COMPLEMENTO DE INVESTIGACION PARA LA ALCALDÍA TLÁHUAC

DERIVADO DE LOS ESTUDIOS 2018-2019 Y DE LAS ACCIONES EN LA ADMINISTRACIÓN 2021-2024

TLAHUAC
Alcaldía que Renace para tu
BIENESTAR

INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM®

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TLÁHUAC Alcaldía que Renace para tu BIENESTAR

EN TLÁHUAC PAZ Y BIENESTAR

COMPLEMENTO DE INVESTIGACION PARA LA
Alcaldía Tláhuac CDMX
derivado de los estudios 2018-2019 y de las acciones en la administración 2021-2024

EL HÁBITAT EN ESCENARIOS DE AGRIETAMIENTO: LA TRANSICIÓN ABRUPTA EN TLÁHUAC

presenta
Dra. Silvia García
Investigador

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

sgab@pumas.iingen.unam.mx
www.iingen.unam.mx
55 54162659

Resumen

A partir de los análisis bajo Convenio (2018-2019) y de las experiencias en el tratamiento de nueva información y enfrentamiento a los retos de reconstrucción - rehabilitación en la presenta administración (2021-2024), esta actualización de investigación utiliza la inteligencia artificial y el aprendiza automático para estudiar a profundidad los factores que inducen las rupturas en los suelos de Transición al sur de la CDMX, particularmente en los terrenos afectados de la Alcaldía Tláhuac. Las conexiones espaciales entre elementos como la topografía, la extracción de agua subterránea, la densidad de vías de comunicación, la concentración poblacional y la presencia de sedimentos específicos sobre configuraciones de roca base, sirven para construir mapas de micro-regiones en diferentes niveles de riesgo.

Las métricas asequibles para calificar la vulnerabilidad y exposición al agrietamiento son el soporte de criterios prácticos para desarrolladores de infraestructura civil y constructores a escala local de forma que ajusten sus diseños y minimicen los efectos de los desplazamientos sobre superestructuras y elementos enterrados.

Contenido

Antecedentes

página 4/24

Generalidades
Extraer y dotar: el eterno problema con el agua
Estudios anteriores sobre agrietamiento

Objetivo/ justificación

página 11/24

Se aclara el motivo del estudio y las necesidades de la construcción segura en Tláhuac.
Se explican las prioridades y la naturaleza de los productos de los análisis.

Método

página 14/24

Zonificaciones
Estudios
Resultados

Conclusiones y recomendaciones

página 24/24

Reflexiones finales

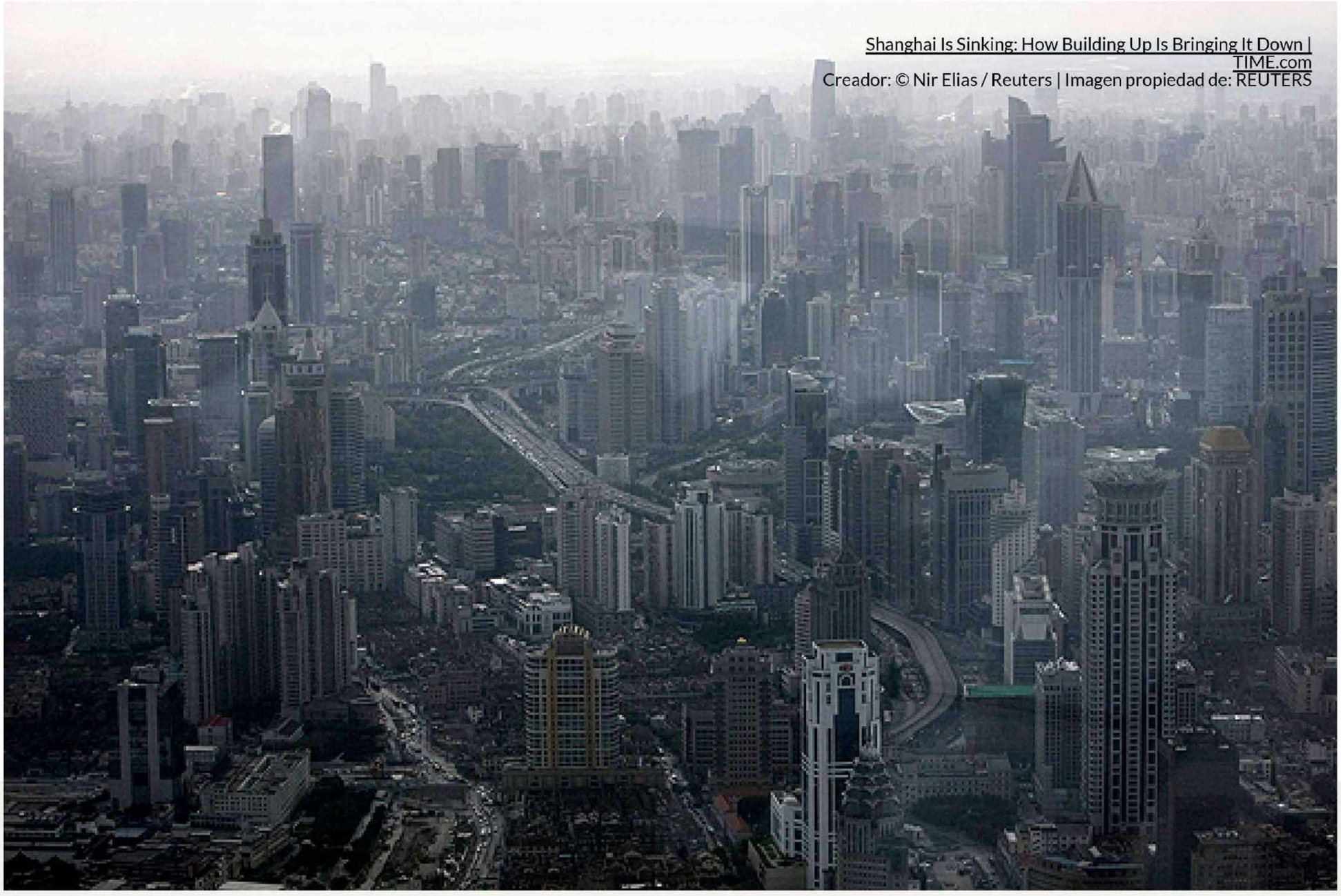
GENERALIDADES

En áreas con rápida urbanización y crecimiento demográfico, la explotación prolongada de las aguas subterráneas está provocando el hundimiento de la tierra con los peligrosos impactos derivados. En muchas ciudades costeras y deltas, como Ho Chi Minh, Laos, Houston, New Orleans, Dhaka, Rotterdam, Bangkok, Manila, Tokio, Alexandria, Miami y Yakarta, el hundimiento de la tierra supera considerablemente (en algunos sitios más de 10 veces) el aumento absoluto del nivel del mar, lo que intensifica la vulnerabilidad a las inundaciones y provoca graves consecuencias sobre la operación eficiente de la infraestructura urbana. Las soluciones para combatir el desequilibrio entre el hundimiento de los suelos y las mareas crecientes deben ser creativas y sobre todo oportunas: por lo menos una metrópoli en cada continente estaría en riesgo de desaparecer antes del 2050 (Voraakhom, 2020). *Ciudades que se hunden*, dentro del marco del cambio climático global, es y será una amenaza transnacional.

¿Pero qué sucede con la subsidencia en áreas no costeras? La narrativa sobre la amenaza por el calentamiento global y el aumento del nivel del mar es clara -incluso se ha vuelto familiar- pero menos conocido es el fenómeno de las ciudades no costeras que se hunden como resultado de la extracción de agua de los acuíferos que provoca el colapso de las capas de suelo que las sostiene. Esta catástrofe en cámara lenta (aunque según los estándares geológicos avanza a una velocidad vertiginosa) amenaza la estabilidad de los edificios y las instalaciones enterradas de forma alarmante, haciendo que estas ciudades-no-costeras sean incluso más vulnerables a los mismos desastres naturales que amenazan a sus semejantes en costa (Collados-Lara et al., 2020).

La CDMX, a 2250 m.s.n.m., tiene la complicadísima coincidencia de agua superficial escasa y densidad poblacional entre las más altas del mundo, por lo que la explotación del agua subterránea es continua y así lo es el hundimiento de sus suelos. Pero la capital mexicana no está sola en este situación. Investigadores de la Universidad Estatal de Arizona han informado que partes de Phoenix, que se encuentran a más de 330 metros sobre el nivel del mar, se están hundiendo debido a la extracción de agua subterránea y predicen que, a medida que avanza el fenómeno, los daños alcanzarán la integridad de canales, líneas de servicios públicos, tuberías de agua potable, desagües, alcantarillas y cimientos de edificios (Thompson, 2020).

The New York Times
Jakarta Is Sinking So Fast, It Could End Up Underwater - The New York Times



Shanghai Is Sinking: How Building Up Is Bringing It Down | TIME.com
Creador: © Nir Elias / Reuters | Imagen propiedad de: REUTERS

Los geocientíficos alemanes que estudian el hundimiento en Irán han documentado que en Teherán, a 1189 m.s.n.m., el hundimiento ha sido el causante de desplazamientos de grandes edificios, carreteras y oleoductos. Estudios geotécnicos han encontrado que Bogotá, Colombia, a 2630 m.s.n.m., se hunde alrededor de una a dos pulgadas por año debido a la extracción de agua subterránea y escenarios similares han sido reportados en muchas otras ciudades no costeras como Delhi, São Paulo, Las Vegas y Riyadh, por mencionar algunas.
No sólo existen los daños físicos a los edificios y a la infraestructura causados por hundimientos y movimientos de tierra, sino que la subsidencia puede aumentar el riesgo de daño físico causado por otros peligros. Los riesgos de exposición son crecientes y se hacen cada vez más complejos de evaluar. Por ejemplo, la extracción de agua subterránea hace que los suelos debajo de ciertas áreas se hundan más que las circundantes y esto provoca, por ejemplo, que las alcantarillas vean mermada su capacidad y las inundaciones sean de muy alta y costosa escala, con una dependencia espacial relativamente notoria. La aparición de cuencas susceptibles a grandes inundaciones debe ser estudiada entonces desde la perspectiva de daños-manifestaciones que podrían ser causados o resultar de un peligro cubierto. Este sería un ejemplo del complejo análisis de causalidad que podría surgir cuando un hundimiento, un peligro excluido, cause eventos que resulten en daños físicos.
Las experiencias en zonas sísmicas también deben ser ajustadas respecto a las tendencias de subsidencia como indicador de exposición potencial. La simple analogía del castillo de naipes (Badillo y Rico, 1990) ilustra cómo los suelos saturados con agua subterránea son inherentemente más estables y que los suelos desestabilizados por la extracción de agua subterránea tienen mayor probabilidad de cambiar, y de hacerlo más drásticamente, cuando ocurre un terremoto. Eso significa que, para un terremoto de una magnitud dada, el daño físico resultante probablemente será muy diferente en áreas donde se ha producido hundimiento -sobre todo si ha sido acelerado y con agrietamiento- porque las deformaciones por carga dinámica deben asociarse a las de un suelo menos estable o con propiedades y resistencias fundamentalmente distintas. Por lo tanto, es posible anticipar que la exposición al riesgo por terremotos, en ciertos lugares del planeta, debería estar asociada al fenómeno del hundimiento desde posiciones multi-paramétricas y evolutivas.

Extraer y Dotar: el eterno problema con el agua en la CDMX

Ciudad de México, al borde de una crisis por el agua
The New York Times , 2017

Siempre escasa de agua, la Ciudad de México mantiene una tendencia a perforar (cada vez más profundo) para responder a la demanda del recurso con lo que va modificando, gradual y sostenidamente, los estratos de arcilla más superficiales. El sistema del que los capitalinos extraemos el líquido es el acuífero-acuitardo de la Zona Metropolitana de la CDMX (figura<siguiente pág). El sistema está en el sur poniente del Valle y ocupa el 17% de la superficie de la cuenca endorreica y el agua potable proviene del suministro del acuífero . La ciudad y el acuífero están separados, en su mayor, parte por un acuitardo arcilloso cuyo espesor promedio es de alrededor de 50 metros. El acuífero alcanza profundidades mayores a 800 metros y en el se han instalado pozos de bombeo, desde 1935, que se integran en baterías según la región: Norte, Centro, Oriente, Sur y Poniente. El Sistema Sur (el más grande) se divide en los subsistemas Coyoacán, Tulyehualco, Pozos Aislados G.A.V.M, Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta y Auxiliar Xotepingo, mientras que el Oriente comprende Ampliación Tláhuac, Agrícola Oriental y Santa Cruz Meyehualco. La profundidad promedio de los pozos es de 200 m (de 100 hasta 400 m) excluyendo los construidos más recientemente que llegan a más de 1000 m.

Por otro lado, cuando se completó el Gran Canal, a fines del siglo XIX, como la gran hazaña de ingeniería que fue, se pensó resolvería los problemas de inundaciones que habían asolado la ciudad durante siglos. Basado en trabajo por gravedad, el canal no soportó la alarmante tasa de hundimiento (además heterogénea) de la megalópolis y se sumó a las obras en ciclo vicioso que intentan desalojar las aguas residuales de los capitalinos.

Hoy día ambas caras del problema se ven agravados, sin duda, por el cambio climático. Más calor y sequía significan más evaporación y aún más demanda de agua, agregando presión para explotar depósitos distantes a costos asombrosos o drenar aún más los acuíferos subterráneos y acelerar el colapso de la ciudad. Los episodios de lluvia intensa (precipitaciones muy superiores a la media) se presentan cada vez con más frecuencia lo que pone en jaque a los sistemas de drenaje que, rebasados, evolucionan hacia escenarios complejísimos de inundaciones graves, socavación de alta escala y colapsos de infraestructura.

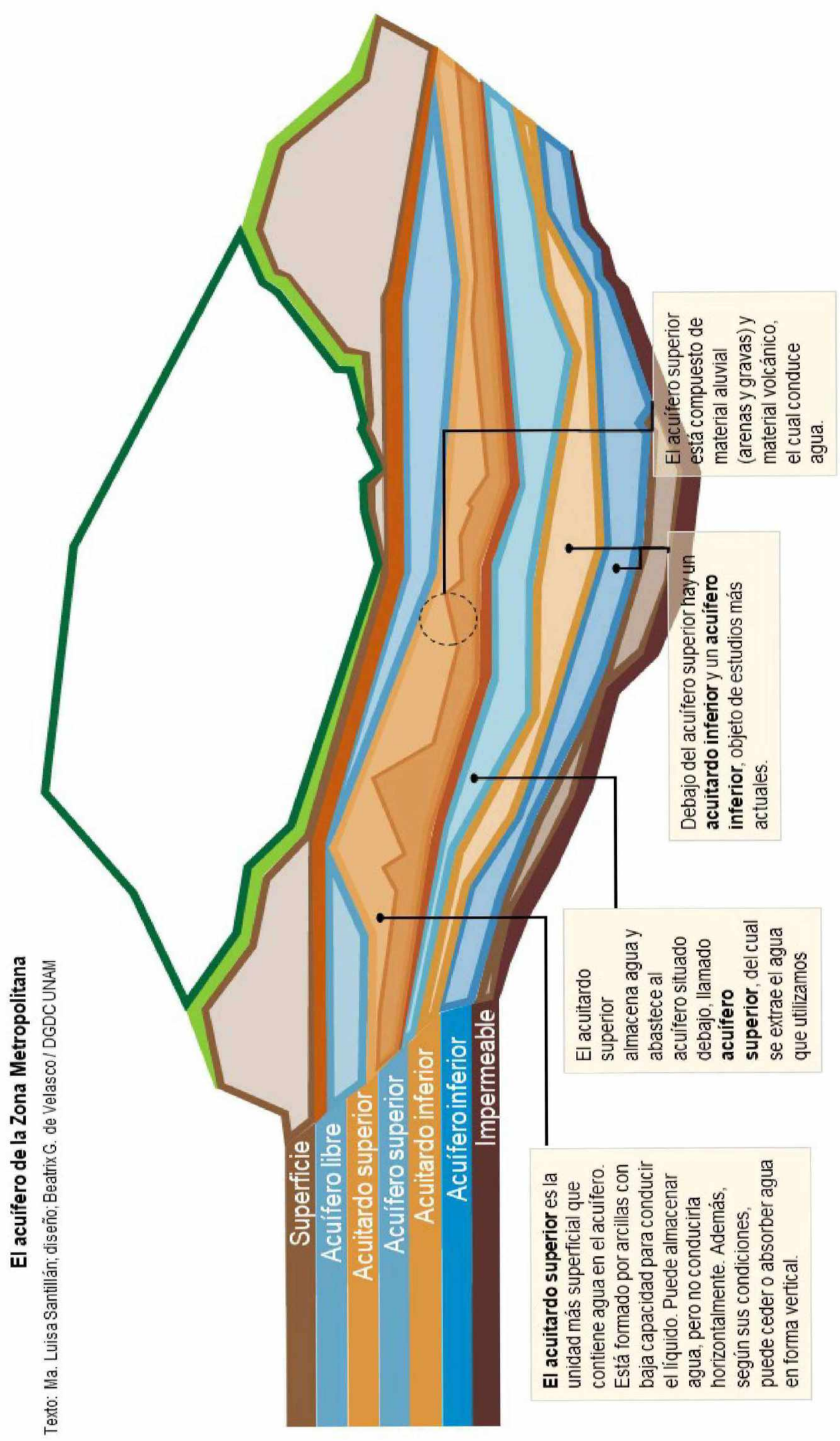


Figura. Sistema acuífero de la Zona Metropolitana, tomada de Ciencia UNAM

En la Transición (zona geotécnica llamada así por migrar entre el Lago y la Loma) de Tláhuac, se suma una manifestación perturbadora, las grietas en el suelo. Calles, aceras, tuberías, grandes edificios y casas familiares, se ven de alguna manera afectados por la condición "rota" del medio que se idealiza continuo. Es reconocido por diversos estudiosos (en ramas del *geo* y de la ingeniería) que, si la Ciudad de México -su fundamento urbano- estuviera construida sobre arcilla, dispuesta en capas suficientemente potentes y homogéneas con bases rígidas regulares, se hundiría al mismo ritmo y el proceso sería una anécdota. Pero en algunas regiones de Tláhuac grandes sectores viven sobre una mezcla de arcilla, suelo volcánico e intercalaciones (de muy diversas rigideces y continuidades) que sobre yacen a una base semi-firme e irregular, lo que genera hundimiento desigual con las lógicas fisuras (algunas dramáticas).
El interés por entender lo que sucede cuando un suelo se agrieta es vital para esta Alcaldía. Los importantes daños económicos, sociales y ambientales asociados con roturas de suelo pueden advertirse mejor si se menciona lo que provocan: pozos de extracción o inyección con daños en el revestimiento o en su propia estructura que ceden o se derrumban con la consecuente inhabilitación de la región -por contaminación, desestabilización etc-, oleoductos y gasoductos que se ovalizan y/o rompen fugando las sustancias que conducen con el riesgo de los efectos secundarios (explosiones), canalizaciones para el transporte de agua (residual y potable) que pueden erosionar grandes volúmenes de suelo en sólo minutos o "construir" túneles -de enorme tamaño- que se reconocen hasta que colapsan sus techos -por ejemplo durante un terremoto-, estructuras sobre superficie (carreteras, calles, diques, casas y edificios, incluidos estructuras del patrimonio histórico) que pierden verticalidad o fallan ante los esfuerzos que induce el desplazamiento/apertura de una grieta. Tal es la magnitud de los efectos que los esfuerzos por *comprender* al hundimiento y las grietas derivadas, además de participar en enriquecer el estado del arte, deben trabajar en *anticipar* las manifestaciones y aportar a mejores estructuraciones.

Las inundaciones históricas de la CDMX.
En 1629, durante la época de la Colonia, la CDMX vivió una lluvia que se dice duro 36 horas. Esta ocasionó -literalmente- la desaparición de la ciudad y la muerte de miles de familias. Se dice que la ciudad quedó sumergida por el agua durante 5 años, tanto que sólo se podía andar en canoa y se realizaban misas en las azoteas para confortar a los sobrevivientes.

Foto : La Gran inundación de 1950 de la CDMX

Estudios anteriores sobre agrietamiento

La rotura del suelo, con apertura y/o desplazamiento vertical, es un proceso geomecánico que podría estar asociado con el bombeo de agua subterránea de sistemas acuíferos sedimentarios no consolidados y normalmente se desarrolla en cuencas áridas o semiáridas. Entre los sitios documentados con mayores densidades de rupturas de suelo se puede citar a Arizona (Jachens & Holzer, 1979; Conway, 2016), el centro de México (Pacheco et al, 2006, 2010, 2011 y 2013; Garduño-Monroy et al., 2001; Aguirre-Díaz et al, 2000; López-Doncel et al., 2010; Rojas et al., 2002, Romero-Navarro et al , 2010; Huizar-Álvarez et al., 2011, Carreón-Freyre et al., 2020; Carreón - Freyre, 2010; Carreón - Freyre et al., 2016; Teatini et al., 2018), el norte de China (Li et al., 2000; Peng et al., 2016) y algunas ciudades de Irán (Ziaie et al., 2009), con precipitación media anual de 200, 500, 550 y 300 mm, respectivamente. La ocurrencia de rupturas se ha asociado, de manera muy simplista, al bombeo de agua subterránea de sistemas acuíferos, explotados fuertemente, sin embargo, no todos los sistemas acuíferos explotados, que se hunden, experimentan roturas.

Shanghai en China (Ye et al., 2016), Ravenna en Italia (Teatini et al., 2005) y Yakarta en Indonesia (Abidin et al., 2011; Collados et al, 2018, 2020; Abidin et al., 2011; Lixin et al., 2010; Wang et al., 2015; Ye et al., 2016; Erkens et al., 2015; Mahmud et al., 2016; Rahmati et al., 2019; Stewart et al., 2016; Arnold et al., 2005) son ejemplos de sitios con hundimientos de más de 1 m donde no se han reportado grietas de ningún tipo. El caso del Valle de San Joaquín en California es más revelador ya que se ha deprimido alrededor de 8.5 m sin agrietamiento significativo (Galloway & Riley, 1999).

Foto : África se está partiendo
BBC News

Foto :
Cultura Colectiva News
Se están abriendo fisuras en la tierra en Irán por la falta de agua

La generación y propagación de rupturas requiere del desarrollo de condiciones de falla, es decir, tracción y/o esfuerzo cortante no soportado por los sedimentos aluviales poco profundos. Son numerosos los análisis, sobre campos de esfuerzos, que modelan la ocurrencia de rupturas: en México (Carreón - Freyre et al., 2016a,b; Ochoa - González et al., 2018; Pacheco et al., 2006; Carreón-Freyre et al., 2020; Teatini et al., 2018; Carreón - Freyre, 2010), en China (Ye et al., 2018; Wey and Wang, 2014; Shi et al, 2008; Parhizkar et al., 2015), y en Estados Unidos (Bouwer 1977; Narasimhan y Holzer, 1978; Jachens y Holzer, 1979; Holzer y Pompeyan, 1981; Bell, 1981; Carpenter 1999; 1982; Hem 1994; Hernandez - Marin & Burbey, 2010, 2012; Panda et al., 2015; Galloway y Sneed, 2013), entre los más reconocidos.

En la CDMX las grietas, asociadas con el bombeo han sido estudiadas desde perspectivas locales y regionales, atemporales y evolutivas, forenses y predictivas (Alberro y Hernández, 1990a, 1990b; Auvinet, 2009; Carreón-Freyre et al., 2009; Garduño-Monroy et al., 2001; Lermo et al, 1996; Ortega-Guerrero et al., 1999; Ortiz Zamora y Guerrero-Ortega, 2007; Chaussard et al., 2014; por mencionar algunos) lo que ha representado grandes contribuciones al estado del arte y a la documentación de los eventos. Sin embargo, aún la discusión se abre cuando se trata de definir los niveles de riesgo en predios específicos (vulnerabilidad y amenaza por separado para trabajar de forma segura la minimización de los efectos) y recomendar o impedir ciertas soluciones estructurales o desarrollos urbanos en localidades que se ven afectadas por este fenómeno o que podrían estarlo en futuros cercanos.

Objetivo

La investigación tuvo como objetivo integrar informaciones geológicas y geotécnicas y las condiciones de explotación del acuífero, en un modelo digital de la Transición al Sur de la Ciudad de México. En este modelo se representa, simula y predice el comportamiento de las zonas en mayor riesgo por rupturas del suelo (desarticulada la exposición y la vulnerabilidad). Particularmente se trabaja en escenarios AGEB* urbana .

El modelo digital permite, ya que a cada elemento se le asignan propiedades y valores específicos y explícitos, generar métricas para calificar sitios y simular escenarios en evolución. Seguir pasos concretos de los procesos, analizarlos y comprobarlos ofrece certezas para los equipos de ingeniería involucrados en el desarrollo de comunidades seguras: los planteamientos de esta investigación se pueden usar para validar o descartar métodos, técnicas y materiales de construcción así como soluciones de cimentación y estructurales.

La originalidad de esta propuesta es que da respuestas, en un alto nivel de comprensión, a manifestaciones en contextos geográficos tan pequeños como el de una vivienda de interés social/popular o mayores como el de obras continuas de varios kilómetros de largo. De manera muy ventajosa aborda los componentes del riesgo por agrietamiento con un mínimo de parámetros (asequibles con pruebas in situ económicas) y mapas de control de fácil lectura.

**área geoestadística básica urbana*

Justificación

La necesidad de modelar/simular los agrietamientos se incrementa de manera proporcional al crecimiento de la urbanización en algunas zonas de la Alcaldía de Tláhuac. A pesar de los reconocidos y meritorios avances sobre el tema, el comportamiento de los suelos agrietados (o en extrema vulnerabilidad/exposición) sigue sorprendiendo a los diseñadores y constructores y obliga a discusiones técnicas en todos los niveles.

La simulación de estos procesos, como en otros campos de la ingeniería, puede enmarcarse en tres períodos: previo a la computación, formativo y de expansión. En la simulación formativa (hasta los 70) se encuentran documentos que atendían al hundimiento regional y aplicaban el conocimiento a algunas soluciones de cimentación tomando en cuenta algunos de los efectos nocivos de los cambios volumétricos, poco se reconoce sobre los mecanismos de agrietamiento. Es hasta el periodo de expansión (desde los 80 y a la fecha) que existe una profusión de simulaciones, cada una en diferentes niveles de aproximación a la dificultad del problema (desde el punto de vista de la informática), a la estimación del potencial de peligro o a la delimitación de escala de los efectos.

En general, los modelos más conocidos son los análisis numéricos que utilizan ecuaciones de flujo de agua subterránea y una compleja caracterización geomecánica para evaluar deformaciones verticales (esfuerzos y desplazamientos), asociadas a la extracción de agua subterránea en diferentes escenarios (acuífero libre y acuífero confinado) y que concluyen sobre condiciones de formación de fracturas hidrodinámicas.

Sin embargo, estas refinadas formulaciones conllevan dificultades e incertidumbres, la mayoría relacionadas con la parametrización del medio. La transformación de las informaciones puntuales (muchas veces escasas) en un espacio 3D (y/o 4D) -con fronteras cercanas y lejanas- es el punto frágil cuando se enfrentan las predicciones con las observaciones en campo. La desconexión entre las interpretaciones y la realidad tiene su efecto más negativo cuando las rupturas suceden sin poder alertar a los actores gubernamentales, desarrolladores y a la propia ciudadanía sobre el riesgo de su entorno. Adicional debe mencionarse como una gran desventaja que la estimación de las actividades y los costos asociados a la reducción o mitigación del riesgo es prácticamente imposible sin una adecuada parametrización que permita contabilizar, sin ambigüedad, áreas o líneas de actuación.

Generar información concreta sobre los hechos para formular campañas tan necesarias como el mantenimiento y actualización de la infraestructura hidráulica, el crecimiento de las redes de pozos de bombeo y/o de las tazas de extracción y su profundidad, la aplicación de fondos de rescate (evaluadas las inversiones) para la reubicación de algunas viviendas y/o edificios (incluso comunidades enteras), no es posible directa ni totalmente con las formulaciones geomecánicas, hasta hoy publicadas. Este es el fundamento de este esfuerzo de investigación dedicada, puntual y directa.

En la simulación del hundimiento-rompimiento se pueden considerar procesos que se extienden desde las profundidades del acuífero explotado hasta las superficiales capas de material sobre las que descansan la mayoría de las cimentaciones.
La demanda de recomendaciones/restricciones sobre planificación y desarrollo urbano exige que las simulaciones de agrietamiento sean precisos para las capas más someras y se consigan en el menor tiempo posible con un claro límite de costos. Las preguntas a las que nos enfrentamos son tan variadas (adicionales a explicar el origen del rompimiento) como señalar las ubicaciones de conexión con los trazos reconocidos (grietas manifiestas), caracterizar rompimientos de acuerdo con la complejidad geológica/geotécnica, predecir zonas de afectación a futuro (definir los plazos), recomendar límites a los diseños, dibujar las condiciones de las campañas de exploración, publicar esquemas ampliados de remediación/modificación de capas de suelo, configurar nuevos métodos para la recuperación de infraestructura y sugerir cimentaciones -incluidas las no convencionales, entre otros.

Método

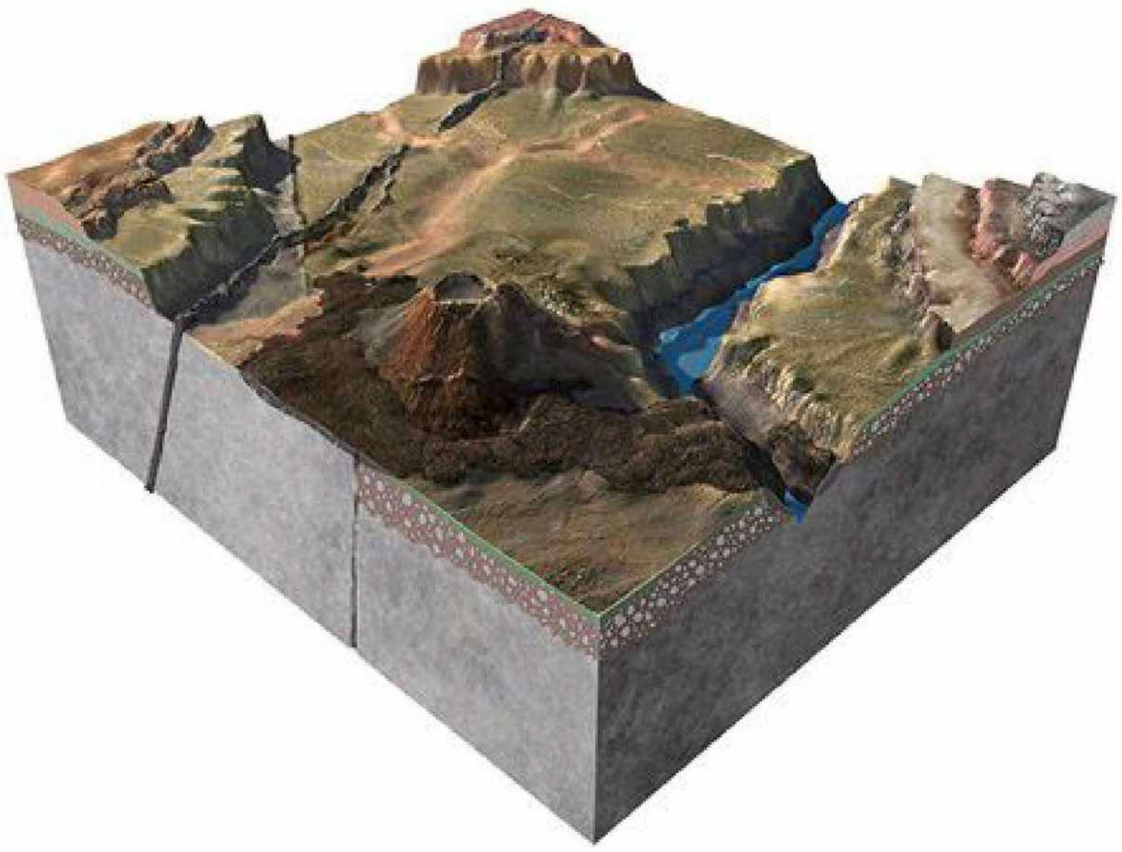
Si bien existen atractivos intentos de emular los procesos con simuladores comerciales avanzados de usos múltiples/multifísicos (por ejemplo, Plaxis y Abaqus) o con sistemas híbridos de alta gama (Carreón-Freyre et al., 2016, 2020; Carreón - Freyre, 2010; Teatini et al., 2018, por mencionar algunos) ninguno de los resultados consultados permiten agregar a la eficiencia numérica y a la precisión de la simulación de la ruptura rutas para la definición de nuevas obras civiles o anticipar las manifestaciones a través de mapas de contenidos que contengan precisiones para el desarrollo o mantenimiento de infraestructura (Franceschini et al., 2019; Ye et al. ,2018).

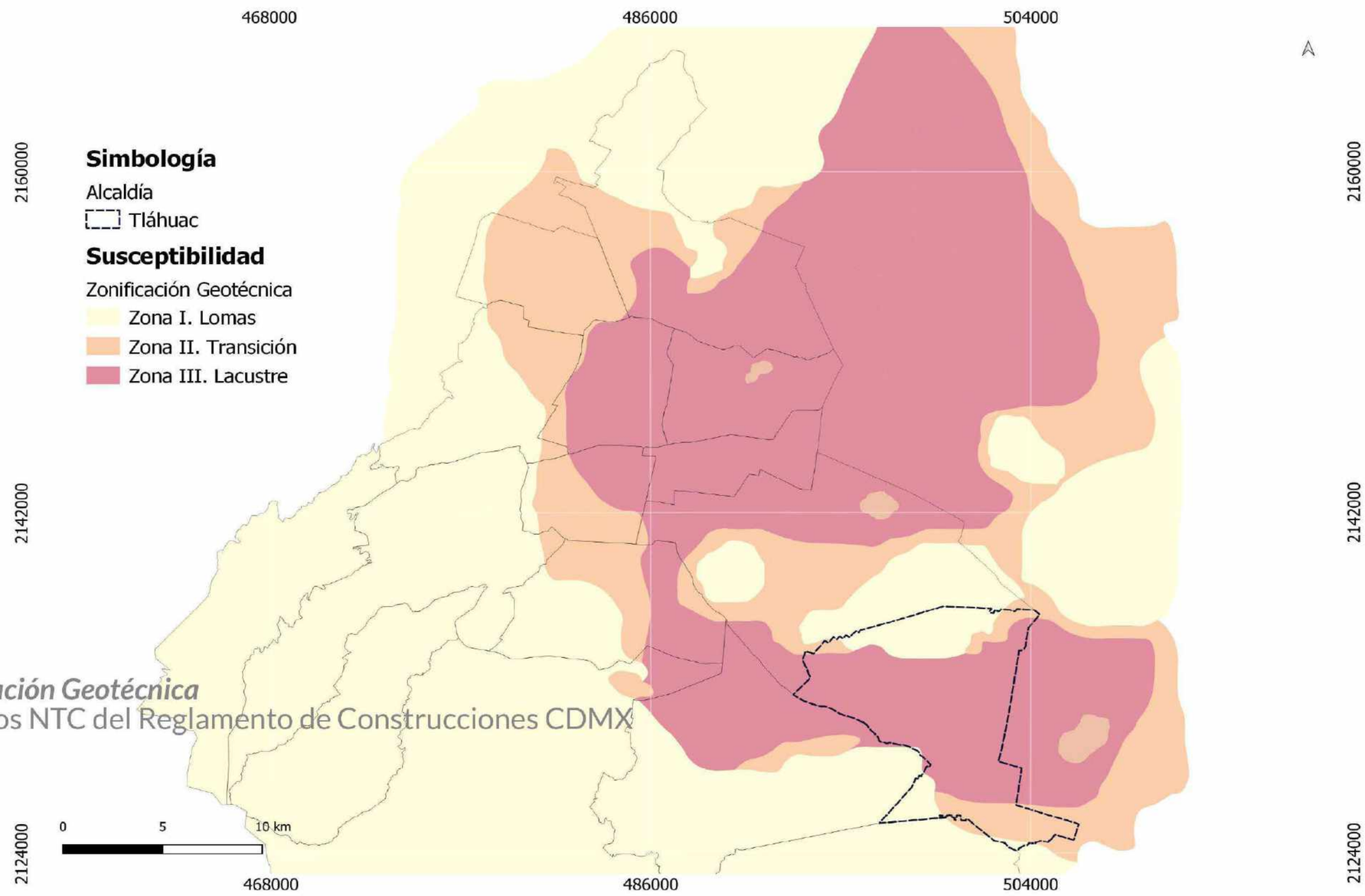
ZONIFICACIONES

La oferta abierta geomática gubernamental contiene mapas que aportan de formas muy generales al entendimiento de las observaciones adversas (hundimientos y rompimientos). Cuando estas representaciones son estudiadas a detalle para dar respuesta a cuestionamientos en pequeños predios, tramos "cortos" de calles, daños a un (o una serie de) pozo(s) de drenaje, incluso en pérdida de vertical en un edificio (o unidades habitacionales), estas observaciones generales pierden relevancia y, como lastimosamente ha sucedido, ofrecen informaciones controversiales: la observación en campo es completamente opuesta a la categorización en mapas.

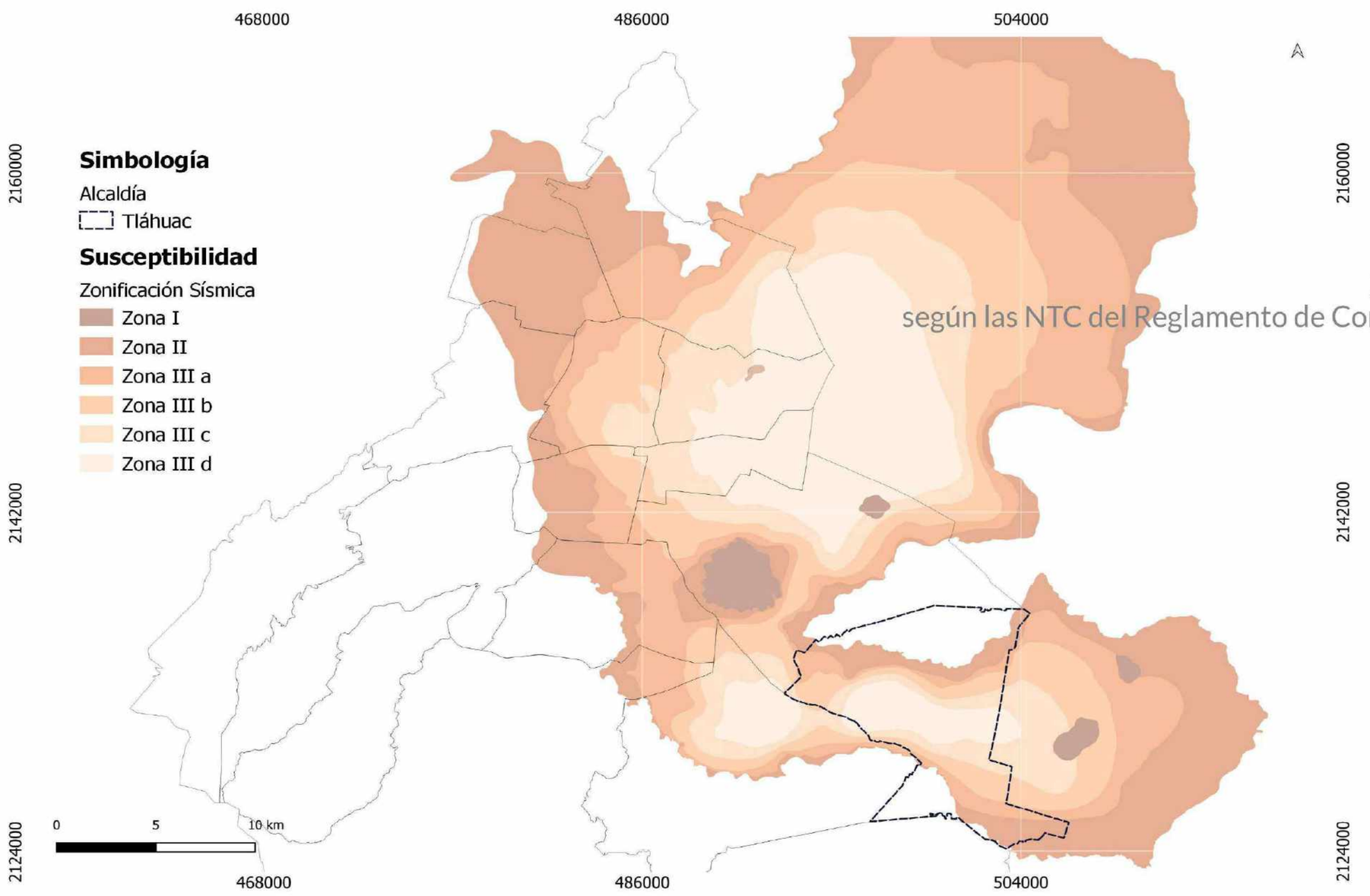
Como ejemplos se muestran los mapas de i) zonificación geotécnica, ii) zonificación sísmica, iii) vulnerabilidad al agrietamiento y iv) hundimiento regional promedio (figuras<siguientes páginas), en todos se resalta el perímetro de la Alcaldía Tláhuac. De acuerdo con la categorización del arreglo de los suelos (disposición, estratigrafía) en Tláhuac existen todas siendo importante resaltar que la Transición es una franja muy estrecha al sur de la alcaldía y desapareciendo al norte de ella. Esto último no es del todo cierto (ni posible) pero sin duda es parte de las libertades gráficas de mapas de este tipo. Más detalle se observa en la Zonificación Sísmica y por esto se puede emitir una primera hipótesis de respuesta de los suelos: las masas al centro de la Alcaldía son distintas (en gradualidad abrupta) a las regiones más cercanas a la zona de Loma (montaña-cerro). Esta condición tiene un impacto fundamental en las manifestaciones que llaman tanto la atención de ciudadanos y autoridades. En un acercamiento a la frontera norte (alcaldía de Iztapalapa) en el contacto con una importante unidad montañosa se observa que la clasificación de vulnerabilidad es simplista y poco ayuda a delimitar estados de riesgo. Observe cómo las zonas en verde oscuro persiguen los detalles de las manifestaciones registradas y representan apenas unas franjas extremadamente delgadas que se pierden entre regiones donde la vulnerabilidad es baja. No hay explicación de soporte en esta caracterización y eso hace que el usuario se vea muy limitado en interpretar el riesgo.

De forma análoga en el acercamiento a la variación espacial del hundimiento (regional promedio) los valores mencionados pero sobre todo el patrón designado para esa zona de la Alcaldía está muy lejos de reflejar lo que sucede en campo. Uno de los ejemplos más evidentes es el comportamiento de los suelos en la Colonia Del Mar, las tasas no son homogéneas, son mucho más altas que lo señalado, no existen como un continuo y su condición es más alarmante por la coincidencia espacial con instalaciones enterradas que las agravan. Debe resaltarse que las vecinas localidades de Iztapalapa y esta colonia tlahuaquense representan los escenarios de mayor impacto durante el terremoto del 2017.

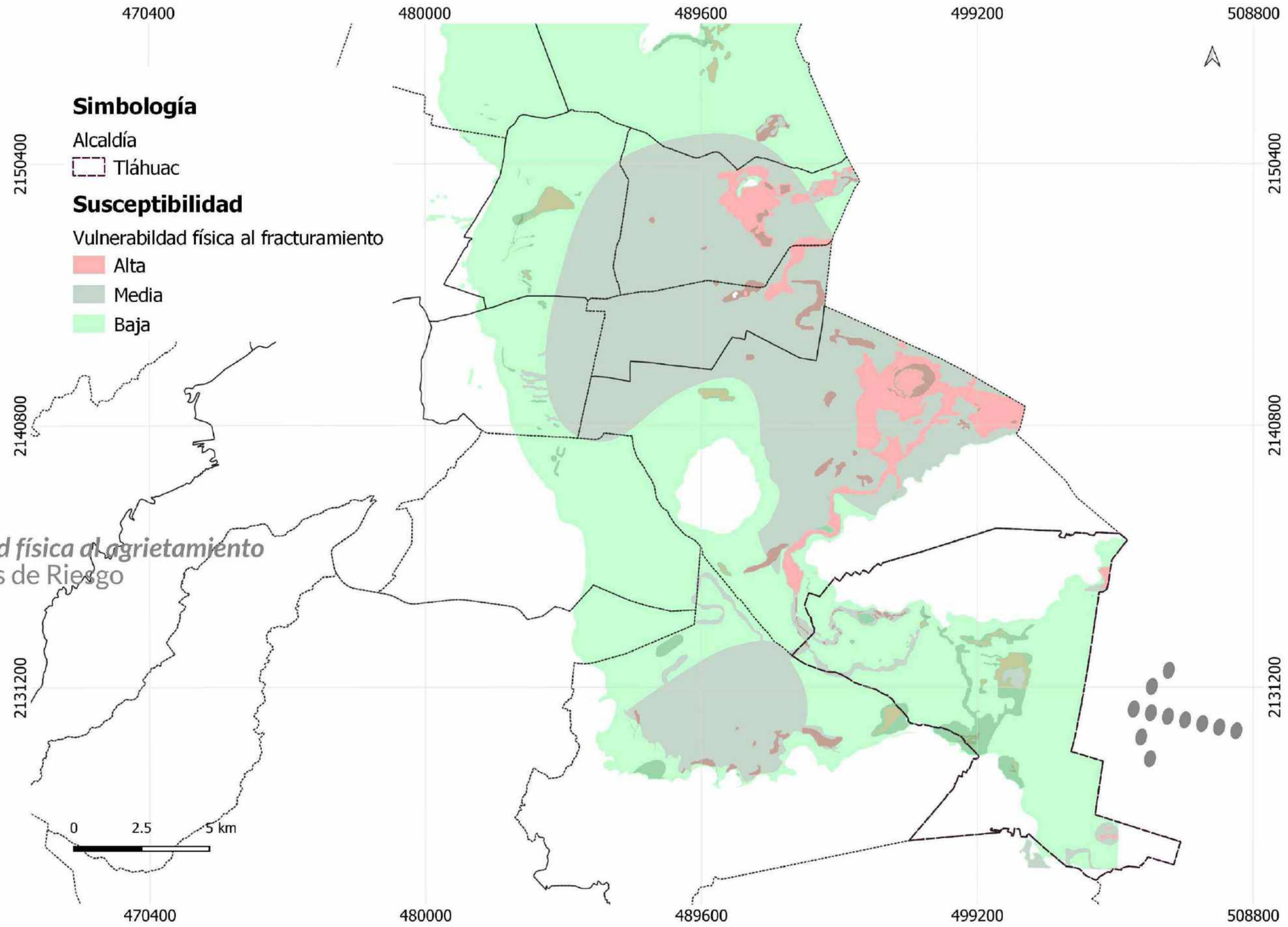




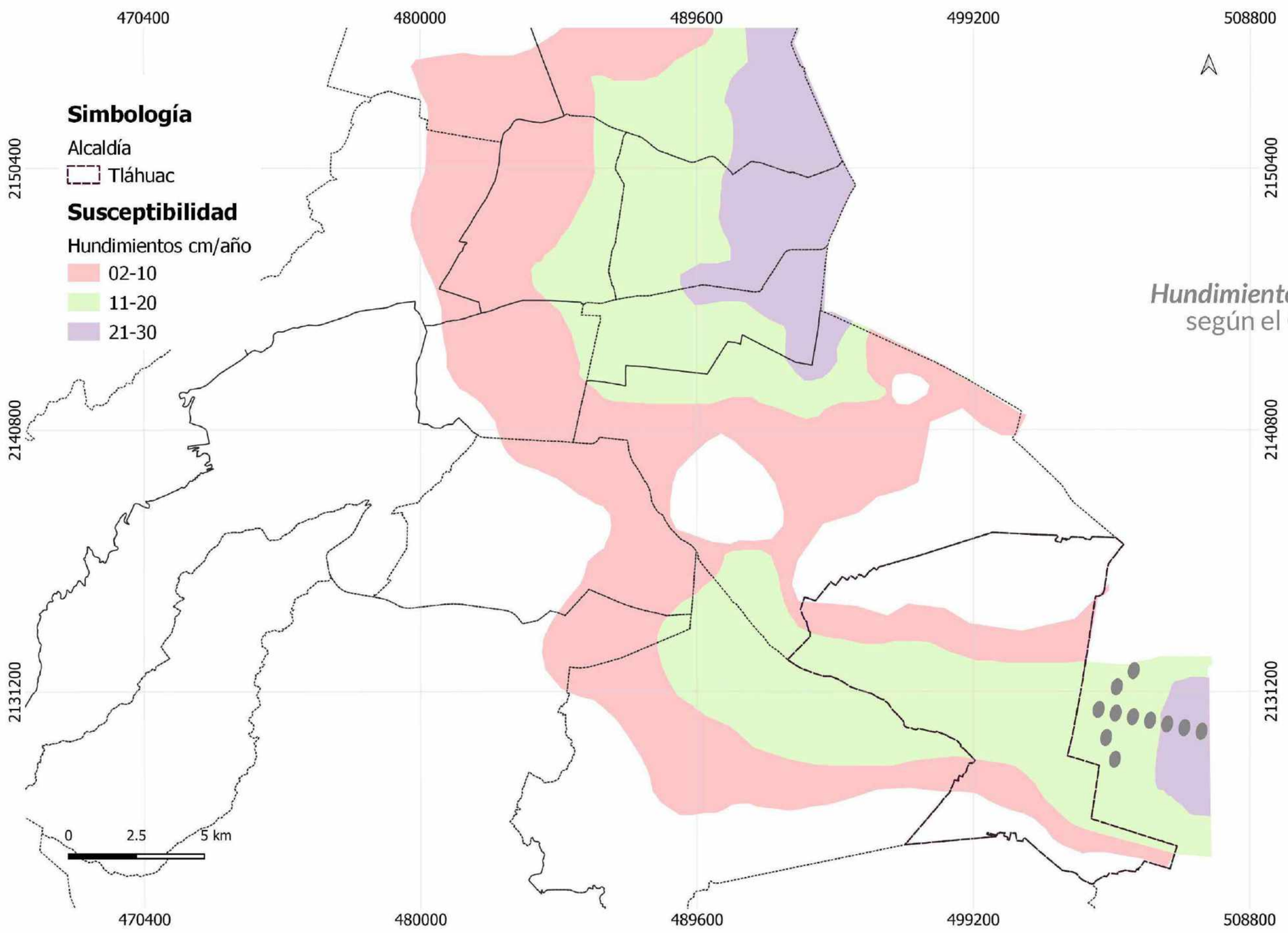
Zonificación Geotécnica
según los NTC del Reglamento de Construcciones CDMX



Zonificación Sísmica
según las NTC del Reglamento de Construcciones CDMX



Vulnerabilidad física al agrietamiento
según el Atlas de Riesgo



Hundimiento (promedio)
según el CENAPRED

ESTUDIOS

Como resultado de analizar las causas-efectos y sobre todo de caracterizar las manifestaciones en las zonas más afectadas por los procesos de rompimientos, se propone:

1. Que el **RIESGO** debe ser asumido como la integración de la EXPOSICIÓN y la SUSCEPTIBILIDAD.

2. Que el **RIESGO** existe siempre y cuando se active la AMENAZA.

3. Que la **SUSCEPTIBILIDAD** es inherente a los suelos de ciertas regiones en Tláhuac y no debe ser confundida con los agentes agravantes.

4. Que la **EXPOSICIÓN** está delimitada geográficamente (en su proyección al plano) y no debe ser confundida con los agentes agravantes.

5. Que la(s) **AMENAZA**(S) pueden ser de origen natural y antrópico, pero ambos orígenes "ocurren" en ciertos tiempos (etapas bien reconocidas).

En el modelo prototípico ensayado con el Método de Elementos Finitos bajo Convenio 2018-2019 se encontraron las principales conexiones entre las manifestaciones de rotura y los arreglos estratigráficos así como la disposición de la capa dura (basamento). También con esta información se construyeron los mapas de las componentes de riesgo. En esta administración, la 2021-2024, se ha avanzado en la caracterización de las variables que, en coincidencia temporo-espacial, hacen que el rompimiento ocurra (ver Tabla <sig. pág):

· **Variables Primarias**. Causan asentamientos diferenciales y agrietamientos. Son independientes unas de otras.

· **Variables Secundarias**. Causan asentamientos diferenciales y agrietamientos. Aparecen combinadas con las primarias y/o entre ellas.

· **Variables Agravantes**. Por sí solas no causan ni asentamientos diferenciales ni agrietamientos. Al combinarse con las anteriores acentúan los efectos que estas provocan.

Condición local	Categoría	Descripción
Condiciones o irregularidades en la base rígida	A	
Base horizontal	A.1	Se utilizará cuando se analicen condiciones no relativas a la base rígida
Afloramiento	A.2	La capa dura presenta una inclinación con la cual emerge a la superficie.
Transición abrupta	A.3	La capa dura pasa de una profundidad pequeña a una mayor en una distancia corta
Montículo	A.4	Los montículos son prominencias en la base rígida, p. ej., derrames basálticos. Estos derrames tienen forma de dedos extendidos, generalmente formados en el mismo proceso que las montañas que rodean el Valle, son de más de 1 km de longitud, llegan a asentarse a más de 70 m de profundidad y tienen decenas de metros de altura y ancho de base.
Escalones	A.5	La capa dura pasa de una profundidad pequeña a una mayor en una distancia muy corta o nula
Heterogeneidades en el depósito de arcilla	B	
Costra superficial	B.1	Capas superficiales rígidas de 0.5 a 8 m de espesor, formadas principalmente por arena limosa.
Inclusión rígida	B.2	Capas rígidas más delgadas que inician a profundidades de entre 0.5 y 8 m, con un espesor de 0.4 a 2.4 m.
Capas contenidas de arena	B.3	De forma quasi-ovaladas en perfil, son formaciones rígidas y permeables de varios metros de ancho con una dimensión horizontal mucho más grande que la ortogonal complementaria, probablemente como resultado de corrientes enterradas.
Otras heterogeneidades geológicas	B.4	P. ej., variaciones espaciales en las propiedades del depósito de arcilla que ocasionan asentamientos diferenciales.
Heterogeneidades antropógenicas	C	P.ej. rellenos de nivelación, cimentaciones sepultadas.
Estructuras enterradas	C.1	P.ej., cisternas, atarjeas, etc.
Variaciones espaciales en las sobrecargas	C.2	P.ej., tránsito vehicular, viviendas, edificios, etc.
Variaciones en el bombeo	C.3	Variaciones espaciales de la ubicación de las tomas de bombeo así como de su intensidad

Las condiciones locales: intrínsecas en A y B, extrínsecas en C.

Confirmación de las Hipótesis de Trabajo

1. Las rupturas están conectadas espacialmente con
- la topografía,
- la tasa de extracción de agua subterránea,
- la densidad de pozos,
- la densidad de carreteras,
- las imposiciones por barreras artificiales (cimentaciones y cargas que transmiten)
- la presencia de sedimentos específicos (o capas alteradas) y
- la forma y profundidad de la base rocosa.

2. Los hundimientos y los agrietamientos son expresiones de mecanismos con gestación a profundidades que podrían ser muy distintas; su conexión inicial y más importante se da con la activación de la amenaza antrópica - existe una dependencia directa temporal.

3. Las conexiones entre hundimientos y rompimientos no se pueden (o deben) determinar sin soporte técnico especializado.

3. La heterogeneidad estratigráfica 3D, como estimulante del rompimiento, al incluirse en el modelado/simulación en la misma expresión (vóxel) da sentido a los intrincados patrones de agrietamiento en superficie.

4. Las deformaciones elásticas (reversibles) que resultan en pequeños desplazamientos verticales tienen una expresión distinta al de la compactación con deformación inelástica y hundimiento permanente.

5. La evolución de los escenarios de rompimiento invalidan las categorizaciones, rígidas, simplificatorias y generales cuando se intenta dar respuesta a problemáticas locales.

En esta investigación, a diferencia de algunas propuestas que están totalmente basadas en postulados físicos y modelos hidro-geomecánicos, se explotan a las ciencias básicas involucradas (sus postulados y sus restricciones) al tiempo que se involucran hallazgos y criterios de expertos humanos (experiencia). La integración se completa, de manera muy versátil, con los levantamientos de manifestaciones en gran escala (bigdata). El aprendizaje máquina (modelos caja negra RN y caja gris CART) hace crecer las hipótesis en lo conceptual y permite evaluar los posibles impactos futuros de una manera racional y científica.

Resultados Objetos en Kaltia

Todas las informaciones y los resultados de los análisis fueron proyectados en mapas de componentes de riesgo en un objeto geomático llamado KALTIA. El objeto está dirigido para los desarrolladores de infraestructura, los administradores de gobierno y los encargados de la Protección Civil. KALTIA contiene informaciones detalladas que deben ser interpretadas por profesionales o técnicos versados.

En las Figuras>páginas siguientes se muestran las expresiones de KALTIA dirigidas a la ciudadanía.

Mapas de Contenidos

I.a Vulnerabilidad (Susceptibilidad - Exposición)
I.b Amenaza

Descripción

I . Mapas de Contenidos

En las áreas estratégicas de la Alcaldía de Tláhuac se definen las micro-regiones en riesgo, desarticuladas las componentes: I.a Vulnerabilidad (Susceptibilidad - Exposición) y I.b Amenaza (desde la intervención del bombeo en el proceso de consolidación). Las expresiones espaciales 2D tienen significado hacia el 3D y 4D. Están contempladas graduaciones al riesgo (se transforma el sí/no por grados de pertenencia a situaciones bien delimitadas).

II. Catálogo de Patologías

Expresión ordenadas de los síntomas que un ingeniero puede fácilmente reconocer y conectar para dar sentido o descartar las situaciones expresadas en I y II, para su predio en específico. Esta etapa podría modificar campañas de investigación más profundas, impedir desarrollos o alertar sobre futuros escenarios.

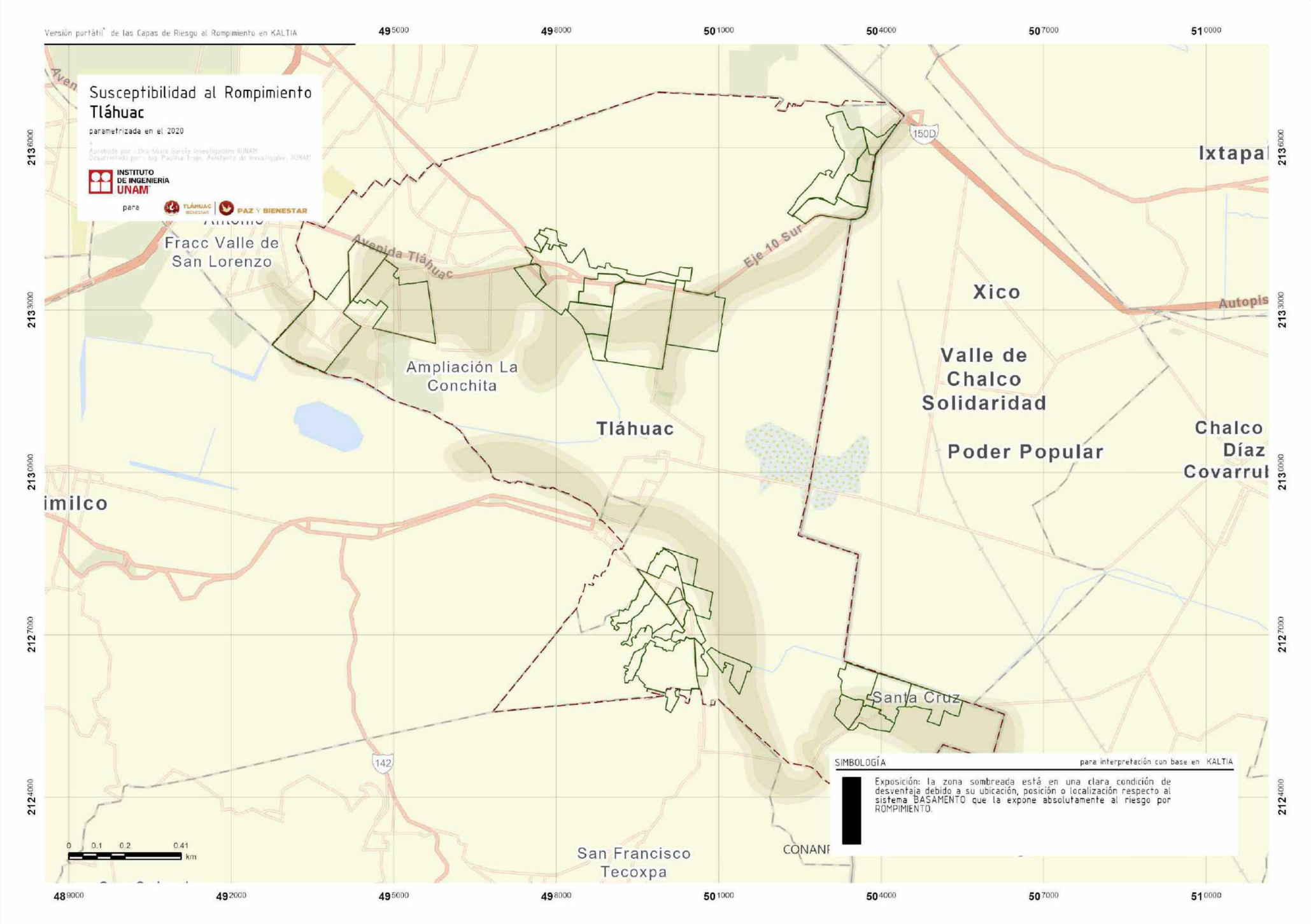
IV. Delimitación paramétrica del espacio en afectación

De los análisis paramétricos que resultan de los modelos MEF y Redes Neuronales se representan los límites/fronteras que contienen las respuestas peligrosas. Esta consideración de contenidos podrá auxiliar en la toma de decisiones sobre la explotación del acuífero, desarrollos urbanos (multi-viviendas) y obras de infraestructura.

Mapas KALTIA

SIGNIFICADO

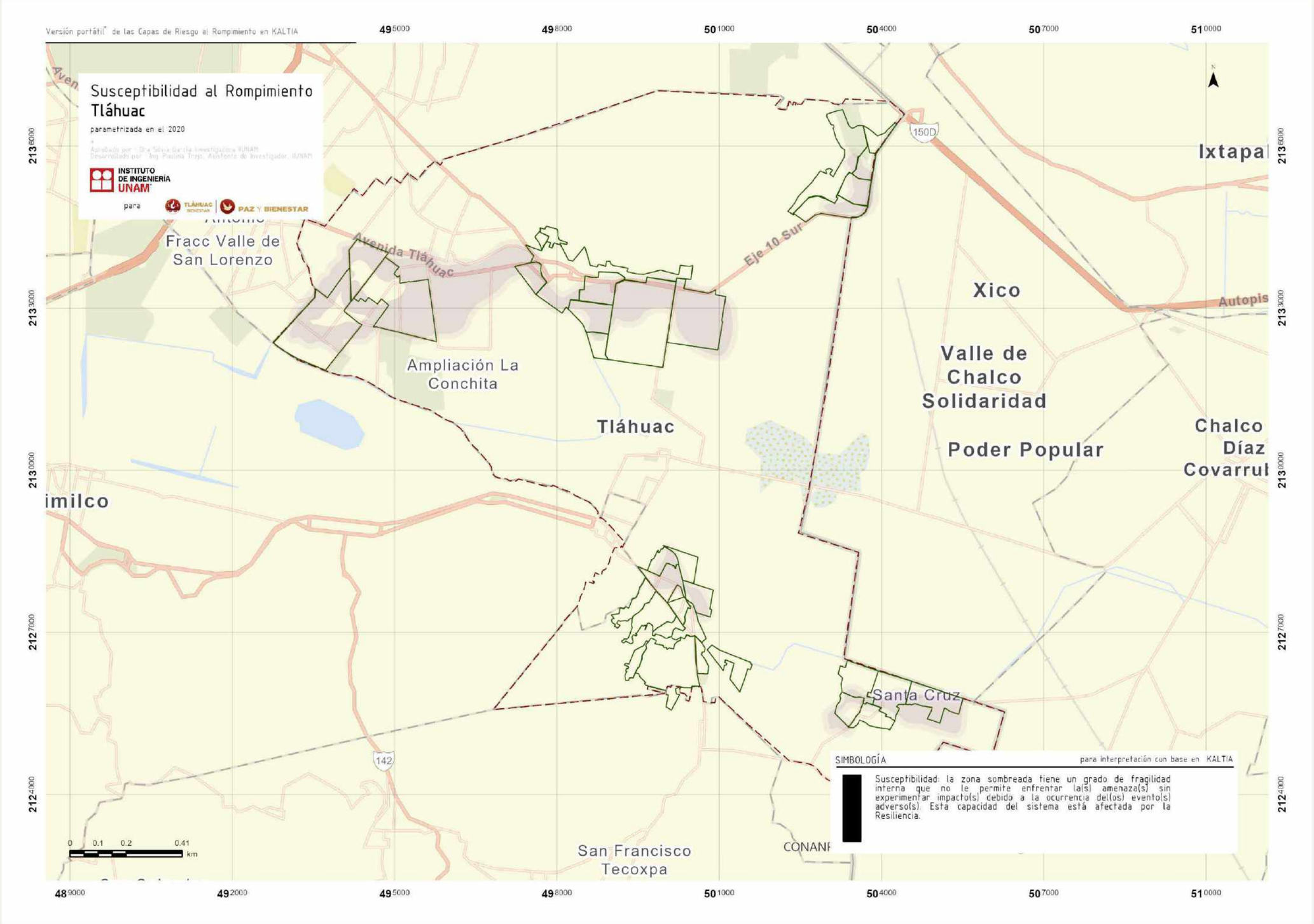
A través de las pruebas indirectas y comprobaciones con pozos profundos se determina i) la región en la que el descenso de la capa dura (o semi-rígida) es abrupto, ii) la región en la que la exposición existe pero se desvanece y iii) las conexiones entre polígonos.
Es importante aclarar que esta visión inteligente de los hechos no intenta definir con toda precisión el espesor del paquete de blandos (por lo tanto la profundidad de la capa dura) sino determinar el gradiente. Los análisis MEF permitieron hacer juegos paramétricos con los que esta expresión de la EXPOSICIÓN se sostiene.
Exposición: la zona sombreada está en una clara condición de desventaja debido a su ubicación, posición o localización respecto al sistema BASAMENTO que la expone absolutamente al riesgo por ROMPIMIENTO.



Mapas KALTIA

SIGNIFICADO

A través de las pruebas geotécnicas, con parámetros obtenidos en campo y laboratorio, se determina i) la región en la que la heterogeneidad de los materiales es absoluta, ii) la región en la que la susceptibilidad es mayor por encontrar lentes drenantes de poca extensión, y iii) las conexiones de estas capas entre polígonos.
Es importante aclarar que esta visión inteligente de los hechos no intenta definir con toda precisión el espesor de cada paquete de material diferente o con diferentes cualidades sino las zonas en las que la continuidad es nula, por lo que esta expresión de la SUSCEPTIBILIDAD se sostiene.
Susceptibilidad: la zona sombreada tiene un grado de fragilidad interna que no le permite enfrentar la(s) amenaza(s) sin experimentar impacto(s) debido a la ocurrencia del(os) evento(s) adverso(s). Esta capacidad del sistema está afectada por la *Resiliencia* .



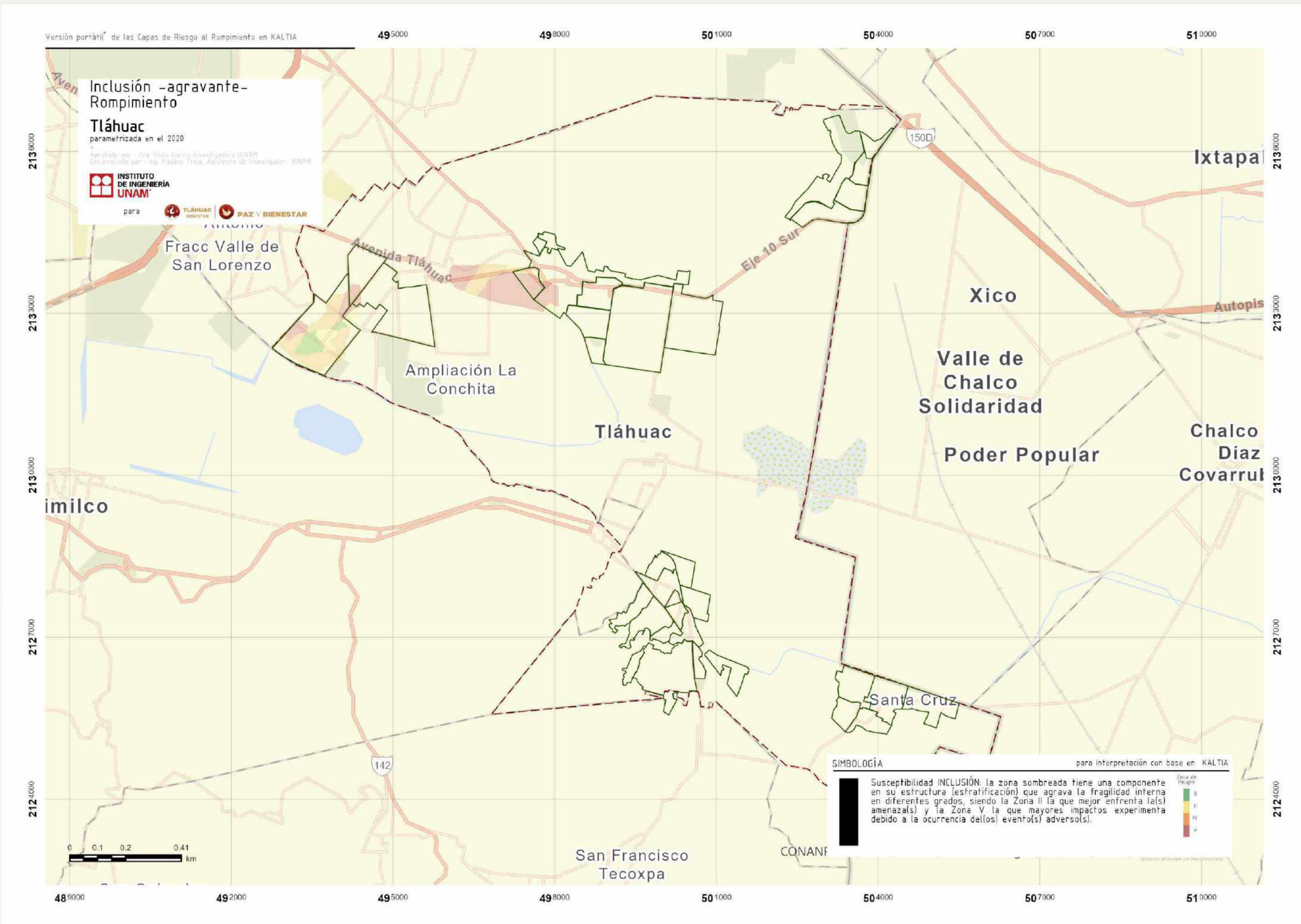
Mapas KALTIA

SIGNIFICADO

A través de las pruebas geotécnicas, con parámetros obtenidos en campo y laboratorio, se determina i) la región en la que existe una lámina rígida a semi-rígida llamada aquí *inclusión*, ii) la región en la que la susceptibilidad es mayor por encontrarse la inclusión a profundidades de impacto para la infraestructura, y iii) la gradualidad del peligro por la capacidad y ubicación de la inclusión.

Es importante aclarar que esta visión inteligente de los hechos no intenta definir con toda precisión el espesor ni rigidez de cada inclusión sino las zonas en las que la coincidencia de estos aspectos en etiqueta existe, por lo que esta expresión de la SUSCEPTIBILIDAD se sostiene.

Susceptibilidad INCLUSIÓN: la zona sombreada tiene una componente en su estructura (estratificación) que agrava la fragilidad interna en diferentes grados, siendo la Zona II la que mejor enfrenta la(s) amenaza(s) y la Zona V la que mayores impactos experimenta debido a la ocurrencia del(os) evento(s) adverso(s).



Además de los factores “objetivos” de cuya interacción surge y depende la seguridad integral que la Alcaldía de Tláhuac está en capacidad de ofrecer a sus habitantes (seguridad y soberanía alimentaria, seguridad ecológica, seguridad social, seguridad económica y seguridad jurídica e institucional), existen factores “subjetivos” que determinan que la comunidad se sepa y, sobre todo, se sienta “segura” en este territorio. Estos factores están estrechamente vinculados a la percepción que tiene la gente de las amenazas y de los riesgos existentes (o que puedan llegar a existir) y a la actitud que asumen frente a los mismos. Y esa percepción y esa actitud dependen, a su vez, de la conciencia que tienen sobre su propia vulnerabilidad o debilidad frente a esas amenazas, o de su capacidad para afrontarlas en caso de que se lleguen a materializar..

Cuando las amenazas no son el resultado de la decisión consiente y expresa de algunos actores sociales de causar daños a otros, sino de fenómenos de origen natural, informar a las comunidades sobre los riesgos y cómo asumir su grado de vulnerabilidad deben sostenerse en estrictamente informaciones tecno-científicas. El caso Tláhuac es singular dadas las componentes sociales y naturales que agravan el nivel de las amenazas y la compleja relación entre disposición y estado de materiales (suelos y rocas) que significan un reto para mapear (2D) sobre las zonas habitadas.

Esta investigación intentó auxiliar en la clasificación de la fragilidad d ellos sistemas naturales, la definición de las amenazas y contribuir en el surgimiento de comunidades protagonistas que colaboren con los órganos de gobierno a generar “telarañas de seguridades” con las que se alcancen garantías integrales en el territorio que ocupan.

Referencias

Abidin, H.Z.; Andreas, H.; Gumilar, I.; Fukuda, Y.; Pohan, Y.; Deguchi, T. 2011, Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development. Nat. Hazards, 59, 1753.

Aguilar-Perez, L. A., Ortega-Guerrero, M. A., Lugo-Hubp, J., and Ortiz-Zamora, D.: Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 23, 247–261, ISSN 2007-2902, 2006.

Aguirre-Díaz, G. D. J., Zúñiga-Dávila Madrid, R., Pacheco-Alvarado, F. J., Guzmán-Speciale, M., y Niero-Obregón, J. 2000. El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. GEOS, 01, 2-7.

Alberro J., Hernández R., 1990, Génesis de las grietas de tensión en el Valle de México, el subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo. Soc. Mex. Mech. Suelos, 95 p.

Alberro J., Hernández R., 1990a, Fuerzas de filtración y fracturamiento hidráulico. UNAM. Serie Azul Instituto de Ingeniería, 528, 109 p.

Arnold, J.G., K.N. Potter, K.W. King, and P.M. Allen. 2005. Estimation of soil cracking and the effect on surface runoff in a Texas Blackland Prairie watershed. Hydrol. Processes 19:589–603. doi:10.1002/hyp.5609

Auvinet G., 2009, Land subsidence in Mexico City, in: Proc. XVIIth IMSSGE. Conf. Geotechnical engineering in urban areas affected by land subsidence. Ed. Auvinet. G. and Juárez. M. vol. 36 Alejandria Egypt, pp. 3-13.

Bell J.W., 1981, Subsidence in Las Vegas Valley. Nevada Bureau of Mines and Geology, Bull, 95, 84 p. Bell F.G., 1988, Subsidence associated with the extraction of fluids. Engineering Geology of Underground Movements. Geol. Soc. Engin. Geol, Sp. Pub, 5, 363-376.

Bouwer H., 1977, Land subsidence and cracking due to groundwater depletion. Groundwater, 15, 358-364.

Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., SánchezZamora, O., Díaz-Molina, O., and Carande, R. E.: Space Geodetic Imaging of Rapid Ground Subsidence in México City, Bull. Geol. Soc. Am., 120, 1556–1566, https://doi.org/10.1130/B26001.1, 2008.

Carpenter M. C., 1999; Land subsidence in the United State: Circular 1182, U. S. Geological Survey. Galloway D., Jones D. R. e Ingebritsen S. E. eds. Part I, Mining Ground Water, South-Central Arizona. p. 65-81.

Carreón Freyre, D., Cerca Martinez, M., Gutierrez Calderón, R., and Alcántara Durán, C.: Análisis de vulnerabilidad física a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento en la Ciudad de México, Report, National Atlas of Risks Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Aplicaciones/Sistema de Información sobre Riesgos/Ciudad de México, available at: https://cordis.europa.eu/project/id/511208 (last access: 30 March 2020), 2017.

Carreón Freyre, D.: Keynote. Land subsidence processes and associated ground fracturing in Central Mexico, in: Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development (Proceedings of EISOLS 2010, Querétaro, México), Red Book Series Publication 339, edited by: Carreón Freyre, D., Cerca, M. and

Galloway, D. L., IAHS Press, CEH Wallingford, UK, 149–157, ISBN 978-1-907161-12-4, ISSN 0144-7815, 2010.

Carreón Freyre, Guiterrez-Calderon, Cerca, Alcantara-Duran, 2020, Factors that condition physical vulnerability to ground fracturing in Mexico City, Proc. IAHS, 382, 571–576, https://doi.org/10.5194/piahs-382-571-2020

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

Carreón-Freyre, D. C., Hidalgo-Moreno, C., and Hernández-Marín, M.: Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Tomo, LVIII, 237–250, 2006.

Carreon-Freyre, D., Cerca, M., Gutierrez-Calderon, R., AlcantaraDuran, C., Strozzi, T., and Teatini, P.: Land Subsidence and associated ground fracturing in urban areas, Study cases in central Mexico, in: Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cancun, México, 17–20 November 2019, 9 pp., 2019.

Carreon-Freyre, D., Cerca, M., Ochoa-Gonzalez, G., Teatini, P., and Zuñiga, R.: Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence and piezometric gradients in the Valley of Queretaro, Mexico, Hydrogeol. J., 24, 657–674, https://doi.org/10.1007/s10040-016-1384-0, 2016.

Carrillo, N.: Influence of artesial wells in the sinking of Mexico City, in: Volumen Nabor Carrillo: El hundimiento de la Ciudad de México y el Proyecto Texcoco, Com. Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica Anuario, 47, 7–14, 1947.
Chaussard, E.; Wdowinski, S.; Cabral-Cano, E.; Amelung, F. Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. Remote Sens. Environ. 2014, 140, 94–106.

Collados-Lara, A.J.; Pulido-Velazquez, D.; Pardo-Igúzquiza, E. 2018, An Integrated Statistical Method to Generate Potential Future Climate Scenarios to Analyse Droughts. Water, 10, 1224.

Collados-Lara, Velazquez, Mateos y Ezquerro, 2020, Potential Impacts of Future Climate Change Scenarios on Ground Subsidence, Water, 12, 219;
Devin L. Galloway y Michelle Sneed, 2013, Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 65, núm. 1, p. 123-136 MODFLOW

Erkens, G.; Bucx, T.; Dam, R.; de Lange, G.; Lambert, J. , 2015, Sinking coastal cities. In Prevention and Mitigation of Natural and Anthropogenic Hazards Due to Land Subsidence, Proceedings of the IAHS, Nagoya, Japan, Daito, K., Galloway, D., Eds.; Copernicus Publications: Göttingen, Germany, 2015; Volume 372, pp. 189–198.

Garduño-Monroy V., Arreygue–Rocha E., IsradeAlcántará I., Rodríguez T., 2001, Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Mich. México. Rev. Mexicana de Ciencias Geológicas, 18, 1, 37-54.

Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Isra de Alcántara, I., y Rodríguez-Torres, G. M. 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 181, 37-54.

Gayol, R.: Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos, Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, III, 96–132, 1925.

Hem D.C., 1994, Hydraulic forces that play a role in generating fissures at depth. Bull. Assoc. Eng. Geol, 31, 293-302.

Holzer T.L., Pompeyan E.H., 1981, Earth fissures and localized differential subsidence. Water Res. Ress, 17, 223-227.

Referencias

J. Pacheco-Martínez, M.E. Zermeño-De-León & J. A. Ortiz-Lozano; Solís-Pinto; Miguel A. Romero-Navarro, Francisco Aguilar-Valdez, Juan A. López-Fuentes, 2011, Soil cracks related to land subsidence. The main geotechnical hazard affecting to construction in Aguascalientes City. Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Jachens, R. C., y Holzer, T. L. 1979. Geophysical investigation of ground failure related to ground water withdrawal-Picacho Basin, Arizona. Ground Water, 176, 574-585.

Jachens, R. C., y Holzer, T. L. 1982. Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. Geological Society of America Bulletin, 9310, 998-1012.

Jonathan Thompson, 2020, As temperatures rise, Arizona sinks, Climate change and unregulated wells are depleting the West's groundwater reserves. Water HCN editions.

Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., 1990, Mecánica de Suelos Tomo I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Editorial Noriega Limusa, México, Tercera Edición, 13ª Reimpresión, ISBN 968-18-0069-9, 149-165

Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., and Keiler, M.: Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology, Appl. Geogr., 32, 577–590, https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002, 2012.

Kotchakorn Voraakhom: How Can We Better Design Cities To Fight Floods?, November 13, 20209:44 AM ET, Heard on TED Radio Hour

Lermo-Samaniego J., Nieto-Obregón J., Zermeño M., 1996, Fault and fractures in the valley of Aguascalientes, preliminary microzonification, in World Conf. on Earthquake Engin. 11th Amsterdam, Elsevier Paper 1651.

Lixin, Y.; Jie, W.; Chuanqing, S.; Guo, J.W.; Yanxiang, J.; Liu, B., 2010, Land Subsidence Disaster Survey and Its Economic Loss Assessment in Tianjin, China. Nat. Hazards Rev., 11, 35–41.

López-Doncel Rubén, Mata-Segura José Luís, y PachecoMartínez Jesús. 2010, Hundimiento y agrietamiento relacionados a la reactivación de paleo-cauces. Ejemplos en la zona conurbada de San Luís Potosí, en Resúmenes del la Reunión Anual 2010 de la UGM. Geos Boletín Informativo de la Unión Geofísica Mexicana, A.C, ISSN 0186-1891, No 1, vol. 30, pág. 132, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

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

Mahmud, M.U.; Yakubu, T.A.; Oluwafemi, O.; Sousa, J.J.; Ruiz-Armenteros, A.M.; Arroyo-Parras, J.G.; Bako ˇn, M.; Lazecky, M.; Perissin, D., 2016, Application of Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar (MT-InSAR) technique to Land Deformation Monitoring in Warri Metropolis, Delta State, Nigeria. Procedia Comput. Sci., 100, 1220–1227.

Narasimhan TN., Holzer TL., 1978, Possibility of soil deformation in the partially saturated zone due to pore pressure changes. Geol. Soc. Am. Abstr. Program, 10, 138 p.

Ochoa González, G. H., Carreón-Freyre, D., Franceschini, A., Cerca, M., and Teatini, P.: Overexploitation of groundwater resources in the faulted basin of Querétaro, Mexico: A 3D deformation and stress analysis, Eng. Geol., 245, 192–206, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.014, 2018.

Ortega-Guerrero A., Rudolph L.D., Chery A.J., 1999, Analysis of long-term land subsidence near Mexico City; field investigations and predictive modeling. Water Resour. Res., 35, 11, 3327-3341.

Ortiz Zamora D.C., Guerrero-Ortega M.A., 2007, Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de chalco; implicaciones de peligro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en el valle de Chalco (Estado de México) y Tlahuac (Distrito Federal). Invest. Geográficas. Universidad Nacional Autónoma de México, 64, 26-42. ISSN 0188-4611.

Ovando-Shelley, E., Lermo-Samaniego, J., Auvinet, G., and Méndez-Sánchez, E.: Microtremor measurements to identify zones of potential fissuring in the basin of Mexico, Geofísica Internacional, 51-2, 143–156, 2012.

Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., y Ochoa, G. 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro Valley, México. Engineering Geology, 843-4, 143-160.

Pacheco-Martínez J., Arzate-Flores J.A., López-Doncel R., Barboza-Gudiño R., Mata-Segura J.L., Del-RosalPardo A., y Aranda-Gómez J.J.. 2010. Zoning map of ground failure risk due to land subsidence of San Luís Potosí, México. IAHS Publication 339. Proceedings of Eigth International Symposium On Land Subsidence, IAHS Press, U.K., 179-184.

Pacheco-Martínez, J.; Hernández-Marín, M.; Burbey, T.J.; González-Cervantes, N.; Ortiz, J.; Solís-Pinto, A. Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. Eng. Geol. 2013, 164, 172–186. [CrossRef]

Pietro Teatini, Dora Carreón-Freyre, Gil Ochoa-González, Shujun Ye, Devin Galloway y Martin Hernández-Marin, 2018, Ground ruptures attributed to groundwater overexploitation damaging Jocotepec city in Jalisco, Mexico: 2016 field excursion of IGCP-641, Journal of International Geoscience, Vol 41, 1.

Rafael Huizar-Álvarez*, Luis Miguel Mitre-Salazar, Salvador Marín-Córdova, José Trujillo-Candelaria y Juventino Martínez-Reyes, 2011, Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime Geofísica Internacional (2011) 50-3: 255-270.

Rahmati, O.; Falah, F.; Naghibi, S.; Biggs, T.; Soltani, M.; Deo, R.; Cerdà, A.; Mohammadi, F.; Tien Bui, D. Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. Sci. Total Environ. 2019, 672, 239–252.

Rivera, A. and Ledoux, E.: Non-Linear modeling of groundwater flow and total subsidence in the Mexico City aquifer-aquitard system, in: P. Fourth Int. Symp. Land Subsidence, IAHS, 12–17 May 1991, Houston, Texas, USA, 45–58, 1991.

Rojas, E., Arzate, J., y Arroyo, M. 2002. A method to predict the group fissuring and faulting caused by regional groundwater decline. Engineering Geology, 65, 245-260.

Romero-Navarro, M., Pacheco-Martínez, J., Ortiz-Lozano, J., Zermeño-De-León, M., Araiza-Garaygordobil, G., y Mendoza-Otero, E. 2010. Land subsidence in Aguascalientes Valley, México. Historical Review and present situation. IAHS Publication 339. Proceedings of Eigth International Symposium On Land Subsidence, IAHS Press, U.K., 207-209.

Sakineh Parhizkar, Khalil Ajdary, Gholam Abbas Kazemi y Samad Emamgholizadeh, 2015, Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damghan aquifer by combining GMS and GEP models, Geopersia 5 (1), PP. 63-80 GENETICOS

Stewart R, Rupp D, Abou Najm M y Selker J, 2016, A Unified Model for Soil Shrinkage, Subsidence, and Cracking, Vadose Zone Journal, 15 (3): vzj2015.11.0146.

Wang, G.Y.; Zhang, D.; Feng, J.S.; Chen, M.Z.; Shan, W.H. 2015, Land subsidence due to deep groundwater withdrawal in northern Yangtze river delta area. In Engineering Geology for Society and Territory, Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation; Springer: Cham, Switzerland; Volume 5.

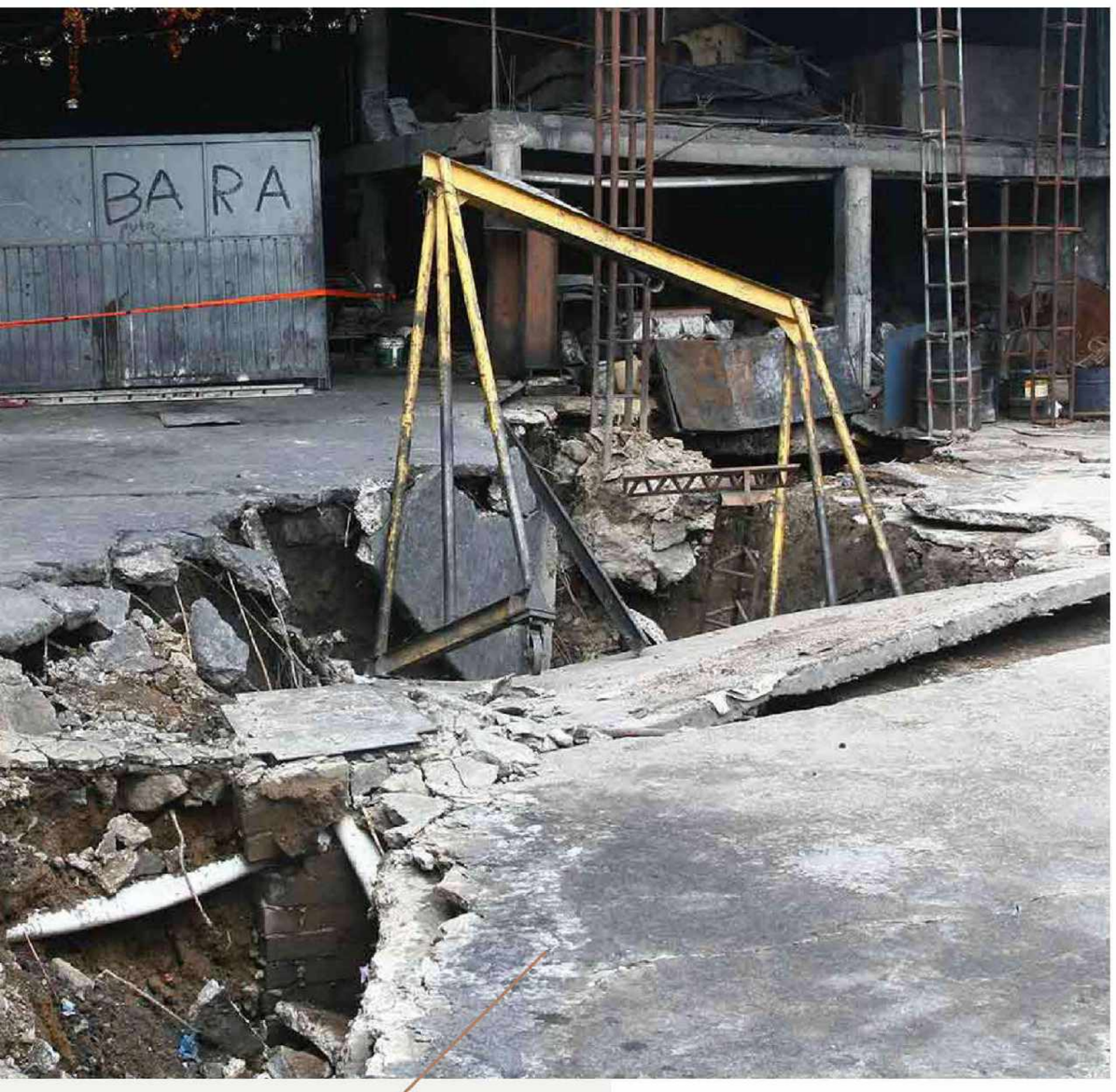
Referencias

Wei X y Wang G, 2014, Model Test Studies on Ground Subsidence and Cracks Induced by Tunneling in Weak Rock Mass with High Water Content, Proc. Ninth Asia Pacific Transportation Development Conference

Xiaoqing Shi, Yuqun Xue, Jichun Wu, Shujun Ye, Yun Zhang, Zixin Wei, Jun Yu, 2008, Characterization of regional lans subsidence in Yangtze Delta, China the example of SuXiChang area and the city of Shanghai. Hydrogeol. Journ., 16 (3): 593-608.

Ye, S.; Xue, Y.; Wu, J.; Yan, X.; Yu, J. 2016, Progression and mitigation of land subsidence in China. Hydrogeol. J., 24, 685–693.

información - contacto



Dra Silvia García
Investigador

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

sgab@pumas.iingen.unam.mx

www

www.iingen.unam.mx
55 54162659

GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO | TLÁHUAC Alcaldía que Renace para tu BIENESTAR | EN TLÁHUAC PAZ Y BIENESTAR