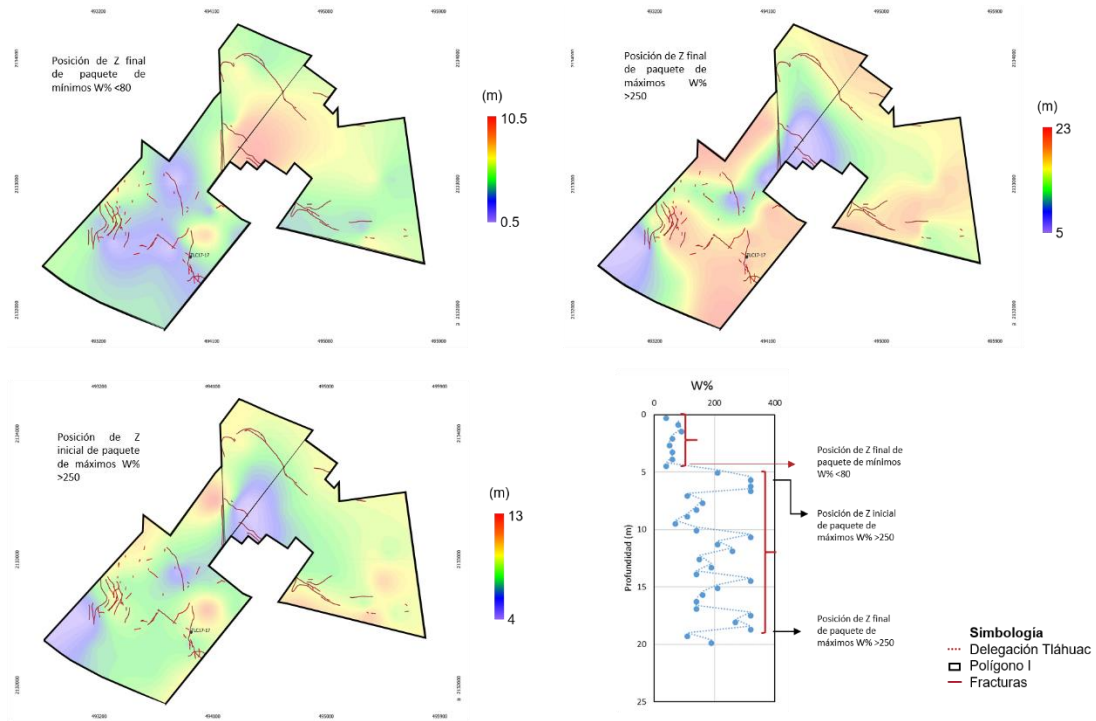


Figura 3. 26 Variación espacial del contenido de agua en el Polígono I.

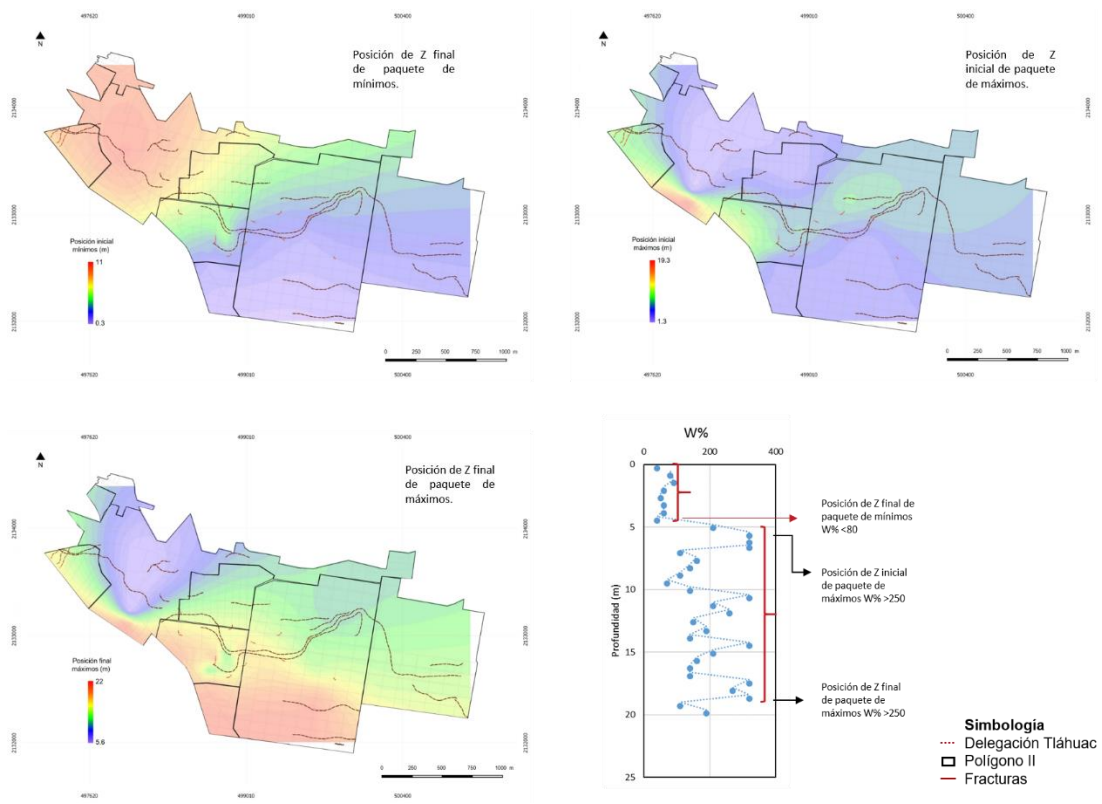


Figura 3. 27 Variación espacial del contenido de agua en el Polígono I.

▪ Inclusión

El polígono I y II se caracterizan por la intercalación de una lámina semi-rígida llamada en este trabajo de investigación “inclusión”, en la región posee un espesor y rigidez muy diferentes. Este material tiene un comportamiento que podría estar ligado a los rompimientos súbitos del suelo. Con el análisis de sondeos de penetración estándar, SPT y pruebas de laboratorio geotécnicas, se analizaron las características de las inclusiones en cada polígono. El análisis neuronal se utilizó como alternativa para predecir la variación espacial de algunas de las propiedades del suelo (número de golpes, N; posición, z; espesor, H). La propagación de la información del medio se realizó con redes de alimentación al frente, multicapa, entrenadas con *Back Propagation* (ANEXO A), La técnica neuronal que forma parte de los modelos de aprendizaje estadísticos, se utiliza para aproximar funciones que dependen de un gran número de entradas y que generalmente son desconocidas. Se estimaron sondeos virtuales a distancia suficientemente pequeñas de los pozos conocidos cubriendo el área de interés, figura 3.28.



Figura 3. 28 Ubicación de los sondeos virtuales y reales.

Los modelos neuronales, razonablemente simples, de los volúmenes de suelos altamente heterogéneos, extrapolan la escasa información levantada en campo y estiman las propiedades en toda la masa como se muestra en la figura 3.29. Las comparaciones entre la exploración in situ y la definición neuro-3D confirma el potencial del método propuesto para la caracterización de propiedades de las masas no homogéneas.

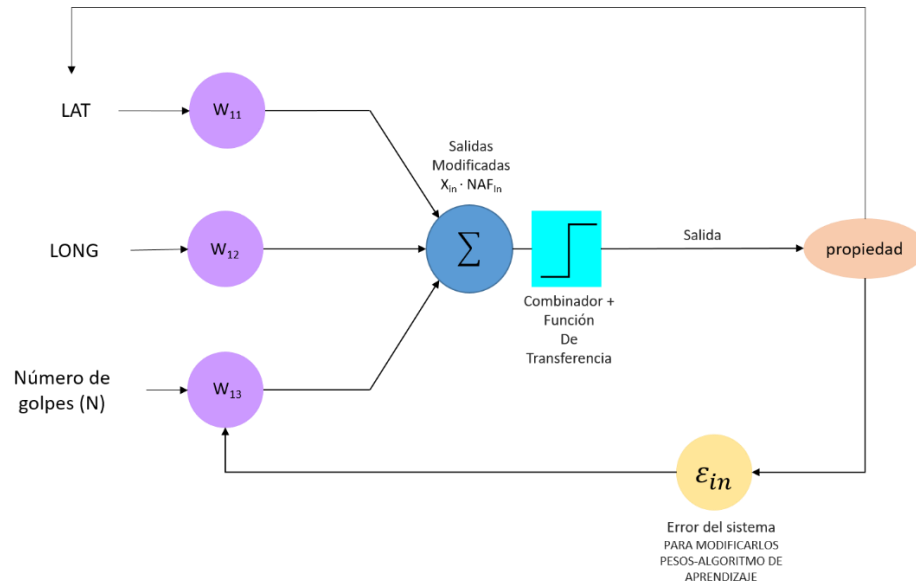


Figura 3. 29 Arquitectura de la red neuronal para establecer propiedades espaciales. La salida es el valor de propiedad que se modela para la inclusión.

En la figura 3.30 se muestra las comparaciones entre los valores de la propiedad medidos con la prueba STP y los evaluados con la RN. Como se puede apreciar el modelo espacial es certero.

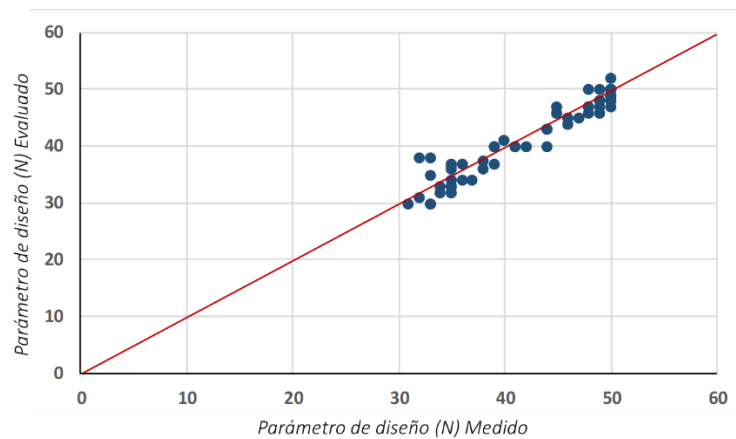


Figura 3. 30 Comparación entre los valores medidos y evaluados con la RN.

La inclusión en el polígono I comprende la mayor parte de la colonia Del Mar, presenta una forma irregular y contiene una gran cantidad de expresiones de rotura (antes y después del sismo de 2017). Es un material rígido a semi-rígido (resistencia a la penetración de 30 a >50 golpes) a una profundidad desde superficial (0.5 m) a profundo (8 m) con espesor de 0.5 a 2.5 m, figuras 3.31, 3.32 y 3.33.

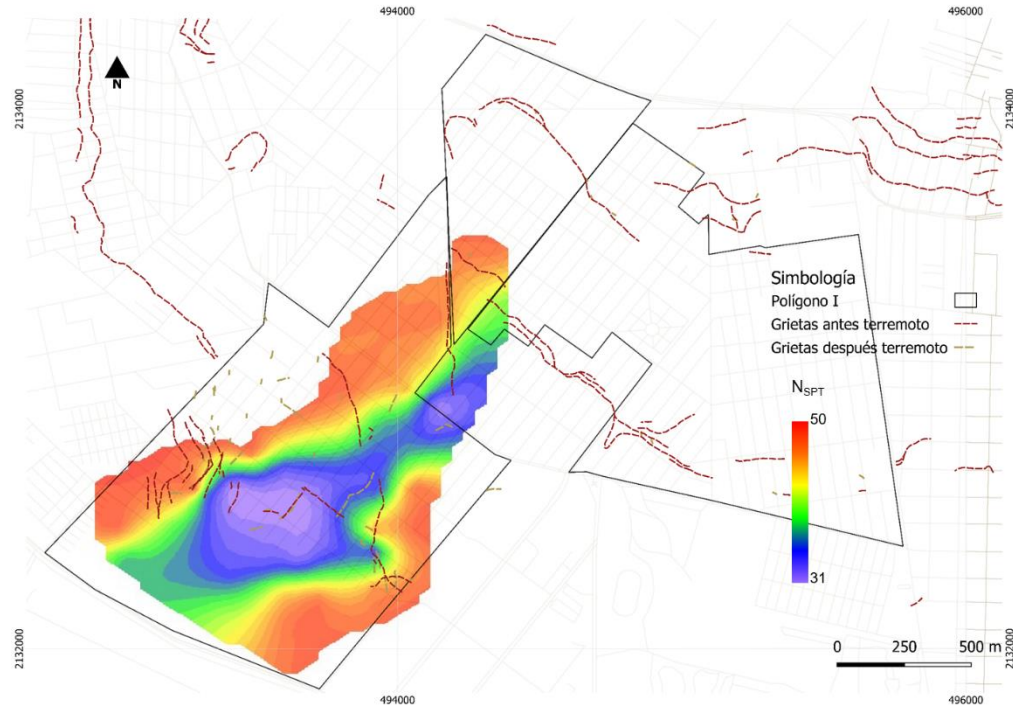


Figura 3. 31 Variación del número de golpes, inclusión semi-rígida en el polígono I.

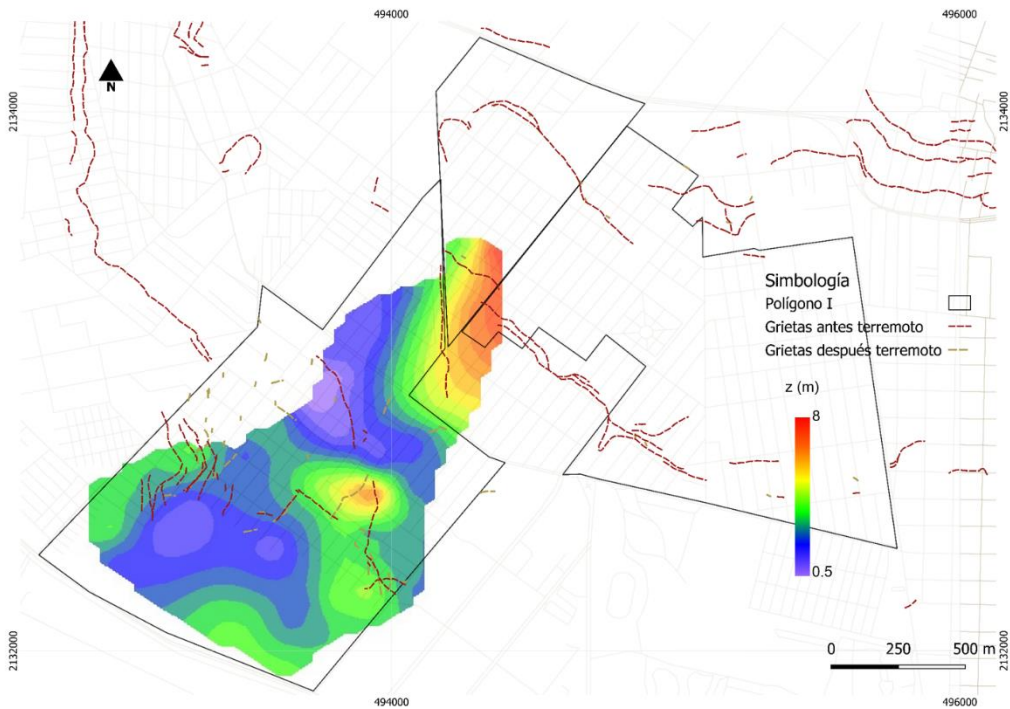


Figura 3. 32 Variación de la posición con respecto a la superficie de la inclusión semi-rígida en el polígono I.

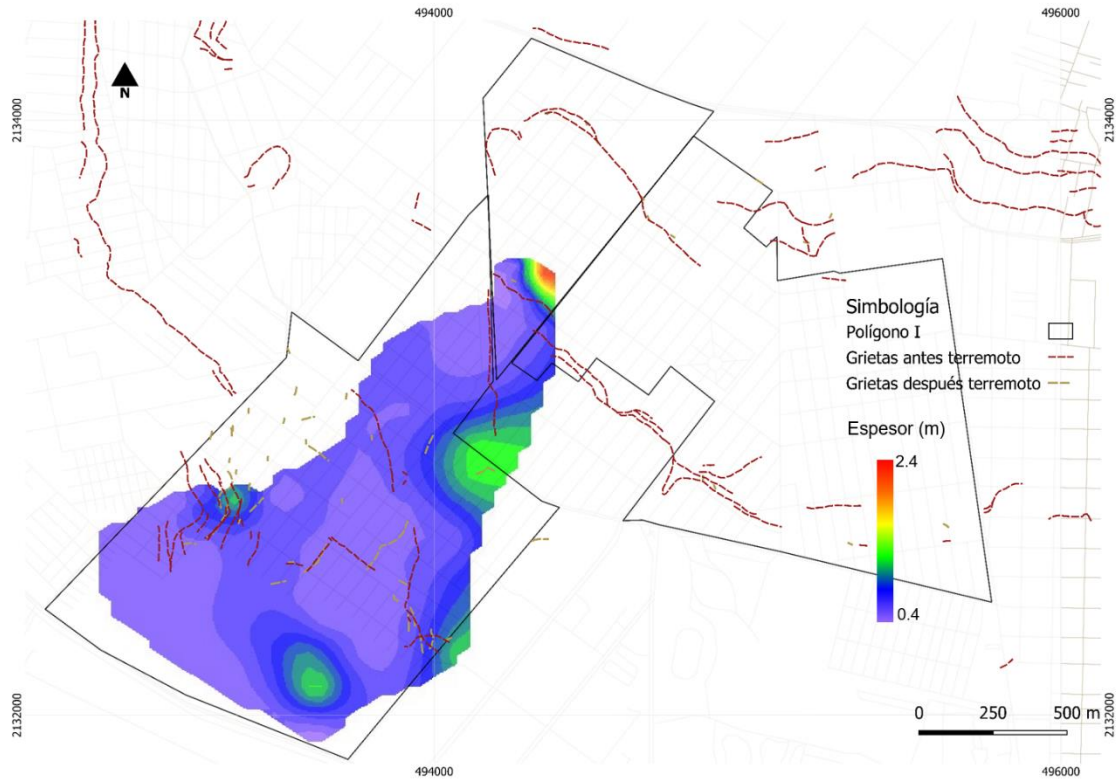


Figura 3. 33 Variación del espesor, inclusión semi-rígida en el polígono I.

La inclusión en el polígono II es una lámina con geometría irregular, la diferencia con la inclusión del polígono I es que prácticamente es rígida ($N_{SPT} > 50$, avance con broca) en toda su extensión. Sus profundidades van desde los 5 m a 10.6 m, el mínimo espesor es de 0.5 m y el máximo es de 3.7 m, figuras 3.34 y 3.35.

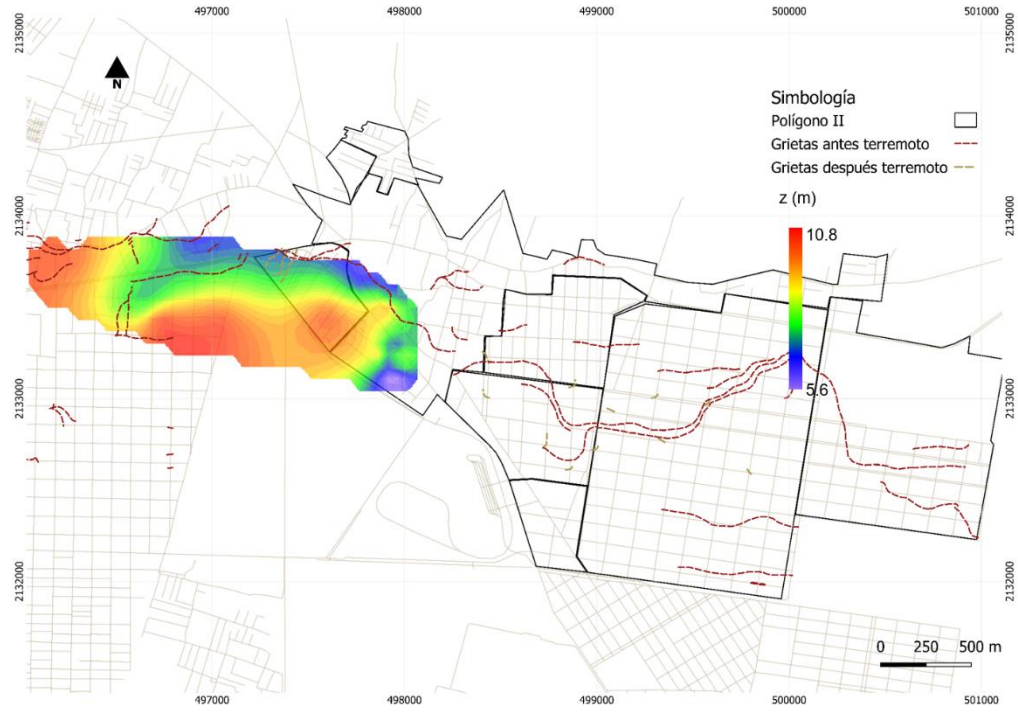


Figura 3. 34 Variación de la posición con respecto a la superficie de la inclusión semi-rígida en el polígono II.

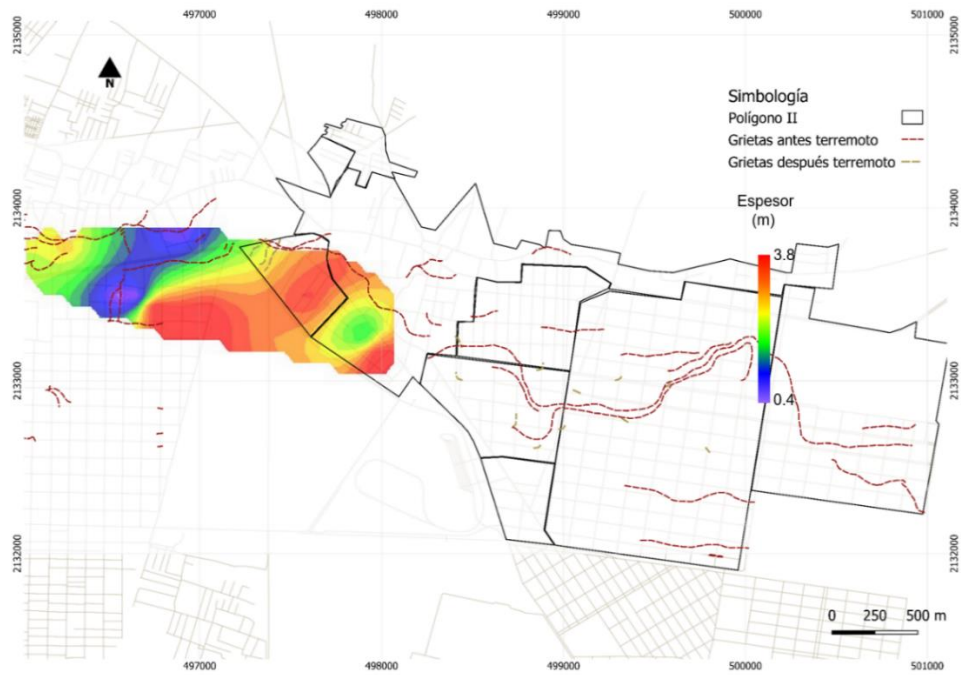


Figura 3. 35 Variación del espesor, inclusión rígida en el polígono II.

El análisis para determinar la peligrosidad de cada inclusión se realizó con la coincidencia espacial de los parámetros medidos, por ejemplo, para la representación de la inclusión en su expresión más peligrosa (*peligro V*) fue necesario que $N \uparrow$ $Z \uparrow$ $H \uparrow$, donde N-número de golpes-*alto*, sea >38 ; la Z-posición con respecto a la superficie y un límite inferior marcado por la capa que se consolida mayormente ante el bombeo-*alta*, sea >2.5 m y H- espesor-*alto*, sea >1.2 m; figura 3.36 y 3.37.

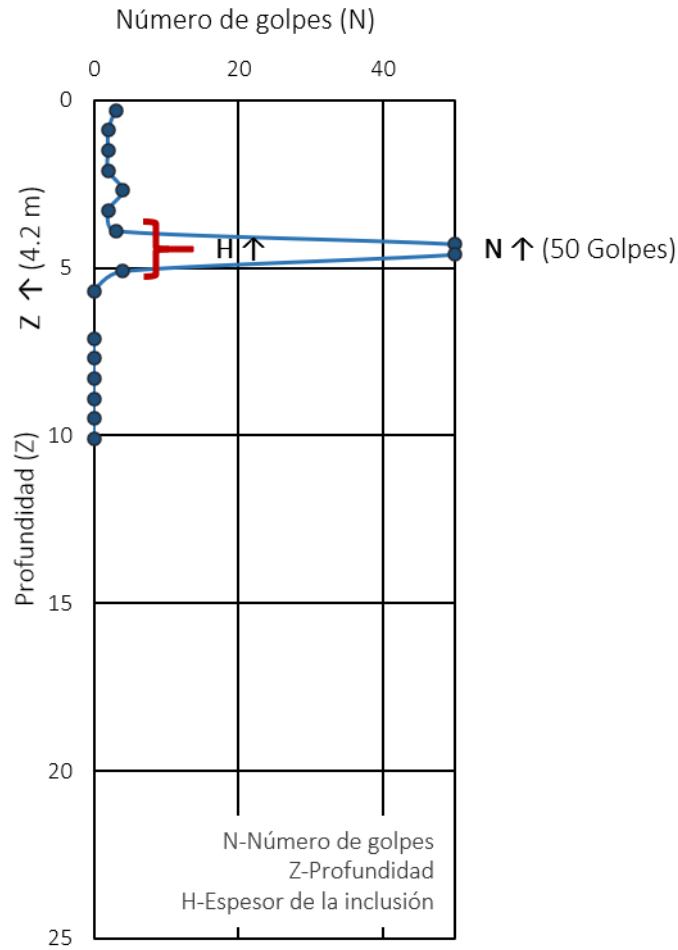


Figura 3. 36 Análisis de peligrosidad.

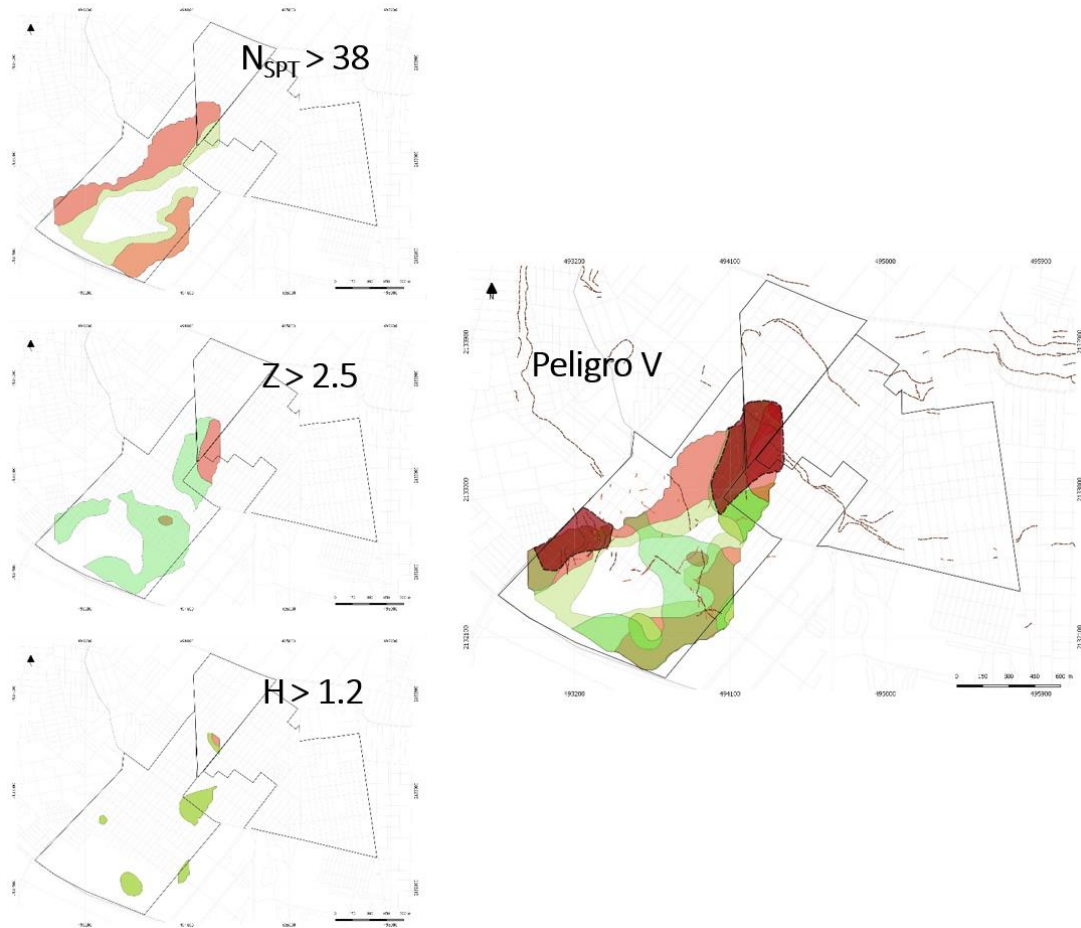


Figura 3. 37 Análisis para determinar el nivel de impacto en la zona de estudio.

Las inclusiones para los Polígonos I y II se categorizaron del I al V en orden ascendente de acuerdo con el incremento en el impacto (escala) de las manifestaciones, figuras 3.38 y 3.39.

- I. Deformaciones muy lentas y superficiales, probabilidad de descenso súbito (escalón). Presenta una amenaza muy baja.
- II. Deformaciones lentas, se generan hundimientos poco profundos, probabilidad de descenso súbito (escalón). Nivel de amenaza baja.
- III. Deformaciones inmediatas al aplicar carga, se generan hundimientos profundos, probabilidad de descenso súbito (escalón). Nivel de amenaza media.
- IV. Deformaciones inmediatas al aplicar carga, socavación, se generan hundimientos profundos, probabilidad de descenso súbito (escalón). Nivel de amenaza alta.
- V. Deformaciones inmediatas al aplicar carga que pueden conectar con procesos adyacentes, socavación profunda, se generan hundimientos muy profundos, probabilidad de descenso súbito (escalón). Nivel de amenaza muy alta.

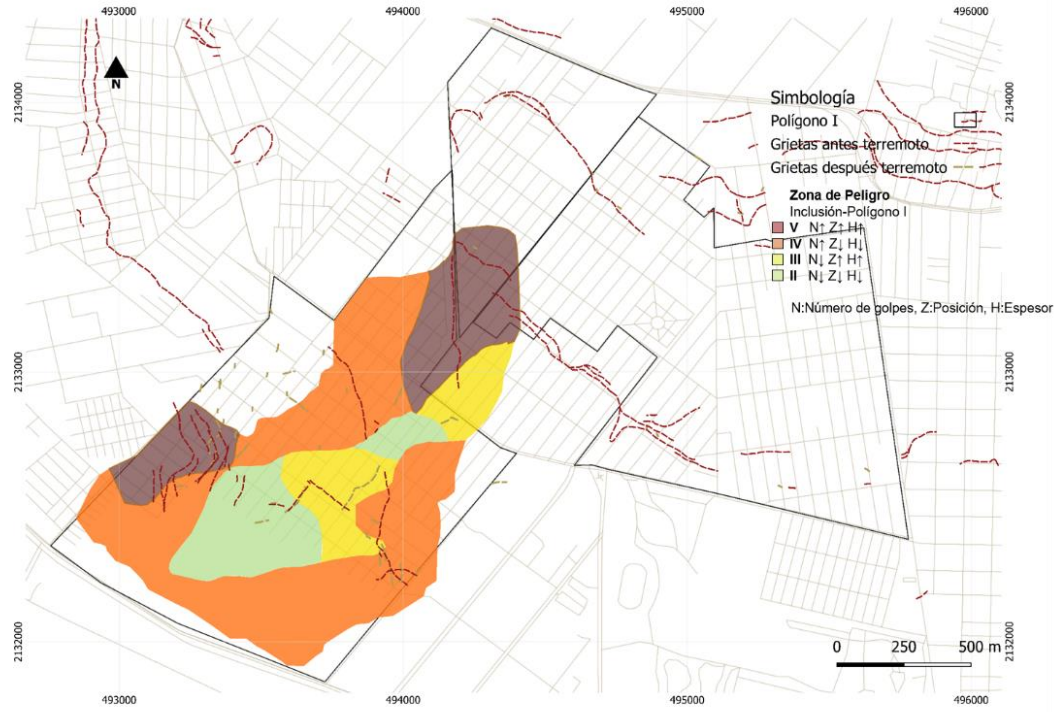


Figura 3. 38 Niveles de peligrosidad en el polígono I.

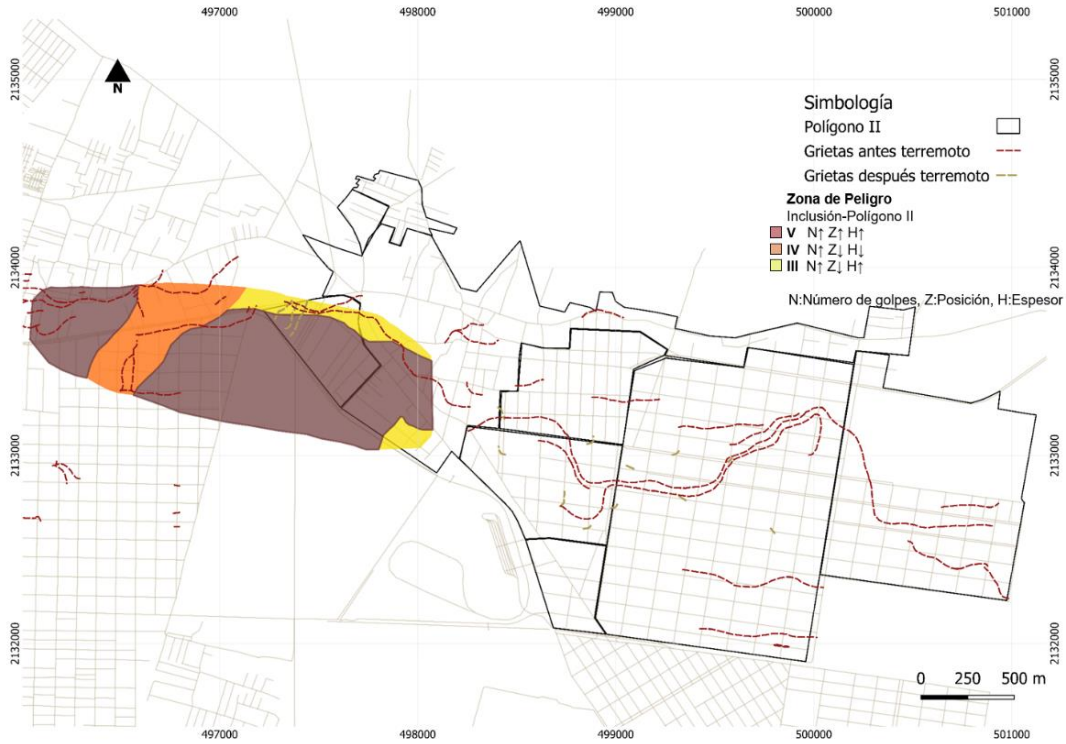


Figura 3. 39 Niveles de peligrosidad en el polígono II.



3.4 Resumen sobre mapas

La aproximación al riesgo por agrietamiento en la Alcaldía Tláhuac se basa en:

$$\text{RIESGO AGRIETAMIENTO} = \frac{\text{AMENAZA (ANTRÓPICA/NATURAL)}}{\text{EXPOSICIÓN DE LA AGEB}} \times \frac{\text{SUSCEPTIBILIDAD DE LA AGEB}}{\text{RECUPERACIÓN DE LA AGEB}}$$

Con los siguientes resultados para el Polígono I y II.

I. **Amenaza:**

El descenso acelerado y heterogéneo del Nivel de Aguas Freáticas define las zonas de mayor riesgo al agrietamiento. La mayor amenaza se suscita en la transición de azul a rojo - región en verde-, y particularmente en las curvas de isovalores con menor separación entre ellas, figura 3.40. En estas regiones será necesario contemplar que, de no darse un cambio de tasa de extracción, los agrietamientos se seguirán presentando y podrán hacerlo en cualquier punto de la franja definida entre las curvas mencionadas.

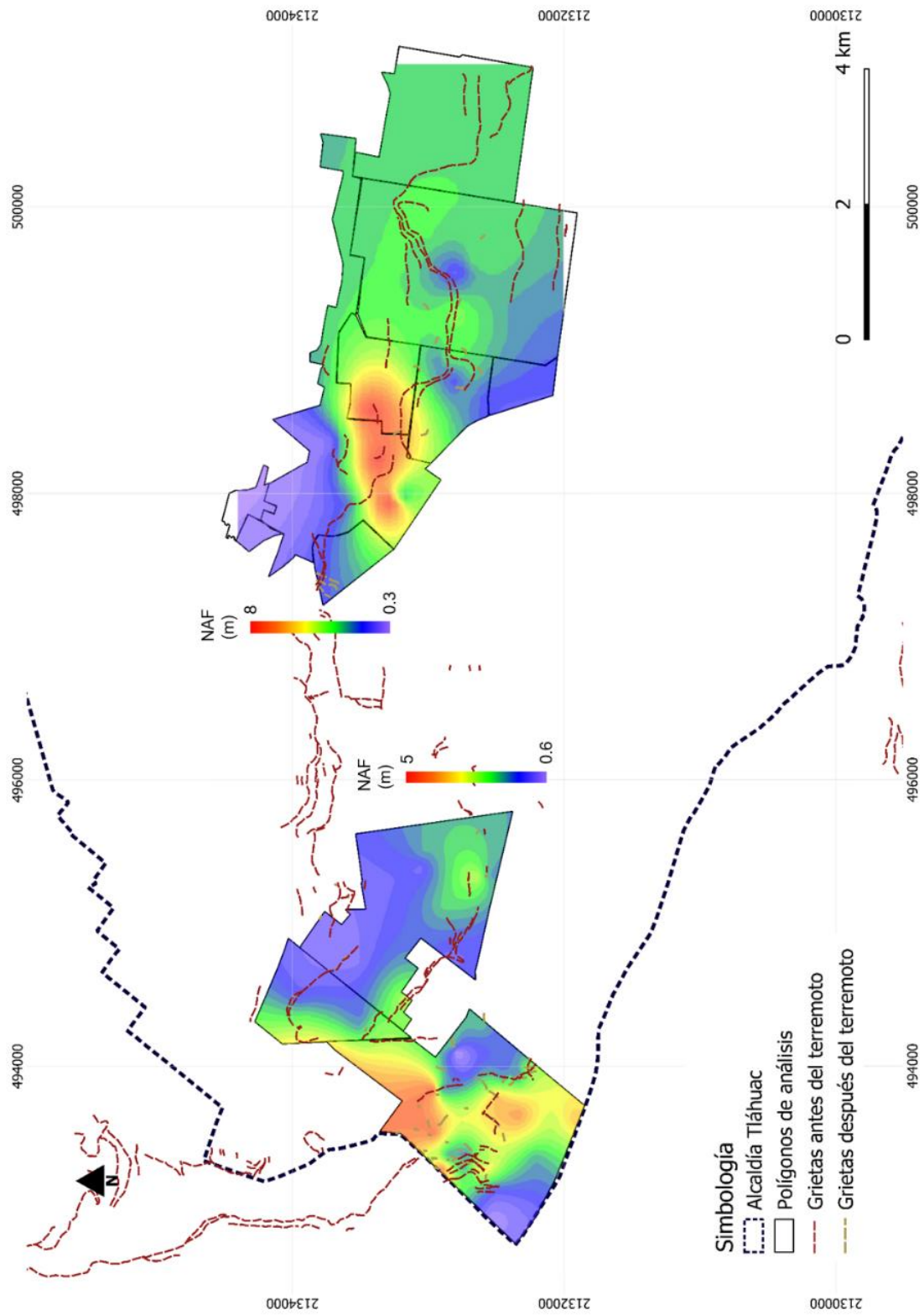


Figura 3. 40 Descenso acelerado y heterogéneo del NAF en el polígono I y II.



2. **Exposición:**

La figura 3.41 indica las áreas donde la forma del basamento cambia de manera abrupta, pendiente pronunciada, con ondulaciones o domos que provocan la concentración de esfuerzos y fallas en las capas más débiles al rebasar sus resistencias. A pesar que la amenaza *bombeo* y *sismo* son los activadores más importantes, sin duda es la exposición la que limita la región en la que debe tomarse todas las precauciones y evaluarse las ventajas de reubicación de centros poblacionales contra reparaciones continuas.

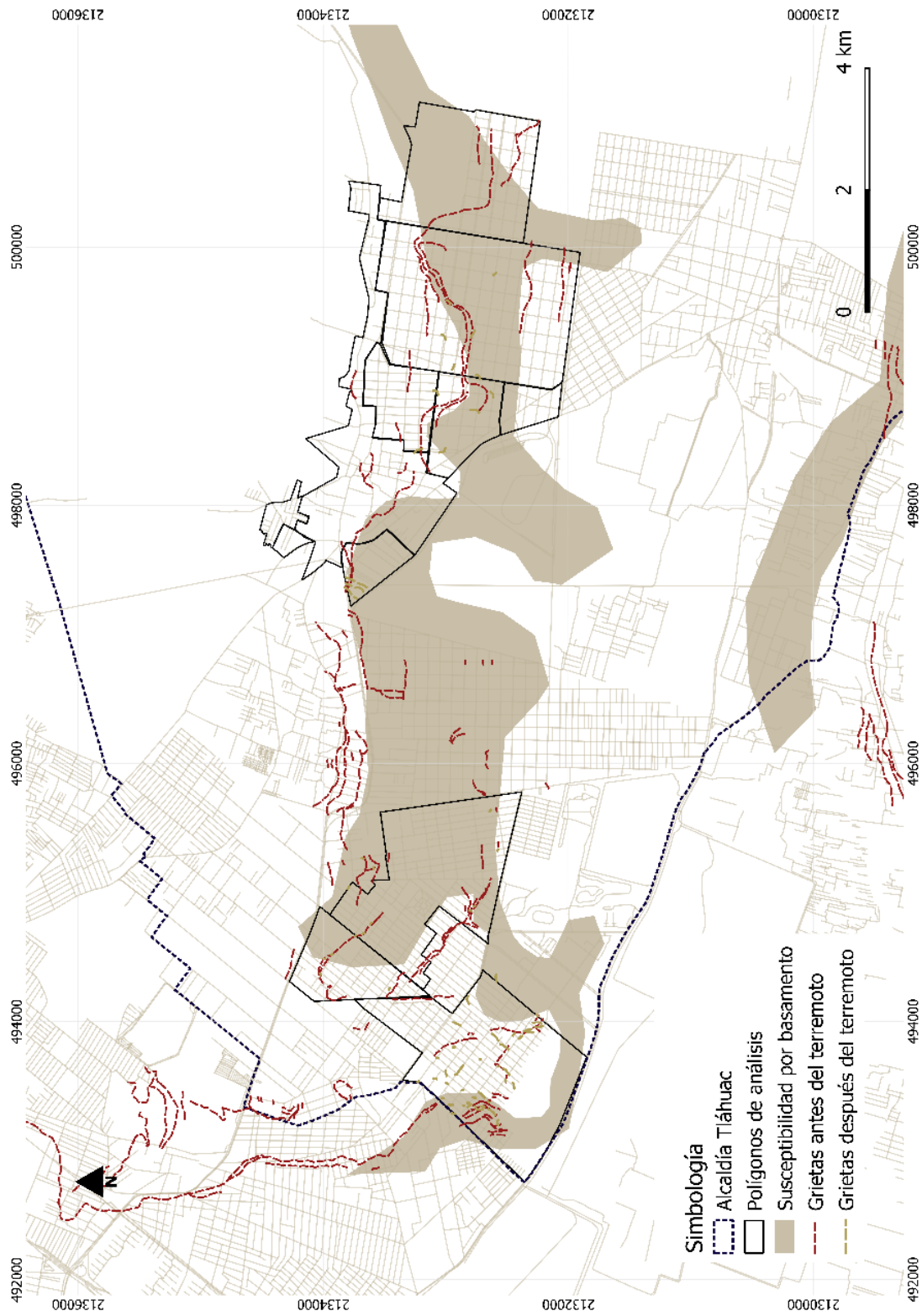


Figura 3. 41 Exposición por basamento en el polígono I y II.



3. Susceptibilidad:

La figura 3.42 representa la variación espacial de la heterogeneidad del medio, en esta zona existe mayor susceptibilidad al agrietamiento del suelo por contactos entre materiales con distintas propiedades mecánicas e hidráulicas, se relaciona con las capacidades de los materiales a deformarse al expulsar o absorber agua en su estructura. La franja lila del mapa delimita los contactos y las variaciones más importantes del contenido de agua en los polígonos de estudio.

Los paquetes de suelos más superficiales son heterogéneos en lo geométrico, lo que significa que las capas de suelo no son horizontales ni continuas a la profundidad de interés para estudiar los procesos de los rompimientos y las fallas de estructuras, aunado a esto la inclusión rígida emergida en material menos resistente incrementa la susceptibilidad de agrietamiento de la zona, figura 3.43. Sin embargo, esta es la condición que puede ser abordada con mayor facilidad usando soluciones ingenieriles (para cimentación y superestructura) que libren las manifestaciones reconocidas.

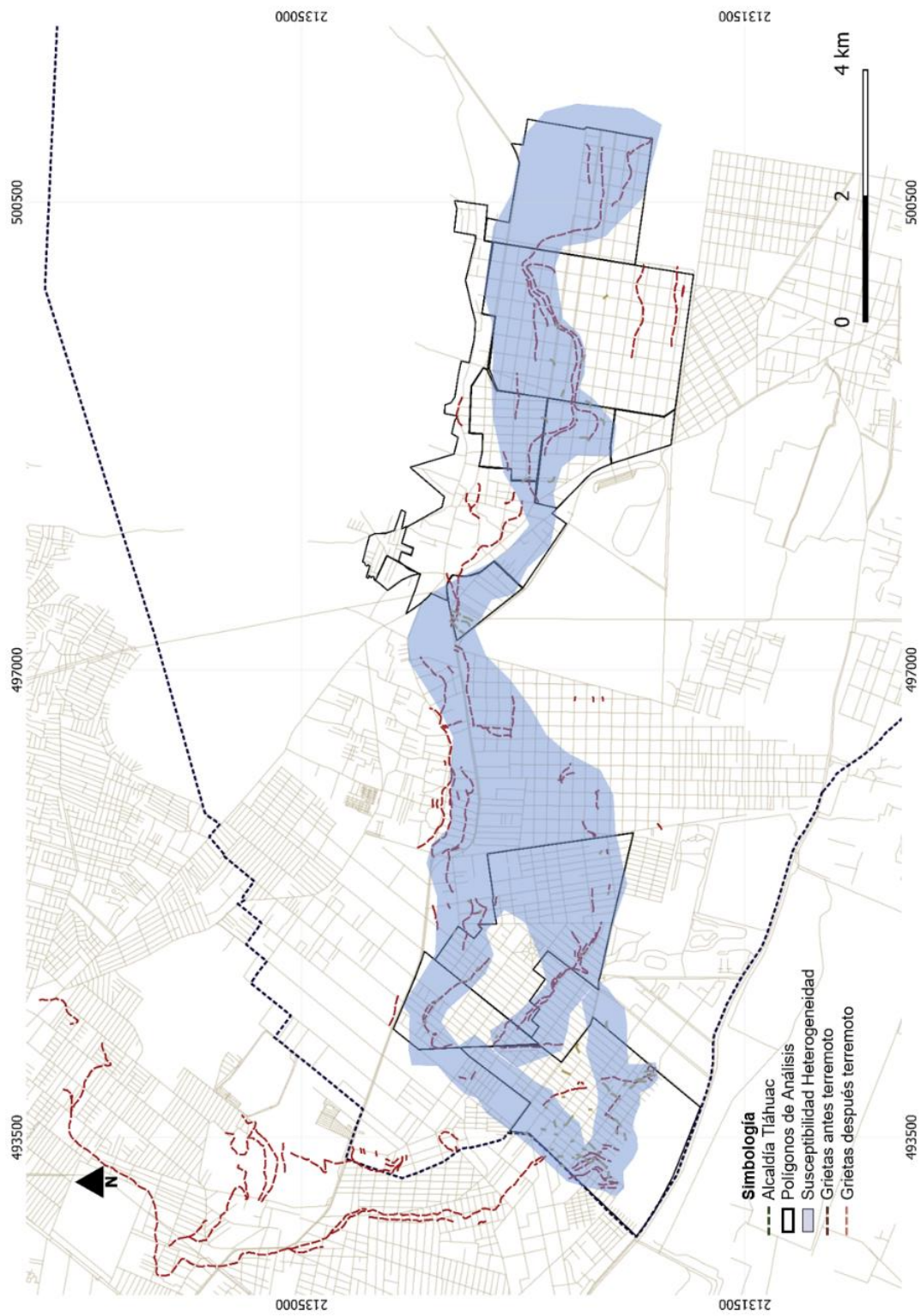


Figura 3. 42 Área donde existe peligro por el cambio abrupto de W%.

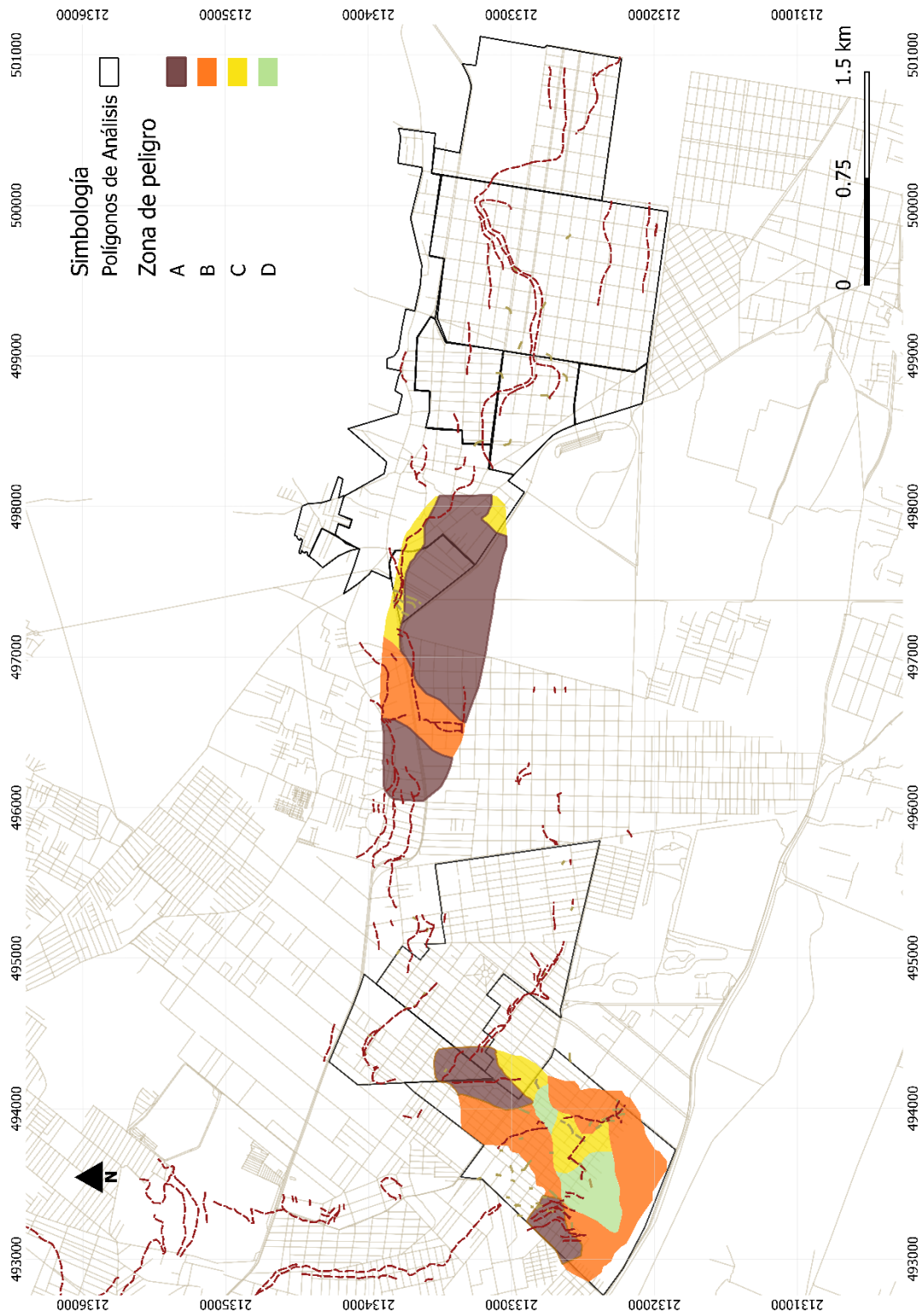


Figura 3. 43 Zonas de peligro en el polígono I y II.

4. Resiliencia:

La figura 3.44 representa cartográficamente la población en condición de pobreza en la Ciudad de México. Las zonas con mayor porcentaje de pobreza tienen una nula capacidad de recuperarse de los efectos de una amenaza y por eso la necesidad de estudiarlas, modificar sus acciones constructivas y monitorear su crecimiento. En la alcaldía de Tláhuac se concentran algunas de las áreas con menor resiliencia de toda la CDMX.

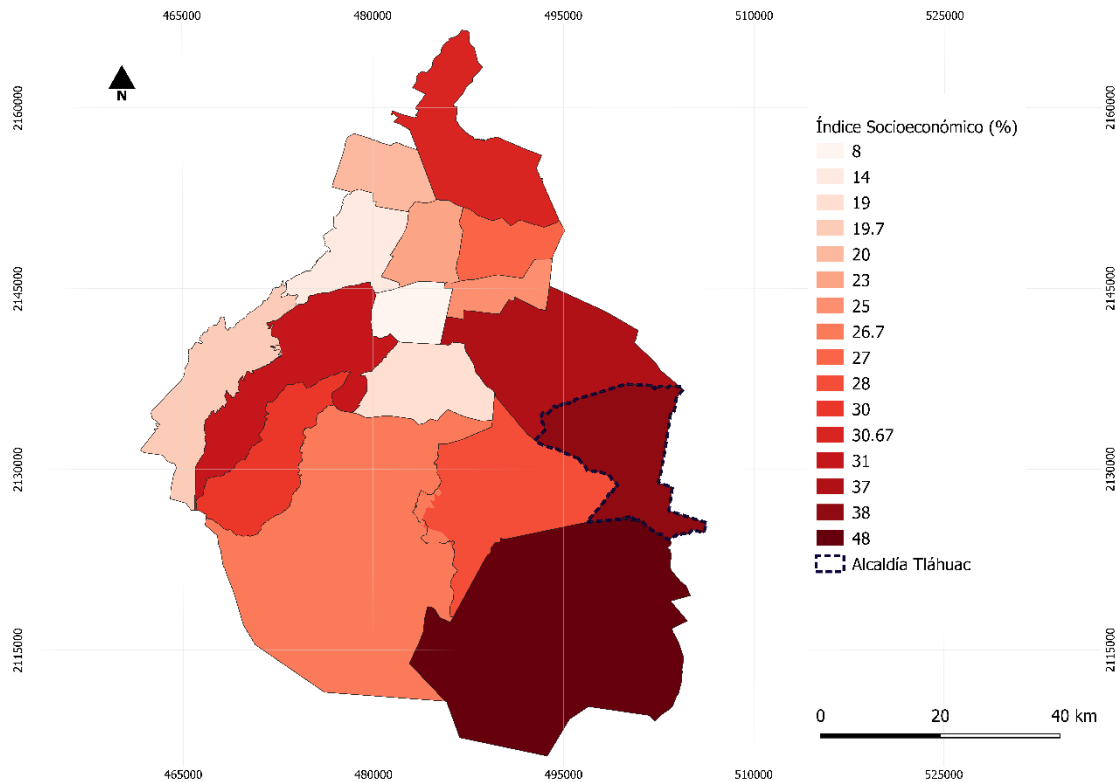


Figura 3. 44 Índice socioeconómico de la Ciudad de México.



Conclusiones

- Los mecanismos de fracturamiento que suceden en la Alcaldía de Tláhuac se determinaron espacialmente a través del análisis y modelado neuronal de situaciones geológicas y geotécnicas.
- Al construir los mapas de Amenaza, Susceptibilidad y Exposición se estudiaron de forma integral todas las respuestas y se ejecutaron simulaciones para calificar y cuantificar el grado de fragilidad interna y las acciones que dañan los escenarios naturales/antrópicos.
- La coincidencia en el espacio del basamento rocoso irregular y/o con pendiente muy pronunciada más el descenso acelerado y heterogéneo del Nivel de Aguas Freáticas, tiene un gran efecto sobre la aparición de grietas en la superficie. La variación del NAF en la región donde cambia de manera abrupta de niveles casi superficiales a niveles profundos (superiores a 4 m), es considerada la de más alta amenaza-exposición para el polígono I y II.
- La susceptibilidad al agrietamiento en la zona de estudio es de alta a muy alta, dada la heterogeneidad de los materiales en lo geométrico, capacidades de carga y procesos de reducción de volumen. La diferencia en las propiedades índice e hidráulicas de los suelos es un parteaguas para una zona de mayor susceptibilidad al agrietamiento.
- Los eventos antrópicos que maximizan la fragilidad de los sistemas de suelo son las fugas de agua, canalizaciones no articuladas, estructuras enterradas, la distribución de cargas por cimentaciones inadecuadas, entre otros. La diferencia estratigráfica es un factor que exagera los procesos de hundimientos heterogéneos y que, como consecuencia, afectan a las obras hidráulicas haciendo que pierdan progresivamente su integridad física en los puntos más débiles. El ciclo se completa en estas mismas zonas al agrietarse ahora por el paso del agua y/o colapsarse túneles o canales por esta misma acción.
- Las zonas más afectadas por la presencia de discontinuidades en el polígono I y II están sobre lo que se llamó aquí “inclusión”. Este material semi-rígido a rígido con espesor variable, en su expresión más peligrosa (nivel V), cuando se rompe, ya sea por el bombeo en capas profundas, cargas heterogéneas o por el paso de ondas sísmicas, provoca geometrías de descenso y apertura en superficie extraordinarias.
- La necesidad de seguir abasteciendo a los habitantes de la Ciudad de México de agua potable requiere mantener la extracción de agua subterránea de los sistemas



de pozos, lo que seguirá manifestándose como hundimientos del terreno y expansión de las zonas por agrietamiento. Es fundamental considerar la transformación y reorganización de los espacios en mayor riesgo de Tláhuac.

- La resiliencia en los polígonos estudiados es insuficiente, la comunidad expuesta a la amenaza ha mostrado una gran incapacidad para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de los efectos en las estructuras y de la paralización de las funciones básicas. Es muy necesario que los órganos de gobierno consideren estos hechos cuando se dibujen los planes de crecimiento y proyectos de activación económica para las zonas más desfavorecidas de la CDMX.



Apéndice

A. Redes neuronales

El uso de algoritmos tradicionales (bases de datos, programación orientada a objetos y eventos, etc.) resulta complejo el abordar la solución de problemas donde se requiera descubrir similitudes para clasificación, análisis y reconocimiento de patrones en grandes bases de datos, por ejemplo, y es necesario dar soluciones alternativas. El cambio necesario lo personifica la inteligencia artificial IA, la cual es un intento por descubrir y describir aspectos de la inteligencia humana que pueden simularse mediante el uso de máquinas. Las redes neuronales RNs, como herramienta de la IA, buscan emular el aprendizaje humano (reconocimiento de patrones, memorización y asociación de hechos, entre otros) para ayudar a resolver problemas donde no es posible expresar la solución a través de un algoritmo, y en los que la respuesta al problema requiere de experiencia adquirida.

Una RN consiste en unidades de procesamiento en las que se realiza el intercambio de información. Por su estructuración y sus operaciones, las RN tienen la capacidad de aprender y mejorar su funcionamiento. Las actividades en las que se ha probado su sobresaliente eficiencia van desde análisis de voz, rostro, escritura, hasta extracción de patrones de comportamiento de secuencias multidimensionales dependientes del tiempo (Matich, 2001).

Una red neuronal artificial emula el modo en que el cerebro humano procesa información, el cual está constituido por millones de células llamadas neuronas. La analogía entre una neurona biológica y una artificial, se representa en la figura A.1, las conexiones entre los nodos (I_1, I_2, \dots, I_n) representan las dendritas y los axones (entradas), sin embargo, en este caso el axón puede funcionar como una salida (y), si se referencia a una neurona anterior a la que se está analizando. Los pesos (w_1, w_2, \dots, w_n) representan la sinapsis y la aproximación umbral representa la actividad realizada por el núcleo de la célula (soma).

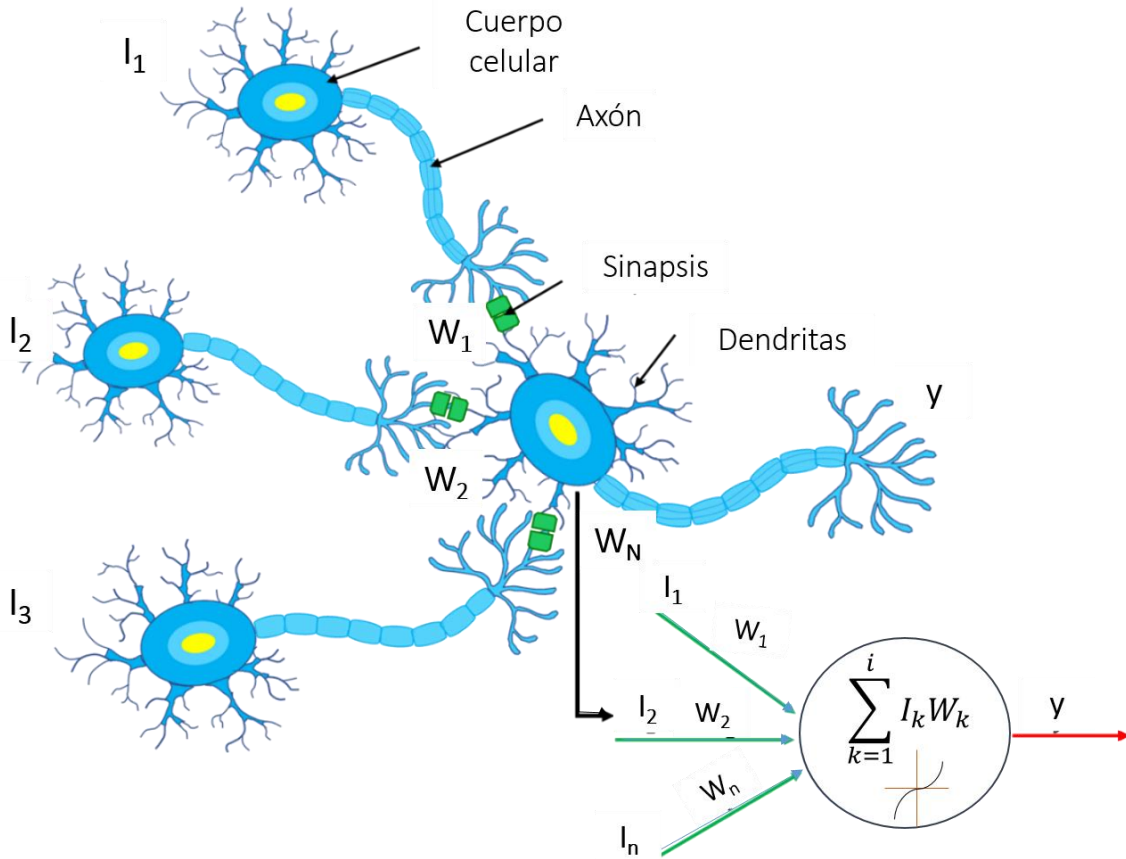


Figura A. 1 Analogía de neuronas biológicas con una neurona artificial

A.1 Elementos de una Red Neuronal

Una red neuronal está caracterizada por dos componentes principalmente, un conjunto de nodos y las conexiones entre estos. Los nodos pueden verse como unidades computacionales que reciben información externa (inputs) la cual es procesada para obtener una respuesta (output), este proceso descrito puede ser muy simple (tal como sumar las entradas) o bien, muy complejo (donde un nodo podría ser otra red neuronal por si solo) (García Benítez et al., 2016). Las unidades de procesamiento, por lo tanto, reciben, procesan y transmiten señales tal como las neuronas biológicas.

Las conexiones o pesos (weights) pueden manejar la información de manera unidireccional o bidireccional, y según sea el caso, estos afectan el comportamiento de la red, el cual se entiende como conocimiento emergente. Entre más conexiones se tenga entre los nodos o neuronas, la influencia de estos en el modelo será mayor.

En la figura A.2 se puede observar un esquema de una red de tres capas, lo cual puede variar, teniendo una capa de entradas (inputs), una capa oculta donde generalmente ocurre el procesamiento de datos, la cual puede estar constituida por más de una capa, y por último una capa de salida (output).

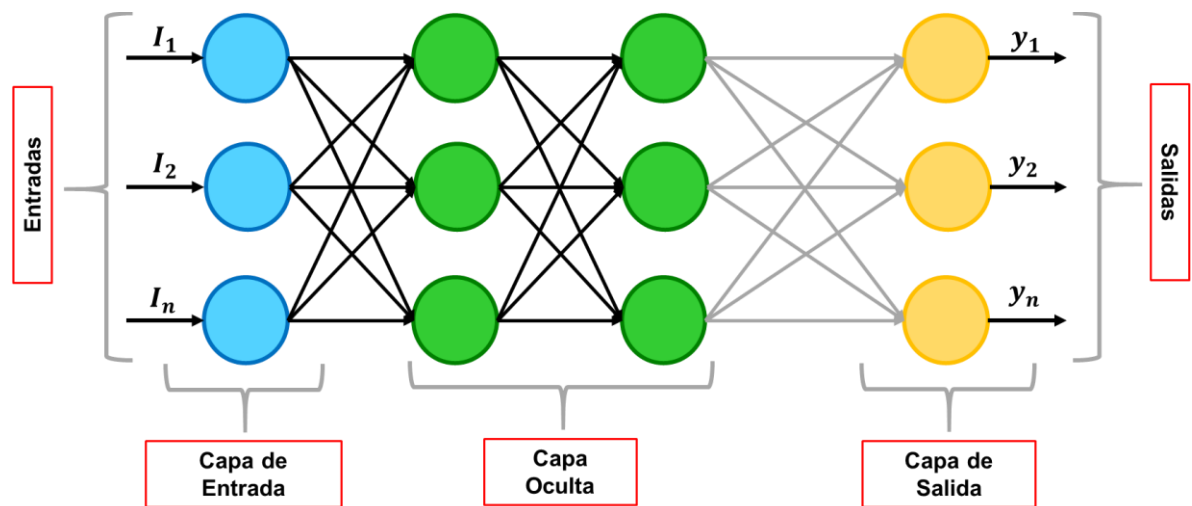


Figura A. 2 Red neuronal artificial multicapa. Modificada de (Matich, 2001).

Las neuronas pueden clasificarse según los valores que puedan tomar, de forma general se puede distinguir entre dos tipos principales:

- Neuronas binarias: estas solamente pueden tomar valores de 0 y 1 o bien de -1 y 1.
- Neuronas reales: estas por otra parte pueden tomar cualquier valor dentro del rango $[0,1]$ o $[-1,1]$.

A.2 Ventajas de las Redes Neuronales

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características semejantes a las del cerebro. Lo anterior permite numerosas ventajas y que este tipo de tecnología se esté aplicando en múltiples áreas (Matich, 2001). Algunas de las más importantes son:

- Aprendizaje adaptativo.
- Autoorganización.
- Tolerancia a fallos.
- Operaciones en tiempo real.

1 Aprendizaje adaptativo

Las redes neuronales pueden aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamiento, no es necesario especificar funciones de distribución de probabilidad ni modelos que describan algún tipo de fenómeno, comportamiento o relación entre las distintas partes estudiadas. Esto significa que las RNs son sistemas dinámicos auto adaptativos, es decir, tienen la capacidad de ajuste de los elementos procesales (neuronas)



que componen el sistema y son capaces de estar en constante cambio al adaptarse a cualquier nueva condición impuesta.

La función del diseñador de una red neuronal es únicamente la de la obtención de la arquitectura apropiada. No es problema del diseñador el cómo la red aprenderá a discriminar. Sin embargo, es necesario que desarrolle un buen algoritmo de aprendizaje que le proporcione a la red la capacidad de discriminar mediante un entrenamiento con patrones.

2 Autoorganización

Las redes neuronales emplean su capacidad de aprendizaje adaptativo para autoorganizar la información que reciben durante el aprendizaje y/o la operación. Este proceso consiste en la modificación de la red neuronal completa para llevar a cabo un objetivo en específico.

La autoorganización es la que provoca la generalización: facultad de las redes neuronales de responder apropiadamente cuando se les presentan datos o situaciones a las que no habían sido expuestas anteriormente (Hilera & Martínez, 1995).

3 Tolerancia a fallos

Comparadas con los sistemas computacionales tradicionales donde estos pierden su funcionalidad cuando sufren un error de memoria, las redes neuronales no lo hacen, si se produce un fallo en un número no muy grande de neuronas y a pesar de que el comportamiento del sistema se vea influenciado, no sufren una caída repentina.

Hay dos aspectos distintos respecto a la tolerancia a fallos:

- Las redes pueden aprender a reconocer patrones con ruido, distorsionados o incompletos. Esta es una tolerancia a fallos respecto a los datos.
- Las redes pueden seguir realizando su función, aunque con cierta degradación, aunque se destruya parte de la red.

La razón por la que las redes neuronales son tolerantes a los fallos es que tienen su información distribuida en las conexiones entre neuronas, existiendo cierto grado de redundancia en este tipo de almacenamiento.

4 Operación en tiempo real

La necesidad de realizar procesos con datos de forma muy rápida, es posible con las redes neuronales, gracias a su implementación paralela. Para que la mayoría de las redes puedan operar en un entorno de tiempo real, la necesidad de cambio en los pesos de las conexiones o entrenamiento es mínimo.

A.3 Topologías principales de las redes neuronales

La organización y disposición de las neuronas en una red neuronal se le conoce como topología o arquitectura, está formada por capas o asociaciones de neuronas que se

encuentran más o menos alejadas de las entradas y salidas de la red. Los parámetros fundamentales de una red son: el número de capas, las neuronas presentes en cada capa, su grado de conectividad y su tipo de conexión.

Las RNs se clasifican en dos clases de acuerdo con su número de capas:

- Redes monocapa
- Redes multicapa.

1. *Redes monocapa*

Las conexiones laterales se establecen entre neuronas pertenecientes a la única capa que constituye a la red, figura A.3. Generalmente son utilizadas para tareas relacionadas con auto-asociación, es decir, se regenera la información de entrada a la red cuando esta se presenta de forma incompleta o distorsionada (Hilera & Martínez, 1995).

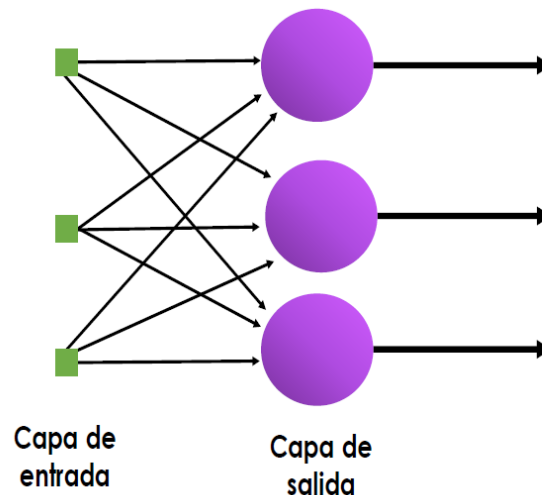


Figura A. 3 Red neuronal artificial monocapa.

2. *Redes multicapa*

Las redes multicapa son aquellas que disponen de agrupaciones de neuronas en dos o más niveles o capas. Para estos casos, es posible distinguir a qué capa pertenece una neurona si se conoce qué señales recibe en la entrada y cuál es el destino de la señal de salida.

Cuando las neuronas de una entrada reciben señales de una capa posterior y envían señales a una capa de salida desde una capa anterior, se le llama conexión de propagación hacia adelante o feedforward, figura A.4. Por otra parte, para el caso de que las conexiones de salida de las neuronas de capas posteriores se conecten a la entrada de capas anteriores se le conoce como conexiones de retroalimentación o feedback, figura A.5, donde una neurona puede estar conectada a las neuronas de otra capa y a ella misma.

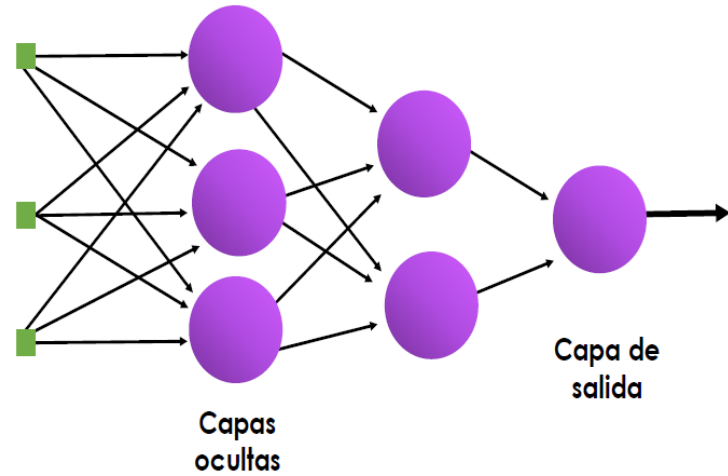


Figura A. 4 Red neuronal multicapa feedforward o perceptrón.

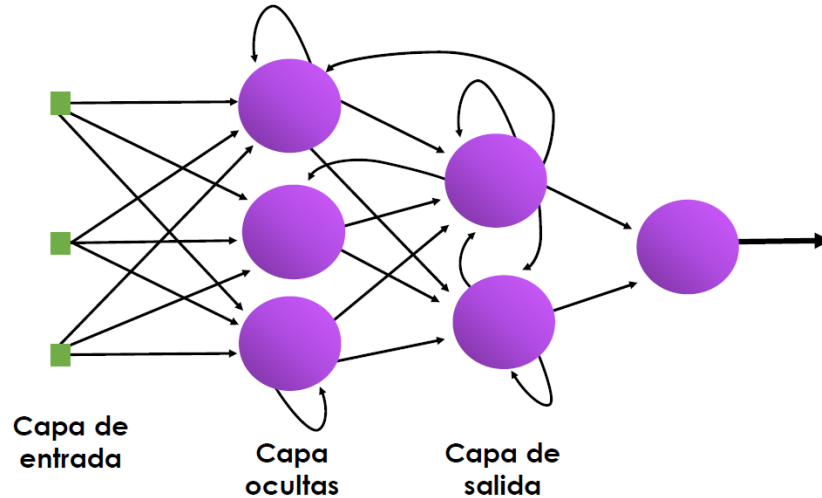


Figura A. 5 Red neuronal multicapa recurrente (feedback).

A.3.1 Función de Entrada

Todos los valores de entrada a la RN son considerados por la neurona como si fuera un solo valor, a esta acción se le conoce como entrada global. La cual depende de la combinación de las entradas simples, esto se logra a través de la función de entrada, calculada a partir de un vector. Es entonces cuando los valores de entrada se multiplican por los pesos anteriormente ingresados, dichos pesos al inicio del proceso de aprendizaje son designados al azar y modificados conforme la red aprende. Por lo tanto, los pesos cambian la influencia que tiene cada uno de los valores de entrada, es decir, que permiten que un gran valor de entrada tenga solamente una pequeña influencia, si estos son lo suficientemente pequeños.

Las funciones más utilizadas y conocidas son:



- *Suma ponderada de las entradas pesadas*: Es la suma de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicándolos por su correspondiente peso.

$$\sum_j (n_{ij} w_{ij}), \rightarrow j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

- *Producto de las entradas pesadas*: Es el producto de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus correspondientes pesos.

$$\prod_j (n_{ij} w_{ij}), \rightarrow j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

- *Máximo de las entradas pesadas*: Solamente se toma en consideración el valor de entrada más fuerte, previamente multiplicado por su correspondiente peso.

$$\text{Max} (n_{ij} w_{ij}), \rightarrow j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

A.3.2 Función de activación

Las neuronas artificiales tienen un estado de activación, algunas pueden ser similares a las neuronas biológicas, activas o inactivas, sin embargo, las neuronas artificiales también pueden tomar cualquier otro valor dentro de un conjunto.

La función de activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global (menos el umbral, θ_i) en un valor (estado) de activación, cuyo rango normalmente va de (0,1) o de (-1,1).

Las funciones de activación más comunes se presentan a continuación.

- *Función lineal*:

Por encima o por debajo de esta zona se fija la salida en 1 o -1. Cuando $a = 1$, la salida es igual que la entrada figura A.6.

$$f(x) = \begin{cases} -1, & x \leq -1/a \\ a * x, & -\frac{1}{a} < x < \frac{1}{a}, \rightarrow x = \text{gin} - \theta_i \text{ y } a > 0 \\ 1, & x \geq 1/a \end{cases} \quad (4)$$

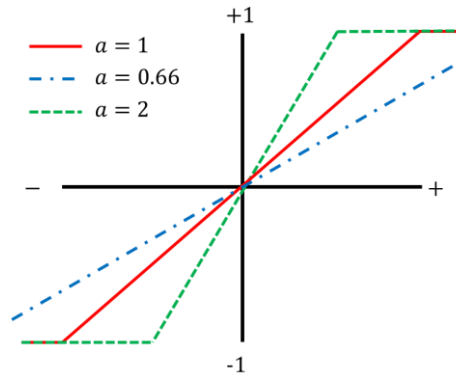


Figura A. 6 Función lineal de activación. Modificada de (Matich, 2001).

- Función sigmoide:

Los valores de salida están comprendidos en un rango entre 0 y 1. Al modificar el valor de g , se ve afectada la pendiente de la función de activación, figura A.7.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-gx}}, \quad \rightarrow \quad x = gin_i - \theta_i. \quad (5)$$

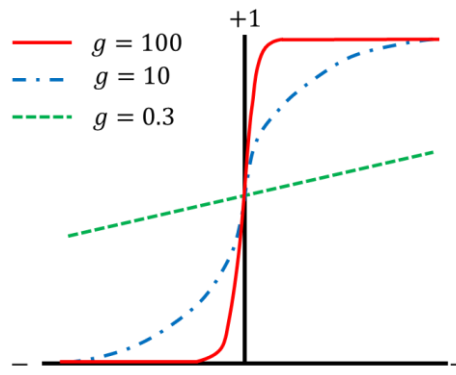


Figura A. 7 Función de activación sigmoide. Modificada de (Matich, 2001).

- Función tangente hiperbólica

Los valores de salida están comprendidos dentro del rango de -1 a 1. Al modificar el valor de g , se ve afectada la pendiente de la función de activación, figura A.8.

$$f(x) = \frac{e^{gx} - e^{-gx}}{e^{gx} + e^{-gx}}, \quad \rightarrow \quad x = fin_i - \theta_i. \quad (6)$$

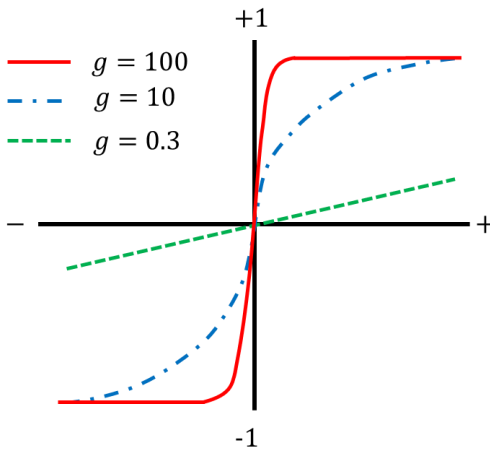


Figura A. 8 Función de activación hiperbólica. Modificada de (Matich, 2001).

A.3.3 Función de salida

El valor resultante de esta función es la salida de la neurona i (out_i), por lo tanto, la función de salida determina que valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente.

Las funciones de salida más comunes son:

- *Ninguna*: Es la función más sencilla, tal que la salida es la misma que la entrada. Es también llamada función identidad.
- *Binaria*:

$$B \begin{cases} 1 & \text{si } act \geq \xi_i \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}, \quad \xi_i \text{ es el umbral.} \quad (7)$$

A.3.4 Pesos sinápticos

Las conexiones que unen las neuronas tienen asociado un peso que es el que hace que la red adquiera conocimiento. Una neurona recibe un conjunto de señales que le dan la información del estado de activación de todas las neuronas con las que se encuentra conectada. Cada conexión de la neurona postsináptica i con la neurona presináptica j está ponderada por un peso w_{ij} . Normalmente se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada neta que recibe una neurona net_j es la suma del producto de cada señal individual por el valor de la sinapsis que conecta ambas neuronas.

A.3.5 Mecanismos de aprendizaje

El procedimiento donde una red neuronal aprende a calcular la salida correcta a partir de los datos de entrada del conjunto de entrenamiento, se le denomina proceso de entrenamiento. Por lo tanto, el aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos como respuesta a una información de entrada, y que se ve reflejado en la modificación, destrucción o creación de conexiones entre neuronas. Entendiendo como



destrucción cuando el valor del peso de una red neuronal es igual a cero, de forma contraria, se habla de una creación de conexión cuando el peso toma un valor distinto de cero.

El aprendizaje para una red neuronal termina cuando las tendencias de cambio en los pesos de las conexiones a lo largo del tiempo son igual a cero, esto significa que la red ha aprendido.

Existen dos métodos de aprendizaje de gran importancia:

- Aprendizaje no Supervisado.
- Aprendizaje Supervisado.

1. Aprendizaje no supervisado

Las redes con aprendizaje autosupervisado o autoorganizado no requieren de un agente externo para realizar el ajuste de sus pesos sinápticos. La red no recibe información alguna que pueda indicar si la salida es correcta o no, por ello, se dice que estos tipos de redes son capaces de autoorganizarse.

Los procesos de aprendizaje de estas redes se clasifican en dos tipos: aprendizaje Hebbiano y aprendizaje competitivo y cooperativo.

2. Aprendizaje supervisado

El aprendizaje de la red se caracteriza por un entrenamiento controlado, un agente externo o supervisor determina la respuesta considerada correcta, la cual, la red debe obtener a partir de una entrada también controlada. En caso de no coincidir la salida con lo que se busca, se realiza la modificación de los pesos de las conexiones con la finalidad de obtener la salida deseada o bien una salida aproximada a esta.

El aprendizaje supervisado se clasifica en tres formas, de acuerdo a la manera de llevarse a cabo:

- *Aprendizaje por Corrección de Error*: Se lleva a cabo ajustando los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos en la salida, de acuerdo con el margen de error cometido.
- *Aprendizaje por Esfuerzo*: Este tipo de aprendizaje es más lento que el anterior ya que la salida de la red no puede compararse al valor deseado para poder obtener el error cometido. El funcionamiento de esta red es similar a los métodos numéricos. La función del supervisor en este caso es indicar mediante una señal de refuerzo si la salida de la red se ajusta a la deseada (*éxito* = +1 o *fracaso* = -1) y en función de ello se ajustan los pesos basándose en un mecanismo de probabilidades.
- *Aprendizaje Estocástico*: Básicamente consiste en realizar cambios aleatorios en los pesos y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de atribuciones de probabilidad.



A.4 Algoritmo de aprendizaje Backpropagation

Minsky y Papert en 1969 demostraron que una red de una sola capa feedforward puede tener muchas restricciones. El descubrimiento de un método general efectivo de entrenamiento de una red neuronal multicapa, backpropagation fue propuesto en 1986 por Rumelhar, Hinton y Williams. La idea central de esta solución es que los errores de las unidades de las capas ocultas son determinadas por retro-propagación de errores desde las unidades de la capa de salida.

La propagación hacia atrás de errores o retro-propagación (del inglés *backpropagation*) es un método de cálculo del gradiente utilizado en algoritmos de aprendizaje supervisado para entrenar redes neuronales artificiales. El método emplea un ciclo propagación – adaptación de dos fases. Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, éste se propaga desde la primera capa a través de las capas siguientes de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas.

Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida a todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.

La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada. Después del entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que contenga ruido o que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta responderán con una salida activa, si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento.

El algoritmo backpropagation se encarga de buscar el valor mínimo del error para los pesos, esto se logra mediante una técnica conocida como regla del gradiente descendiente o regla delta. Los pasos de este algoritmo de manera generalizada son los siguientes:

- Cálculo del error, es decir, qué tanto se alejan los valores de salida de la red de aquellos valores deseados o considerados correctos.
- Error mínimo, lo que se busca en este paso es determinar si el error obtenido es el mínimo posible.
- Actualizar los parámetros, si el error calculado anteriormente es muy grande, es necesario actualizar los valores de los pesos del modelo. El proceso se repite hasta que el error calculado sea el mínimo posible.

Al encontrar el error mínimo, es posible obtener los valores de salida deseados predichos a partir de una entrada.

La figura A.9 muestra, en diagrama de bloques el proceso anteriormente descrito.

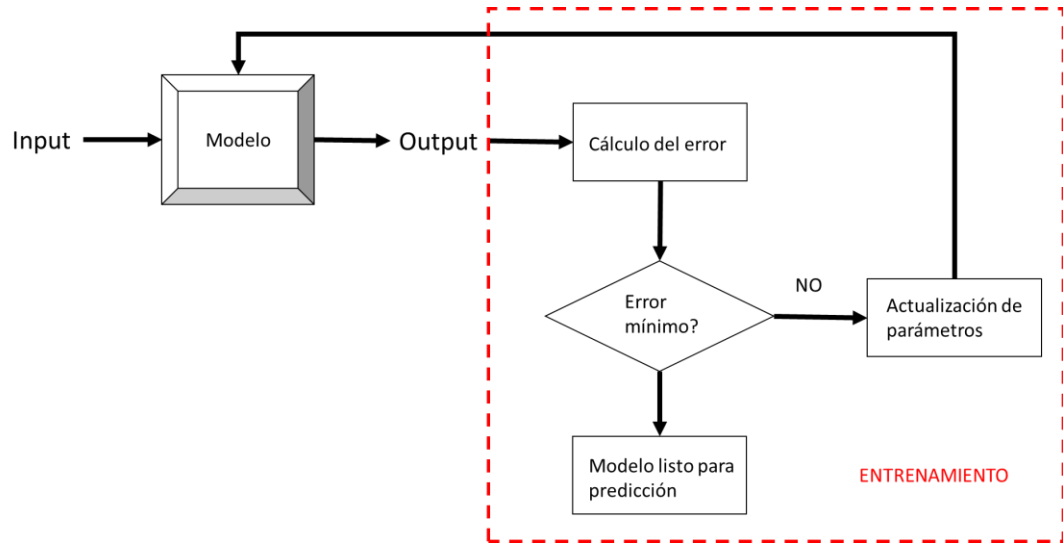


Figura A. 9 Diagrama de cuerpo libre del aprendizaje Backpropagation.

El entrenamiento de una red de retro-propagación, se puede dividir en las siguientes tres etapas.

- *Entrenamiento Feedforward con señales de entrada:* Cada nodo de entrada recibe una señal, la cual es enviada a todas las unidades ocultas. Cada unidad oculta determina una activación para enviar señales a otros nodos ocultos hasta llegar a todos los nodos de las capas de salida.
- *Retro-propagación de errores:* Cada nodo de salida compara su valor de activación o calculado, con el valor de salida deseada. Basado en estas diferencias, el error es propagado hacia los nodos anteriores.
- *Ajuste de pesos:* Todos los pesos se calculan simultáneamente basados en los errores que fueron propagados en la red.

Este método es considerado como la generalización de la regla delta para la función de activación en redes de múltiples capas. La regla delta solo trabaja para la capa de salida, backpropagation o generalización de la regla delta es un camino para crear valores deseados en las capas ocultas.



Referencias

- Aceves-Quesada, F. (1998). “Geología y geomorfología del Volcán Nevado de Toluca”. Universidad Nacional autónoma de México, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría. p 116.
- Arce, J., Layer, P., Martínez, I., Salinas, J., Macias-Romo, M., Morales-Casique, E., Benowitz, J. y Oscar, E. (2015). “Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y sus alrededores, sur de la Cuenca de México”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), p. 123-143.
- Arellano, A. R. (1953). “Estratigrafía de la Cuenca de México”. Congreso Científico Mexicano, México, Vol. 3, p. 172-187.
- ASTM (2008).
- CONABIO (2014). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/pobla/indsol/pobzmun10gw.
- Chouteau, Michel., Krivochieva, Stefka., Rodríguez-Castillo, Ramiro., González-Morán, Tomás., Jouanne, Virginie. (1994). “Study of the Santa Catarina aquifer system (Mexico Basin) using magnetotelluric soundings”. Journal of Applied Geophysics. Vol. 31, pp. 85-106.
- Cruz, V., Singh, K. y Ordaz, M. (2017). “¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?”. Revista Digital Universitaria (RDU), vol. 18, núm. 7, septiembre-octubre. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2017.v18n7.a10>
- de Cserna, Z., de la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R. (1988). “Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 104, p. 71.
- Demant, A. y Robin, C. (1975). “Las fases del vulcanismo en México-una síntesis en relación con la evaluación geodinámica desde el Cretácico”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 7(1), p. 9-38.
- Enciso-De la Vega, S. (1992) “Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México” Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10 (1), p. 26–36.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal (2008). “Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Tláhuac (PDDU)”.
- Gaceta UNAM (2013). “Necesarios, más estudios sobre el pozo profundo en el DF. Mexico City, Mexico. [Necessary, more studies concerning the deep borehole in Mexico City]”. No. 4486, Gaceta UNAM, Mexico City. Available via <http://www.dgcs.unam.mx/gacetaweb/2013/130131/gaceta.pdf>.



-
- García-Benítez, S., López-Molina, J. y Castellanos-Pedraza, V. (2016). “Neuronal networks for defining spatial of rock properties in sparsely instrumented media” *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. 68 No. 3, p. 553-570.
 - García-Benítez, S., Trejo P., Castillo I., Muratalla G. (2019). Informe del proyecto: Estudios geotécnicos geofísicos y geológicos en diferentes pueblos y colonias de la delegación Tláhuac. Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - García, S., Ramos, E., Lermo, J., Álvarez, I., Machado, R. y Luna, J. (2019). Estudio de microzonificación sísmica entre las sierras de Chichinautzin y Santa Catarina, al sur de la Ciudad de México, y la relación con los agrietamientos de la zona”. XXII Congreso Nacional de ingeniería sísmica. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
 - García-Palomo, A. (1998). “Evolución estructural en las inmediaciones del Volcán Nevado de Toluca, Estado de México”. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Tesis de Maestría, p. 146.
 - Gobierno de la Ciudad de México, 2017, “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones”, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, 15 de diciembre, Ciudad de México, México.
 - 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). “The DRASTIC-Sg Model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City”. *Hydrogeol. Journal*, 22 (6), p. 1-17. Doi:10.1007/s10040-014-1130-4,2014.
 - Hilera, J. y Martínez, H. (1995). “Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones”. RA-MA. España.
 - Hiriart, F. y Marsal, R. (1969). “El hundimiento de la CM. En: El Hundimiento de la CM Proyecto Texcoco. SHCP, NAFINSA.
 - Huizar-Alvarez R, Carrillo-Rivera JJ, Hergts T, Serrano A, Cardona A (2004). “Chemical response to groundwater abstraction southeast of Mexico City”. *Hydrogeol J* 12(4), p. 436–450.
 - INEGI (2010). Manual de cartografía geoestadística, Censo de población y vivienda.
 - Jaimes, M. (2017). “Sismo del 19 de septiembre de 2017 M7.1, Puebla – Morelos”. Instituto de Ingeniería UNAM.
 - Lermo, J., García, S., Sánchez, F., Ramos, E., Álvarez, I., Luna J., Luna, J., Machado, O., Zúñiga, A., Jiménez, N. & Téllez, N (2019). “Actualización de la zonificación geotécnica y sísmica de la CDMX y áreas aledañas-parte sur”. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 1(140), pp. 14-16. issn 1870-347x. Disponible en: <http://gacetaii.iingen.unam.mx/gacetaii/index.php/gii/article/view/2649>



-
- Lesser, J. y Cortés, M. (1998). “El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el sistema de drenaje”. *Ingeniería Hidráulica en México*, 3 (13), p. 3-18.
 - Lugo-Hubp, J., Mooser, F., Pérez-Vega, A. y Zamorano-Orozco, J. (1994). “Geomorfología de la Sierra de Santa Catarina, D.F., México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), p. 43-52.
 - Macías, J., Arce, J., García-Tenorio, F., Layer, P., Rueda, H., Reyes-Agustín, G., López-Pizaña, F., Avellán, D. (2012). “Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico”. *Geological Society of America, Field Guide* 25, p. 163–193.
 - Marsal, R. y Mazari, M. (1959). “El Subsuelo de la Ciudad de México” Vol. I. *Ciudad Universitaria, México: Instituto de ingeniería, UNAM.*
 - Marsal, R. y Sáinz, I. (1956). “Breve descripción del hundimiento de la Ciudad de México” *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Recuperado de <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca02/1902/1956-19-2%20Marsal-Sainz.pdf>
 - Matich, D. (2001). “Redes Neuronales: Conceptos Basicos y Aplicaciones”. *Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Rosario Departamento de Ingeniería Química Grupo de Investigación Aplicada a la Ingeniería Química (GIAIQ).*
 - Martínez-González, J. A. (2011). “Evaluación de las grietas de la Cuenca de México originadas por la morfología de la roca basal usando mediciones de microtremores”. *Tesis de Licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Geofísico.*
 - Minsky, M., & Papert, S. (1969). *Perceptrons*. M.I.T. Press.
 - Mooser, F. (1963). “La cuenca lacustre del Valle de México”. *Mesas Redondas sobre Problemas del Valle de México, Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, A. C. México., pp. 12-16.*
 - Mooser, F. (1967). “Tefracronología de la Cuenca de México para los últimos treinta mil años”. *Boletín Instituto Nacional de Antropología e Historia*, 30, p. 12-15.
 - Mooser, F. (2018). “Geología del Valle de México y otras Regiones del País”. *Colegio de Ingenieros Civiles de México, CDMX, México.*
 - Mooser, F., White, S., Lorenzo, J. (1956). *La Cuenca de México. “Consideraciones Geológicas y Arqueológicas”.* Instituto Nacional de Antropología e Historia, Dirección de Prehistoria, México. DOI: <https://doi.org/10.2307/276459>.
 - Santiago-López, D. (2018). “Análisis de la información geológica, geofísica e hidrogeológica en la evaluación de un acuífero profundo (Caso Santa Catarina 3A)”. *Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.*
 - Santoyo E., Ovando E., Mooser F. y León E. (2005). “Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México”. *Ciudad de México: TGC Geotecnia S.A. de C.V.*
-



-
- Secretaría de Protección Civil. (2014). “Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México”. Actualización de los Mapas de Riesgo. Tláhuac. Recuperado de http://www.atlas.cdmx.gob.mx/mapas/MR_Tlahuac.pdf.
 - Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M. (2004). “Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130, p. 197–226.
 - Tamez E., Santoyo E., Mooser F. & Gutiérrez C. (1987). “Manual de diseño geotécnico”. Vol. I, Metro en Cajón. México: Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, Departamento del Distrito Federal.
 - Terzaghi K., Peck R. & Gholamreza M. (1996). “Soil mechanics in engineering practice” (3a. ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
 - Torres, C. (2017). “Efectos de sitio del sismo del 19 de septiembre de 2017 en la Ciudad de México”. *Geotecnia* 246, SMIG. pp 18-22. Recuperado de <https://issuu.com/smigorg/docs/revista-geotecnia-smig-numero-246>.
 - Unda-López, J. (2016). “Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México”. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
 - Vargas C, Ortega-Guerrero M. (2004). “Fracture hydraulic conductivity in the Mexico City clayey aquitard: field piezometer rising-head tests”. *Hydrogeol J* 12, p. 336–344.
 - Zamorano-Orozco, J., Tanarro-García, L., Lugo-Hubp, J., Sánchez-Rubio, G. (2002). “Evolución geológica y geomorfología del complejo dómico Los Pitos, norte de la Cuenca de México”. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19 (1), p. 66–79.