



SEGURIDAD
SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC
COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

PROYECTO

ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN DEL RIESGO EN ZONAS PROPENSAS A HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO DEL TERRENO

FASCÍCULO DE HUNDIMIENTO Y AGRIETAMIENTO DEL TERRENO

Dirección de Investigación

Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales

Michelle Munive García

Leobardo Domínguez Morales

Antulio Zaragoza Álvarez

Marzo 2022



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

CONTENIDO

I. Introducción

II. Conceptos básicos

Hundimiento Local

- Procesos hidrometeorológicos
- Procesos morfotectónicos
- Procesos volcánicos
- Tubificación

Hundimiento por Karst

Hundimiento Regional

Hundimiento por actividades humanas

- Minería
- Extracción de agua
- Fracking
- Sobrecargas
- Excavaciones
- Problemas Hidráulicos
- Rellenos

III. Agrietamientos del terreno

IV. Algunos ejemplos en México

V. Medidas preventivas y monitoreo

VI. Conclusión

VII. Glosario

VIII. Bibliografía



INTRODUCCIÓN

La evaluación del riesgo de desastres por fenómenos geotécnicos es una tarea difícil de cuantificar debido a las grandes incertidumbres y variaciones que se tienen en las propiedades mecánicas del subsuelo y los cambios que éste experimenta por factores naturales, así como por la incesante actividad humana. Existen regiones donde los análisis más detallados no siempre son posibles debido a los altos costos que implican, especialmente para aquellas zonas alejadas de las grandes ciudades. Otro factor de consideración es la gran extensión que pueden abarcar algunos fenómenos como el hundimiento y el agrietamiento del terreno.

Si bien los asentamientos y agrietamientos del terreno son fenómenos que se generan por causas naturales como la desecación y la consolidación por peso propio, existen actividades humanas, como la explotación de recursos naturales, que los amplifican o los modifican, por lo que podrían considerarse como antropogénicos.

Debido a las afectaciones que estos fenómenos producen en la población y sus bienes, generalmente son las autoridades de protección civil, en colaboración las instituciones académicas las que frecuentemente tienen la encomienda de investigar casusas y analizar los efectos de dichos fenómenos. En las últimas dos décadas, el CENAPRED ha abordado esta problemática, desde diferentes puntos de vista y como parte de sus atribuciones, en la atención de un gran número de solicitudes de instancias municipales y estatales de Protección Civil, así como del público en general, a fin de explicar la ocurrencia de estos fenómenos y emitir las medidas de prevención y mitigación que resulten necesarias.

En razón de lo anterior, este documento tiene como objetivo ser una herramienta básica para las autoridades de protección civil, quienes son las que deben tomar alguna decisión que permita salvaguardar a la población, así



como emitir recomendaciones para revertir, reducir o mitigar sus efectos. Así mismo, se espera que este documento se convierta en un material de consulta para el público en general, ya que, a lo largo de los años, se ha observado que además de las causas naturales que influyen en estos fenómenos, existen actividades humanas que los exacerban.



CONCEPTOS BÁSICOS

En términos generales, el hundimiento del terreno que se aborda en este documento es el que sucede principalmente en depósitos de suelo, cuyo proceso de formación y depositación permite que sus partículas, en conjunto con los huecos o espacios entre éstas, se desplacen, deformen y reacomoden, dando oportunidad a una deformación gradual o intempestiva de su masa en conjunto. Por el contrario, los grandes depósitos de roca, salvo que éstas sean sujetas a estados de esfuerzo muy grandes (como por ejemplo el tectonismo o la desintegración física y/o química), se consideran como materiales más estables, al menos para una escala humana. Sin embargo, como se verá más adelante, habrá casos en los que grandes depósitos de roca presenten hundimientos y deformaciones en lapsos cortos de tiempo, como es el caso de las rocas calizas y otros depósitos sedimentarios, debido a que han llegado a una etapa en la que el grado de intemperismo o degradación las vuelve propensas a deformarse o colapsarse.

Es por ello que resulta indispensable abordar los conceptos básicos que rigen el comportamiento de los suelos, a fin de comprender mejor sus efectos en el corto, mediano y largo plazos.

El suelo se considera como un depósito de sedimentos y otras acumulaciones de partículas sólidas producidas principalmente por la desintegración mecánica y química de las rocas, con o sin materia orgánica. El agua contenida en los poros del suelo juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico del mismo, que debe considerarse como parte integral de éste (Terzaghi, 1943). Atendiendo al tamaño y a la distribución de sus partículas sólidas, al suelo se le puede clasificar en:

- **Suelos finos:** Son aquellos cuyas partículas son menores a 0.075 mm y están constituidos por limos y arcillas.



- **Suelos gruesos:** Son aquellos cuyas partículas son mayores a 0.075 mm pero menores a dos pulgadas (5 cm) y están constituidos por arenas y gravas.

Dependiendo de la forma en que los suelos son originados, transportados y depositados se pueden clasificar como (González de Vallejo y coautores, 2002):

1. **Residuales:** depositados inmediatamente al pie de las rocas que les dan origen.
2. **Lacustres:** son aquellos acumulados en el fondo de los lagos.
3. **Aluviales:** partículas transportadas por el agua y depositadas en las planicies costeras y en el fondo de los valles.
4. **Fluviales:** materiales que se depositan y acumulan en los cauces y riberas de los ríos.

Uno de los fenómenos geológico-geotécnicos más comunes en el suelo o bien en rocas, es la subsidencia o su **sinónimo hundimiento** (ENAPROC, 2014) y pueden o no tener reflejo en superficie.

Un hundimiento se caracteriza por ser un movimiento tridimensional, el cual depende del estado de esfuerzos y geodinámicas del terreno, dominando **movimientos verticales** y/o **movimientos horizontales**. El movimiento vertical del terreno se refleja en la topografía por una oquedad o subsidencia; siendo fácilmente estudiada a partir de métodos geológicos-geodésicos-geofísicos. Los movimientos horizontales son menos evidentes y se manifiestan poco en superficie, sobre todo en áreas planas, siendo difícil identificar dichas deformaciones con métodos tradicionales.

Un hundimiento estará condicionado por **cuatro factores:** 1) el volumen, 2) la forma (cavidades), 3) el espesor o profundidad y 4) la resistencia de los materiales suprayacentes (González de Vallejo y coautores, 2002), por lo que



puede clasificarse según su origen y, dependiendo de su ubicación y extensión, puede catalogarse como **local, diferencial** o **regional**.

En cuanto a su velocidad, los descensos lentos y paulatinos se manifiestan generalmente en suelos, los cuales, debido a su comportamiento frágil pueden causar una rotura violenta; mientras que los movimientos repentinos se dan al alcanzar una situación límite en la resistencia de las rocas suprayacentes (por ejemplo, el colapso de los techos de cavidades subterráneas, González de Vallejo y coautores, 2002).

A la hora de evaluar los aspectos del suelo es primordial que se tome en cuenta a su perforabilidad y estabilidad, a fin de dictaminar que herramientas y equipos se requieren para las construcciones. Así mismo, es necesario determinar si se apegan a los reglamentos locales de construcción, los cuales disponen de normas para la seguridad estructural, cuyo propósito es lograr una óptima calidad en el desarrollo de la construcción.

Hundimiento Local

Se dice que una subsidencia o hundimiento es local cuando sus dimensiones son relativamente pequeñas y casi siempre ocurre de manera rápida o repentina, logrando alcanzar algunos centímetros, metros o hasta centenas de metros de diámetro, pero generalmente menores a 500 m. Este fenómeno puede provocar muertes o desaparecidos cuando se presenta en zonas pobladas.

Los hundimientos locales están asociados a diferentes causas y ambientes, por lo que su localización y sus dimensiones dependen de los procesos que les dan origen. Así mismo, en la forma y su distribución influyen el tipo de materiales y/o rocas que prevalecen en la región. Dentro de las causas naturales más comunes que producen fenómenos de hundimiento del terreno destacan:

Procesos hidrometeorológicos

El agua juega un papel fundamental, ya que puede causar dos tipos de efectos en el suelo: la disolución de los enlaces entre partículas y/o la pérdida de las tensiones capilares (figura 1). Las lluvias constantes e intensas, y las inundaciones son los principales factores detonantes de la formación de hundimientos por **hidrocompactación**. Las inundaciones paulatinamente provocaran la erosión del suelo, generando **hundimientos diferenciales** (Vera y López, 2010).

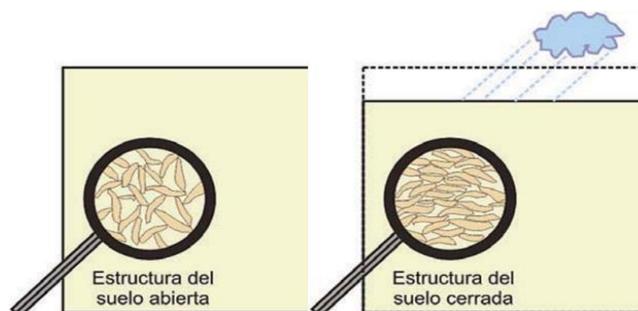


Figura 1. Subsidencia por hidrocompactación, ilustración modificada del original en Tomás y coautores, 2009, pp. 298

Tomás y coautores (2009) menciona que el asentamiento se produce en determinados tipos de suelos, con un bajo contenido de humedad y situados sobre el nivel freático, al ser saturados puede causar asientos de la superficie terrestre comprendidos entre 1 a 5 m. Este tipo de comportamientos se presenta principalmente en el norte del país y se les conoce como suelos colapsables.

Procesos morfotectónicos

Los descensos de la superficie terrestre producidos por fallas geológicas, que son planos o zonas de ruptura en el sustrato rocoso (figura 2), a lo largo de la cual se produce un desplazamiento (Lugo, 2011); desencadenan un efecto conocido como **subsistencia tectónica**. Este tipo de hundimiento es muy lento y de poca magnitud frente a otras categorías y tipo, alcanza unos pocos mm o décimas de mm al año (Tomás y coautores, 2009).

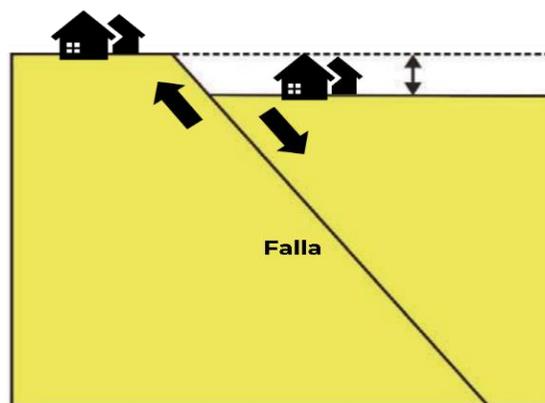


Figura 2. Subsistencia tectónica, ilustración modificada del original en Tomás y coautores, 2009, pp., 298

Procesos volcánicos

El vulcanismo forma cavernas o túneles, los cuales pueden colapsar o generar hundimientos. Estas formaciones se denominan **tubos de lava**, los cuales durante una erupción volcánica se forman debido al enfriamiento diferencial de lavas sostenidas y uniformes (basálticas), canalizadas por coladas muy fluidas

que, dependiendo la topografía, se transportan lejos de los flancos del edificio volcánico. Martín del Pozzo y coautores (1997), explica que los tubos de lava generalmente se forman cerca de la superficie, y su origen se debe a la solidificación gradual de la corteza superficial de la lava en movimiento que se va separando en pequeñas unidades de flujo (tubos secundarios) endureciéndose al interior del tubo (figura 3). Conforme el flujo de lava avanza, las unidades siguen creciendo y uniéndose entre sí, generando un sistema tridimensional de tubos de forma cilíndrica, rectangular e, incluso, triangular de mayor tamaño y longitud.

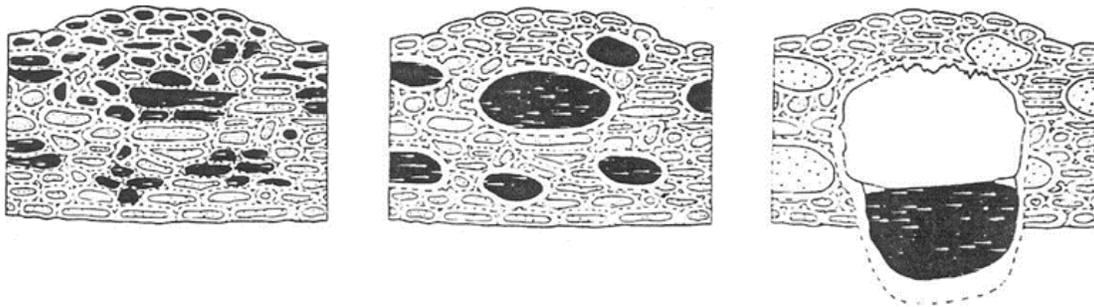


Figura 3. Evolución de tubos de lava dentro de un flujo, ilustración tomada de Martín del Pozzo y coautores, 1997

Raramente estos tubos se encuentran llenos de lava, sin embargo es probable que en su interior se desarrollen formaciones primarias como estalactitas, estalagmitas y columnas. González de Vallejo y coautores (2002) señala que, a pesar de que los hundimientos no son frecuentes por la alta resistencia de la roca, sí representan un riesgo frente a cargas transmitidas por cimentaciones y otras obras.

Tubificación

La tubificación (piping) o erosión interna es la formación de tubos subterráneos horizontales o sub horizontales, debido al arrastre progresivo de partículas de suelo fino debido al efecto del flujo de agua por percolación (Benet y coautores, 2011). Si el terreno es heterogéneo, una vez que las partículas empiecen a ser

removidas comienzan a formarse los tubos por donde el agua circulará a mayor velocidad (figura 4), lo que provocará un aumento del gradiente hidráulico y una progresión de la erosión, aumentando el diámetro de los tubos donde el régimen puede ser turbulento.

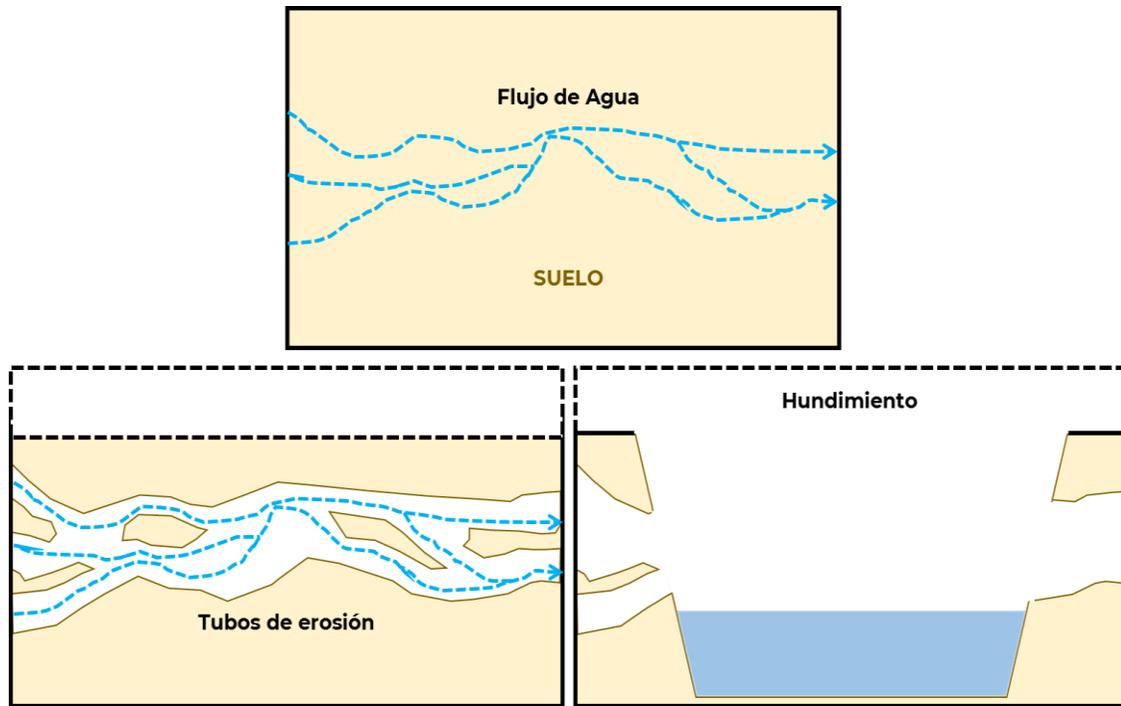


Figura 4. Ejemplo de Tubificación

Este proceso erosivo se presenta primordialmente en suelos o sedimentos poco consolidados (materiales deleznales). El proceso de tubificación sucede cuando el agua arrastra los materiales más finos, como las arcillas y los limos, dejando oquedades entre los poros del suelo que, posteriormente, permitirán el paso de partículas más grandes como lo son las arenas. En este tipo de terrenos, los hundimientos se forman de adentro hacia afuera debido a que los tubos o canales crecen de manera horizontal, hasta un punto donde el agua fluye libremente.

Un ejemplo de este fenómeno es el hundimiento (socavón) sucedido en un terreno de cultivo en la comunidad de Santa María Zacatepec, municipio de



Juan C. Bonilla, Puebla, ocurrido el 29 de mayo de 2021, donde se tienen depósitos de suelos aluviales de origen volcánico (figura 5), con las características mecánicas e hidráulicas antes mencionadas.



Figura 5. Visita de verificación del hundimiento en Santa María Zacatepec, municipio de Juan C. Bonilla, Puebla, por personal del CENAPRED el 17 de agosto 2021



Hundimiento por Karst

La palabra *karst* proviene del topónimo esloveno “Kras”, que hace referencia a una región fronteriza entre Eslovenia e Italia, donde predomina una meseta de calizas. Este tipo de relieve permite tener redes hidrológicas regionales subterráneas, así como variedad en el nivel freático, por lo que es estudiado por hidrólogos e hidrogeólogos.

El karst se desarrolla a partir de la disolución química de rocas calizas al entrar en contacto con agua (H_2O), la cual, al mezclarse con ácidos orgánicos del aire en descomposición (humus), forma el ácido carbónico ($CO_3 H_2$) que disuelve a las rocas carbonatadas y evaporíticas que contienen carbonato de calcio ($CO_3 Ca$), creando bicarbonato cálcico ($CO_3 H_2 Ca$). Dado que este tipo de rocas poseen una alta porosidad y permeabilidad, es común que se formen huecos de grandes dimensiones, provocando estados de desequilibrio que dan lugar a hundimientos por el colapso súbito de oquedades previamente formadas (Mora y coautores, 2016).

De acuerdo con González de Vallejo y coautores (2002), los materiales evaporíticos (sales y yesos) son mucho más blandos y presentan mayor capacidad de disolución. Producen movimientos de reajuste continuos y paulatinos que no alcanzan profundidades superiores a los 200 m. Los hundimientos en rocas carbonatadas (caliza o limestone en inglés, calcita, dolomita), generalmente tienen un comportamiento repentino y brusco.

En los paisajes kársticos se dificulta la definición de geoformas, debido a la gran cantidad de estructuras caprichosas que se expresan en diferentes escalas, pues la fuerte influencia de los mecanismos de disolución conlleva a tener límites difusos; sin embargo, cuando se trata de hundimientos por karst la geometría tiende a ser cónica (De Pedraza, 1996).

Una de las expresiones en superficie mejor reconocidos son las dolinas (sinkholes), que son depresiones circulares en forma de cuenco (Missouri Geological Survey; <https://dnr.mo.gov/geology/geosrv/envgeo/sinkholes.htm>). Otras formas no son fácilmente visibles en la superficie porque están cubiertos con suelo o capas delgadas de roca; por ello, una manera de caracterizar el karst es por la cantidad de formas de disolución (figura 6), ya sea en superficie (poljes, lapiazes) o en el subsuelo, donde se forman complejas redes de cavernas (galerías, simas).

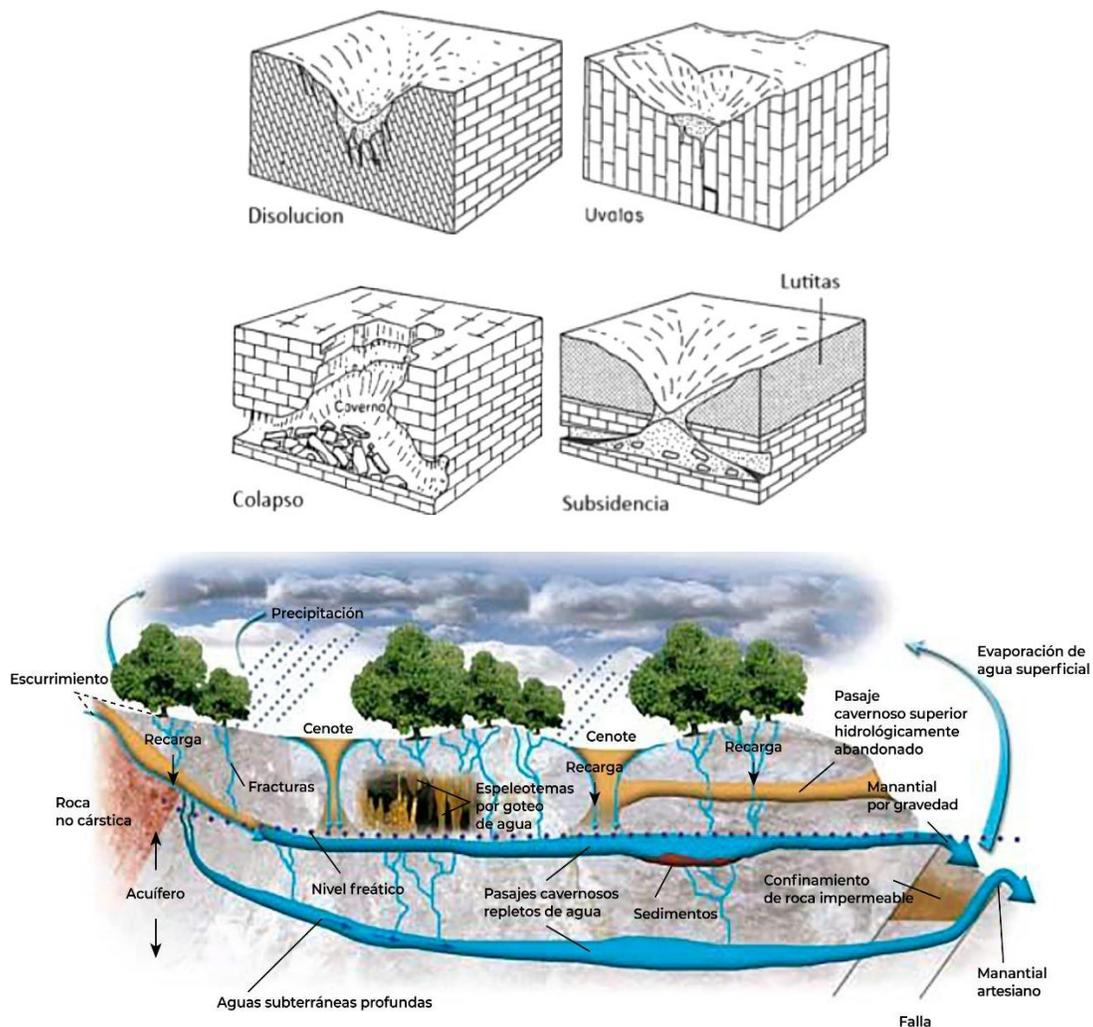


Figura 6. Tipos de dolinas originadas según De Pedraza, 1996, y ciclo hidrológico en áreas kársticas, Perspectivas IMTA, 24 de abril 2022 (<https://www.gob.mx/imta/es/articulos/agua-y-desarrollo-economico-en-zonas-carsticas?idiom=es>)

En México, los paisajes kársticos representan aproximadamente el 15 % del territorio nacional (figura 7) y se localizan principalmente en la Sierra Madre Oriental y la península de Yucatán (Mora y coautores, 2016).



Figura 7. El Karst de México, Mapa NA III 3, Espinasa-Pereña R. 2007

El peligro del relieve kárstico radica en los hundimientos superficiales que pueden suceder en zonas ocupadas por ciudades, comunidades u obras de infraestructura, por lo que, conocer mejor las condiciones del terreno y las causas que los originan es importante, entre éstas las más frecuentes son las siguientes:

- Lluvias intensas y la variación del nivel freático en terrenos kársticos pueden provocar reajustes tensionales que pueden generar hundimientos.



- **Sufusión** (suffosion), que se asocia normalmente a topografías kársticas, aunque pueden formarse en otros tipos de roca, como el basalto. Consiste en la evacuación o filtración de sedimentos no consolidados a través de un sustrato de roca caliza fisurada o grietada (conductos de solución); con el tiempo, van formando una depresión de profundidad variable (Soriano, 2013). El fenómeno se debe a la circulación de agua que arrastra las partículas de suelo, lo que ocasiona el agrandamiento de las oquedades subterráneas.
- Colapso de techos en cavernas o conductos, que comienza con una erosión lenta del suelo durante un período prolongado. Cuando las capas de suelo sobre el vacío ya no pueden sostenerse por sí mismas, el techo de las oquedades se colapsa para revelar una caverna profunda que se conecta a una abertura de lecho rocoso subyacente. Estos vacíos pueden descubrirse durante una excavación, perforación o mediante exploración geofísica. A estas formaciones en la península de Yucatán se le llama karst de plataforma (Espinasa, 2007) y está caracterizado por geoformas denominadas cenotes, los cuales se generan por la disolución de rocas calizas. En esta zona también existen galerías y ríos subterráneos (figura 8).

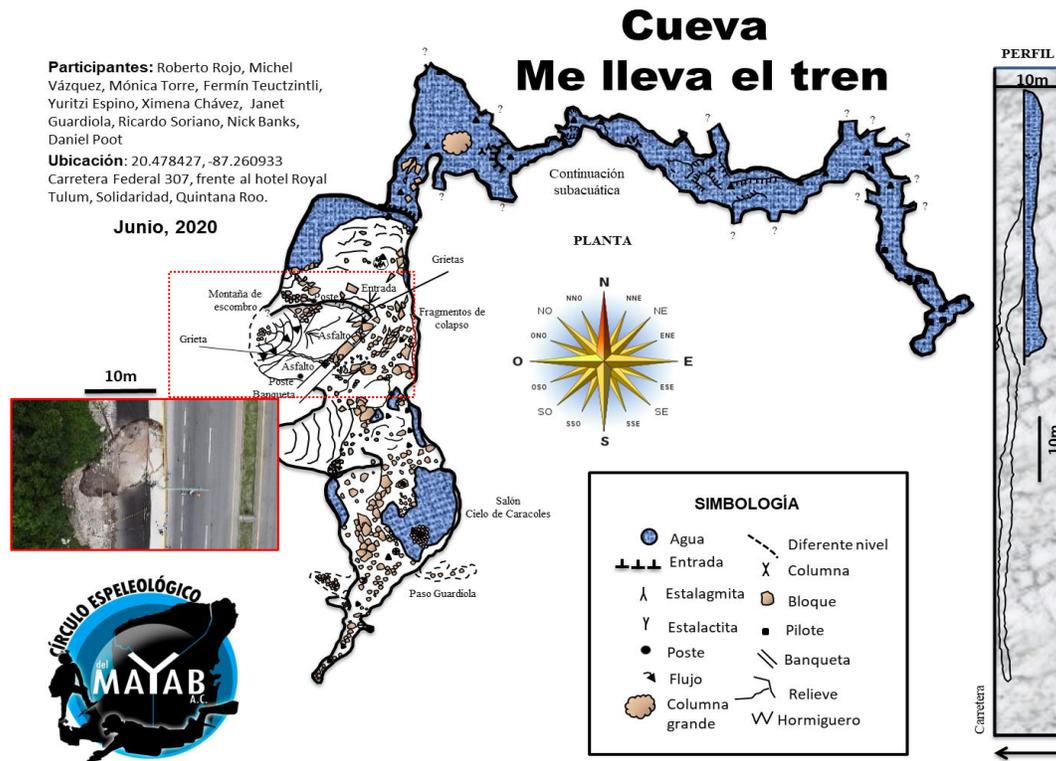


Figura 8. Mapa de la cueva denominada *Me lleva el tren* elaborado por el Círculo Espeleológico del Mayab, A.C. 21 de junio 2020, <https://www.facebook.com/C%C3%ADrculo-Espeleol%C3%B3gico-del-Mayab-AC-483051891765711/photos/3905423319528534>

Los casos de hundimientos súbitos asociados a la presencia de formaciones kársticas documentados por el CENAPRED, son pocos; no obstante, son significativos, porque representan un riesgo para la población, ya que se han presentado en zonas habitadas, tal es el caso de los hundimientos, conocidos también como *abras*, asociados a la disolución de las rocas por influencia de flujos de agua y fallamiento del relleno aluvial (figura 9), acaecidos en algunos municipios de la comarca lagunera.

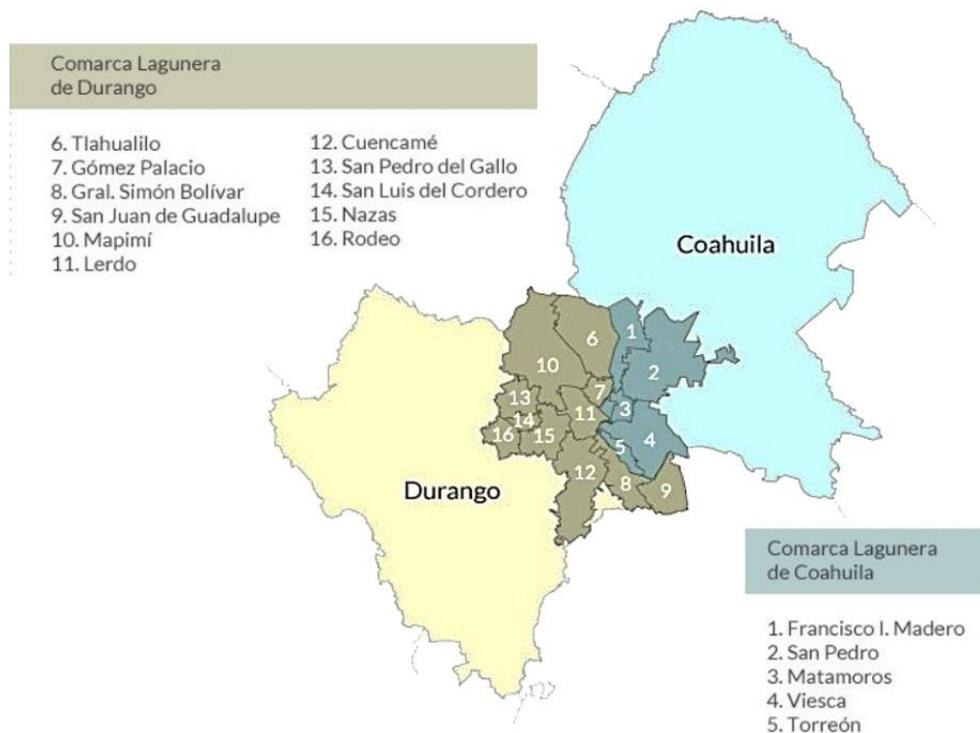
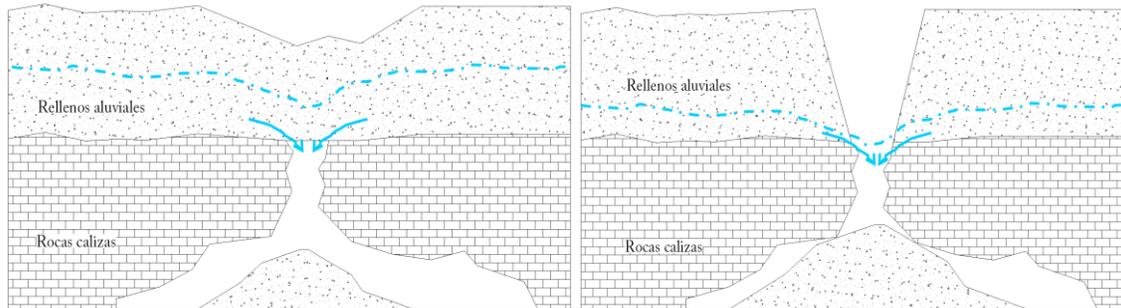


Figura 9. Esquema del proceso de formación y migración de cavidades karsticidad y ubicación de la comarca lagunera entre los estados de Durango y Coahuila tomado de ¡Vive la Comarca! (<https://vivelacomarca.com/>)

En el municipio de Lerdo, desde 2004 se han presentado hundimientos, los cuales han afectado zonas agrícolas, calles y viviendas (figura 10), particularmente en las colonias César G. Meraz, Villa de las Flores y Emiliano Zapata (CENAPRED, 2017a).



Figura 10. a) Hundimientos súbitos en la colonia César G. Meraz, municipio de Lerdo, diciembre 2008 y b) Puente la Comarca en el Río Nazas, 28 de septiembre 2016. (<https://www.milenio.com/estados/rellenan-enorme-socavon-lecho-seco-nazas>)

De acuerdo con información proporcionada por el gobierno municipal de Gómez Palacio se tuvieron afectaciones en algunas viviendas y calles de las colonias Ricardo Flores Magón (20 de septiembre de 2016) y Bellavista (30 de abril de 2017) en la calle Brezo, entre las avenidas Laurel e Independencia (CENAPRED, 2017b).



Figura. 11 Hundimiento en la calle Brezo en la colonia Bellavista, municipio de Gómez Palacio, CENAPRED 2017b

Hundimiento Regional

En general se trata de un fenómeno muy lento que puede abarcar grandes extensiones del terreno y puede ser detonado por causas naturales y/o humanas. Se puede definir como el descenso y deformación de la superficie debido al apoyo insuficiente debajo del terreno, respecto a un punto que no se mueve (Marker, 2013). Normalmente sucede de manera diferida tanto en tiempo, espacio y velocidad, por la forma disposición y heterogeneidad de los depósitos de suelo. Por la velocidad en la que se presenta, es prácticamente imperceptible y puede tomar cientos o miles de años para desarrollarse, según la topografía del terreno y los cambios climáticos del entorno.

En la figura 12 se observan algunas de características naturales que condicionan la forma en la que se presenta el hundimiento del terreno en un valle conformado por depósitos fluviales en una cuenca volcánica, el cual, por sus características estratigráficas y geomorfológicas suele inducir diferencias en las deformaciones del terreno (asentamiento diferencial):

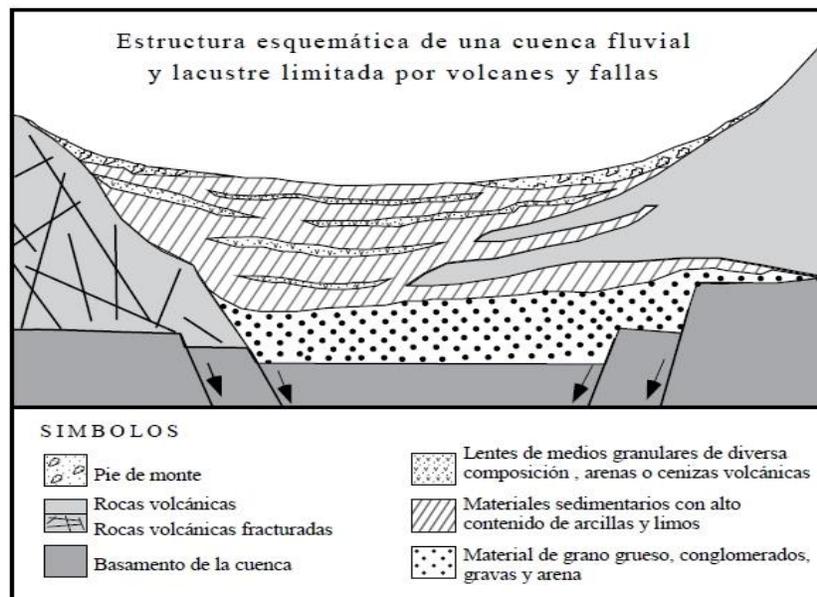


Figura. 12 Esquema conceptual de sedimentación fluvio lacustre en una cuenca cerrada de origen volcánico. Modificado de Carreón-Freyre y coautores, 2006



a) Geometría del basamento

Es común ubicarlo en el fondo de valles donde descansan los materiales de relleno, susceptibles a deformarse y compactarse. El basamento puede verse afectado por movimientos tectónicos que causen irregularidades y escalonamientos muy pronunciadas (representado en figura 10 de color gris como basamento de la cuenca). Los depósitos en superficie tendrán efectos de estas irregularidades a través de líneas o franjas de asentamientos o escalonamientos, los cuales generalmente coinciden con las protuberancias del basamento. Jachens y Holzer (1982) corroboraron que la topografía de la roca basal es un factor importante en la forma y distribución del hundimiento, ya que las grietas se presentaran en la superficie en los puntos o sitios de máxima curvatura, es decir, donde se presenta el hundimiento diferencial.

b) Influencia de las propiedades (mecánicas e hidráulicas) de los suelos o fenómeno de consolidación

La consolidación de los suelos es común en valles y cuencas rellenadas con depósitos lacustres, aluviales, aluvio-lacustres o fluviales, constituidos por partículas finas de suelo como arcillas y limos, las cuales pueden variar en profundidad y distancia horizontal (achurado representado en figura 10 como materiales sedimentarios). También se presenta en áreas con rellenos no compactados caracterizados por depósitos de arenas, o bien, en zonas pantanosas con alto contenido de materia orgánica (en descomposición).

El hundimiento regional abarca grandes extensiones y puede ocasionar fallas en obras de ingeniería, rotura de los sistemas de agua potable y drenaje (fugas e inundaciones), afectaciones en tuberías de gas y petróleo, agrietamientos o fracturas en viviendas, deformación y ondulaciones en pavimentos y construcciones, escalonamientos o asentamientos en calles y avenidas, y, raramente, produce pérdida de vidas humanas.



Existen casos en los que se pueden presentar hundimientos diferenciales rápidos y destructivos, especialmente cuando la topografía y el efecto de actividades antrópicas generan deformaciones y escalonamientos que inducen esfuerzos de tensión en el subsuelo. Al rebasarse la capacidad del terreno para soportar los esfuerzos de tensión, se originan agrietamientos en las zonas de mayor tensión. Es por ello que en algunos casos no se le considera como una condición de riesgo latente, ya que sus efectos generalmente se observan a largo plazo, por lo que es usual que las afectaciones no cuenten con elementos legales suficientes (Rodríguez y Rodríguez, 2006).

Una de las causas antrópicas por excelencia que potencializa el hundimiento regional, es la extracción excesiva del agua subterránea, es decir, los gastos y la ubicación de pozos de bombeo. Desde hace varias décadas el hundimiento regional de la Ciudad de México ha sido una referencia significativa a nivel mundial por la extensión y cantidad de zonas sujetas a estos fenómenos, pero fue hasta 1948 que el ingeniero Nabor Carrillo demostró científicamente que el fenómeno de subsidencia se debía a la consolidación del suelo, acelerado por la extracción del agua subterránea (Marsal y Mazari, 1969).

En el siguiente capítulo retomaremos el tema y hablaremos más sobre las actividades humanas que desencadenan hundimientos locales y regionales.

Hundimiento por actividades humanas

Actualmente, el crecimiento de la población y su necesidad de aprovechar los bienes naturales del subsuelo aceleran las subsidencias, donde sus efectos ya son notables y tiene consecuencias para el desarrollo de las ciudades. Entre las actividades más frecuentes, que inducen o aceleran este fenómeno, destacan la extracción de recursos naturales, la construcción de infraestructura o viviendas, y la implementación o falta de mantenimiento de sistemas de alcantarillado y agua potable.

Entre las actividades realizadas para la extracción de recursos naturales destacan:

1. Minería

La extracción de todo tipo de minerales, o bancos de materiales subterráneos, provoca hundimientos locales en superficie debidos a la deformación y/o colapso de galerías, túneles, bocaminas o cavernas generadas para la extracción de estos (figura 13). El hundimiento puede producir fallas y colapsos súbitos o intempestivos, que no dan oportunidad de evacuar a las personas; su predicción es difícil debido a que pueden aparecer años después de abandonada la mina. En el caso de estratos subhorizontales, la extensión puede ser mayor, pero son de menor magnitud, por lo que es más fácil predecir su ocurrencia (González de Vallejo y coautores, 2002).

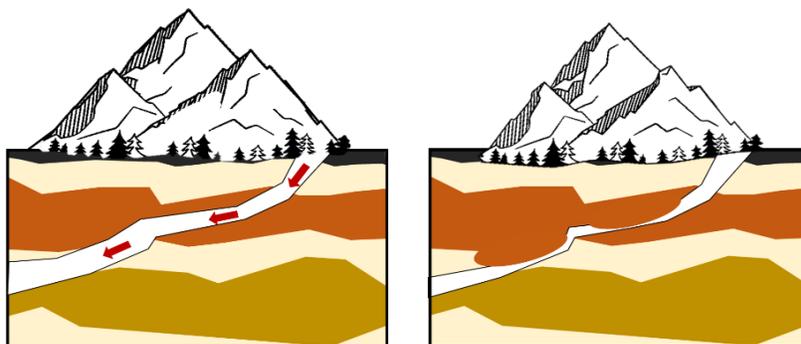


Figura 13. Esquema de un túnel con hundimiento



El CENAPRED ha documentado casos de hundimientos mineros en Ciudad de México, Sonora, Chihuahua y Coahuila, donde la actividad minera se ha dado por más de 200 años, afectando viviendas y terrenos de cultivos, con hundimientos de hasta 20 metros de profundidad y diámetros de hasta 30 m.

Un ejemplo de subsidencia minera se presenta en la alcaldía Álvaro Obregón, en la Ciudad de México, con varias decenas de kilómetros de minas de materiales pétreos abandonadas; con dimensiones mínimas de 1.5 a 2.0 m, alojadas en uno varios estratos localizados a diferentes profundidades.

Existen sitios donde se tienen salones de grandes dimensiones de hasta 10 m de diámetro. Debido a una falta de regulación del uso de suelo, estas zonas han sido pobladas y en la actualidad se contabilizan 32 colonias asentadas en esta demarcación, lo que representa aproximadamente el 60% de su territorio. Es por ello que esta alcaldía es de las que más colapsos, agrietamientos y daños estructurales presenta (figura 14).



Figura 14. Viviendas dañadas por estar desplantada sobre una mina, colonia Golondrinas, Álvaro Obregón, base de datos CENAPRED

2. Extracción de agua

El descenso del nivel freático genera un aumento de las presiones efectivas en la masa del suelo, lo cual, a su vez, genera asentamientos en el terreno (Terzaghi, 1943). El incremento de las presiones efectivas se debe a la reducción de la presión de poro dentro de la masa del suelo.

Las consecuencias del déficit entre bombeo y recarga de los mantos acuíferos, además de los hundimientos diferenciales, produce el abatimiento del nivel freático y una disminución del contenido de agua en las partícula de suelo. Este proceso da como resultado la compactación o disminución de su volumen (figura 15). Si los materiales están constituidos por estratos esencialmente horizontales, la deformación volumétrica resultante es unidimensional o en una dirección. Estos descensos del nivel del terreno dependen de la velocidad local a la que se extrae agua del subsuelo y de la profundidad y naturaleza de los sedimentos.

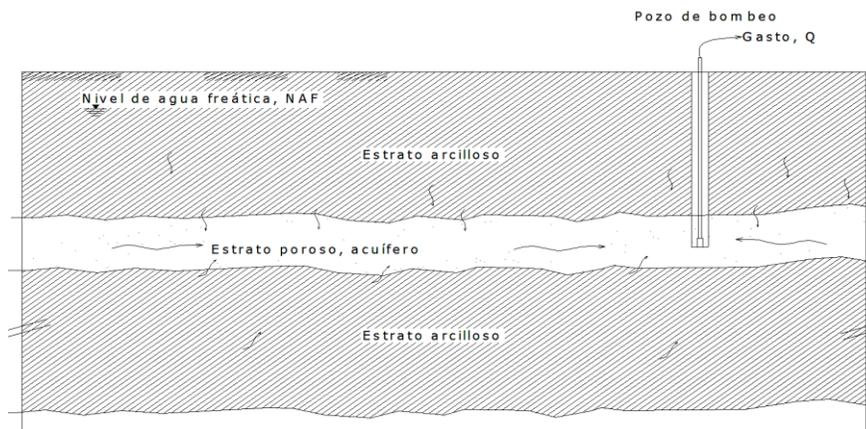


Figura 15. Esquema simplificado de consolidación por extracción de agua en un depósito de suelos (Mendoza y coautores, 2009)

Este tipo de hundimiento se desarrolla en el transcurso del tiempo y pueden ser necesarios varios años o décadas para que sea visible; sin embargo, si la extracción es intensiva, puede generar hundimientos de consideración y daños irreparables a obras de ingeniería, monumentos históricos e infraestructura.

Este tipo de hundimientos son comunes en terrenos agrícolas y zonas urbanas densamente pobladas, algunos ejemplos se muestran en la figura 16a y 16b.



Figura 16. a) Daños observados en una vivienda del municipio de Aguascalientes, mayo de 2003 y b) Efectos del hundimiento regional estado de México, base de datos CENAPRED

3. Fracking

Es una técnica para extraer hidrocarburos mediante la perforación vertical y horizontal, induciendo el fracturamiento hidráulico. Con esto se inyecta a alta presión un fluido (agua, propante y un aditivo químico) que fractura la roca para permitir que fluyan los hidrocarburos atrapados en ella (Kargbo y coautores, 2010). Este cambio de presiones durante la perforación puede producir el incremento significativo de sismos en zonas cercanas a los sitios de extracción, especialmente si hay cercanía a una falla geológica. También puede inducir hundimientos severos (figura 17), debidos a la erosión y sobrecarga de sedimentos.

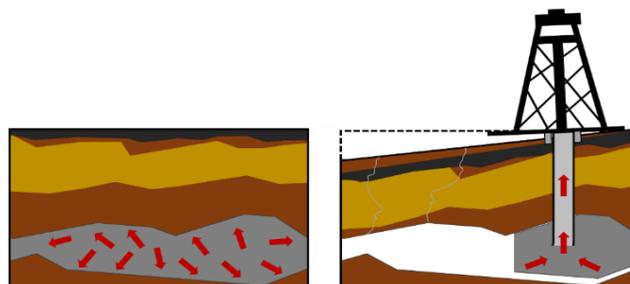


Figura 17. Esquema de hundimiento por fracking

4. Hundimientos por aplicación de sobre cargas

La colocación de cargas en la superficie del terreno genera deformaciones verticales debidas al peso propio de las construcciones (figura 18). Este efecto es especialmente visible en depósitos de suelos arcillosos o limosos de alta plasticidad y de origen lacustre o aluvio lacustre.

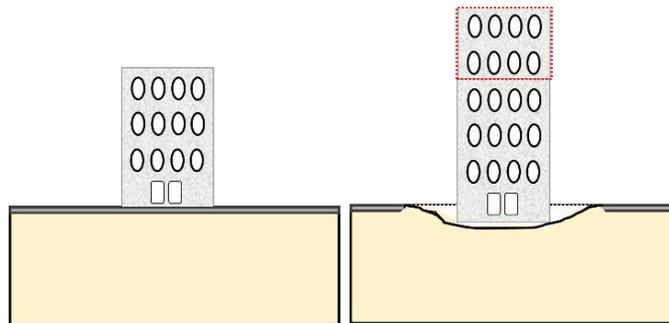


Figura 18. Esquema de hundimiento por sobrecarga

5. Excavaciones en zonas urbanas

Las excavaciones como túneles para carreteras, ferrocarriles, almacenamientos o bien para sistemas de transporte subterráneo como el metro de la Ciudad de México, pueden dar lugar a hundimientos o colapsos (figura 19), debidos al mal diseño y/o escaso espesor de recubrimientos (González de Vallejo y coautores, 2002).

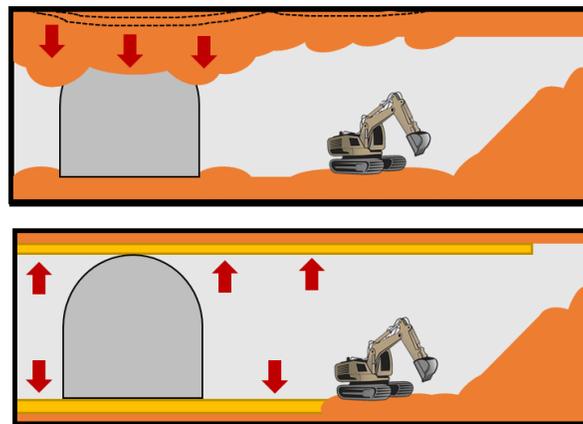


Figura 19. Esquema de hundimiento por excavaciones

6. Problemas hidráulicos

La ruptura de tuberías de drenaje y de agua potable (figura 20), provoca fenómenos de erosión o tubificación, que a su vez pueden originar hundimientos locales o diferenciales súbitos.

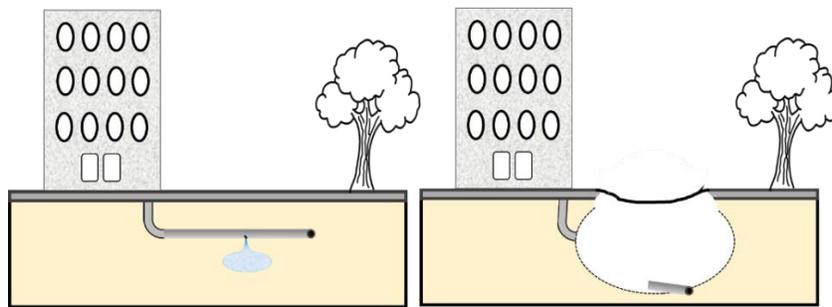


Figura 20. Esquema de hundimiento por fugas de agua

7. Rellenos

En general este tipo de asentamientos o hundimientos se producen por el uso inadecuado de los materiales de relleno, o bien por la falta de control de calidad de los mismos, dando como resultado una mala compactación (figura 21).

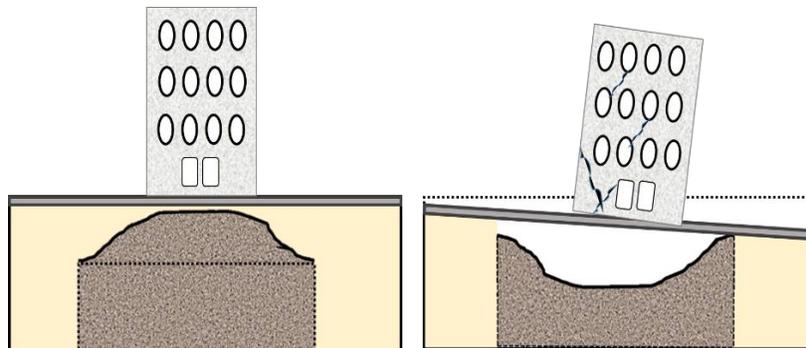


Figura 21. Esquema de hundimiento por rellenos



AGRIETAMIENTO DEL TERRENO

El estudio del fenómeno de agrietamiento implica el análisis de las condiciones de propagación de grietas en tres dimensiones: profundidad, longitud y dirección o inclinación, sin embargo, también se puede considerar la abertura, el patrón de agrietamiento en planta y/o profundidad, y su evolución morfológica. Los estudios más recurrentes para su clasificación son:

1. Estudios de morfología y evolución de grietas
2. Estudios de agrietamientos asociados a problemas locales específicos / efectos secundarios de subsidencia, evento sísmico o volcánico
3. Estudios individuales de variables que intervienen en la formación de grietas
4. Modelos de inicio y propagación de grietas
5. Estudios del comportamiento de suelos agrietados

En México persiste un fuerte debate sobre los términos correctos para este fenómeno (tabal 1), ya que existen varios autores que describen de manera diferente el agrietamiento o fracturamiento del terreno (cracking); se considera importante conocer las distintas epistemologías para comprender mejor el origen del fenómeno.

Tabla 1. Autores y conceptos en debate

| AUTOR | GRIETA | FRACTURA |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Auvinet (2008, 2009) | Fenómeno de agrietamiento se puede manifestar a consecuencia de cualquier condición que genera esfuerzos de tensión importantes en el suelo, por tanto tiene distintas causas. | Solo se menciona en procesos hidráulicos. |
| Lugo (2011) | Ruptura longitudinal por la desmembración de las rocas en una serie de bloques por planos de fisuras debido a diferentes causas. | Ruptura de las rocas sin desplazamiento de bloques que separan, esté término se puede usar también como sinónimo de falla. |



| | | |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Carreón (2006, 2011)</p> | <p>Se asocia con cambios de humedad de cualquier material, y generalmente, tiene una connotación superficial.</p> | <p>Separación de materiales geológicos generada cuando su resistencia es menor al esfuerzo que se le aplica en el subsuelo o en la superficie, es un fenómeno multifactorial y multiescalar, por lo que su caracterización requiere de una aproximación interdisciplinaria y dinámica que permita crear un sistema de análisis para cada tipo.</p> <p>Fracturas por deformación diferencial de extensión variable en superficie: afectan principalmente a la secuencia sedimentaria somera.</p> <p>Fracturas locales en materiales colapsables de materiales no cohesivos que forman socavamientos superficiales y se propagan por zonas de debilidad preexistentes.</p> <p>Fracturas de orden intermedio que afectan secuencias de orden hidrogeológico y se originan por la desestabilización mecánica que origina una extracción excesiva de agua subterránea en zonas localizadas.</p> <p>Fracturas de orden regional al fallamiento del basamento rocoso, éstas se propagan en profundidades mayores a los 500 m hacia la superficie en zonas de debilidad como contactos litológicos o fracturas preexistentes.</p> |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Independiente de cómo se le denomine, el agrietamiento del terreno implica un desequilibrio mecánico producido por sobrecarga estática, tensión y dinámica de presiones en el medio geológico, cuyo origen puede ser desencadenado por cualquiera de los tipos descritos a continuación, o bien, por la combinación de ellos:

- 1) **Tectónica:** en estos casos el agrietamiento es producto del movimiento de una falla geológica o un sismo, se puede explicar por tensión cortante o deslizamiento (figura 22), donde las caras de las grietas se deslizan una respecto de la otra en dirección perpendicular a su vértice por la separación asimétrica, por lo que se presenta un desplazamiento tangencial y perpendicular al frente de la grieta.

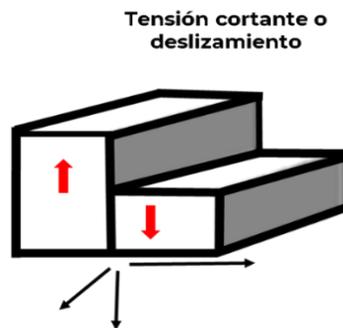


Figura 22. Clasificación de la propagación de grietas por tensión cortante o deslizamiento

- 2) **Secado:** a este tipo de agrietamiento también se le conoce como **grietas de desecación** (figura 23). Se forman por efecto de contracción generado por la desecación de suelos arcillosos o calcáreos saturados, generalmente ubicados en llanuras de inundación. Estas tipo de grietas fragmentan la superficie de la capa en la que se forman porciones poligonales irregulares, cuya profundidad puede alcanzar los 3 m y aberturas de entre 10 o 15 cm (Lugo, 2011).



Figura 23. Propagación de grietas por secado, tomadas de <https://es.dreamstime.com/grietas-de-contracci%C3%B3n-y-desecaci%C3%B3n-en-tierra-seca-el-cambio-clim%C3%A1tico-caus%C3%B3-una-muy-profunda-pronunciada-secado-la-europa-con-image169962729>

- 3) Esfuerzos de tensión:** depende de la estabilidad, plasticidad, elasticidad y propagación de los esfuerzos de los materiales del suelo (figura 24). Se generan cuando los planos de la grieta se separan entre sí; es decir, se observa una abertura simétrica con desplazamiento relativo entre las caras correspondientes, perpendicular a la superficie de ruptura por la tensión normal al plano de fractura.

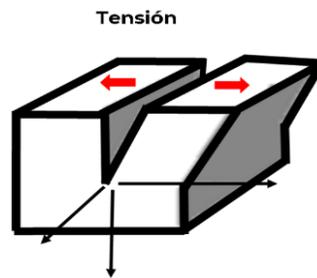


Figura 24. Clasificación de la propagación de grietas por tensión

- 4) Rotura transversal:** conocida como tensión cortante y/o torsión (figura 25), en la cual las caras de la grieta se deslizan una sobre la otra pero con un desplazamiento paralelo al frente de la grieta y ocasionado por la inducción de un esfuerzo de torsión.

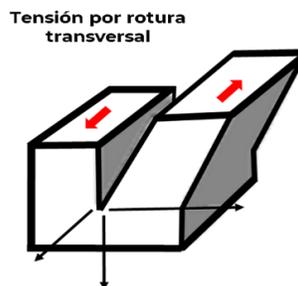


Figura 25. Clasificación de la propagación de grietas por rotura transversal

- 5) Fracturamiento hidráulico:** durante lluvias intensas (figura 26), el agua se infiltra provocando encharcamientos que inducen esfuerzos de punzonamiento en la “punta” de la grieta agrandando la profundidad y abertura de la misma. Adicionalmente, al haber una circulación del agua dentro de la grieta, ésta genera un proceso de erosión interna, lo cual

magnifica los agrietamientos y puede producir oquedades en el subsuelo que al fallar generan hundimientos súbitos.

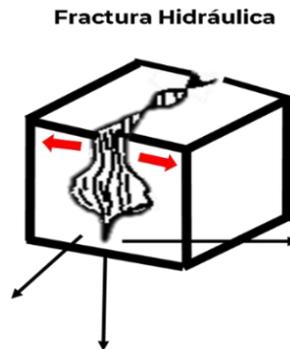


Figura 26. Clasificación de la propagación de grietas por fractura hidráulica

6) Estratigrafía y transición abrupta: cuando se tienen capas intercaladas o litologías de resistencias variables (figura 27), en las zonas de contacto se origina una deformación que origina la aparición de grietas en las zonas de transición.



Figura 27. Clasificación de la propagación de grietas por transición abrupta

7) Desgastes de materiales: fuerzas mecánicas que actúan sobre la superficie y la variación de temperatura (figura 28). Estos agrietamientos son comunes en las carpetas asfálticas, banquetas o pisos de cemento.



Figura 28. Clasificación de la propagación de grietas por desgaste

- 8) Extracción de recursos naturales del subsuelo:** ya sea por bombeo en estratos profundos o pozos de agua (figura 29), o bien para la extracción del petróleo o gas (fracking).

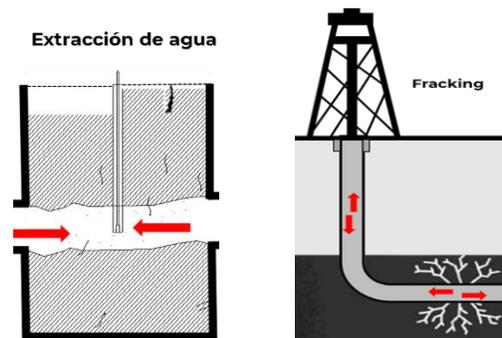


Figura 29. Clasificación de la propagación de grietas por extracción de recursos

- 9) Rellenos:** como se mencionó en el capítulo anterior, este tipo de obras se forman principalmente por acciones antrópicas al hacer una excavación y rellenar, o bien, al rellenar huecos preexistentes o barrancas sin los cuidados debidos en la compactación y el relleno (figura 30). Al cabo del tiempo, se observará que al centro de la excavación el suelo comienza a deformarse y en las orillas aparecerán pequeñas grietas que aumentan de tamaño.

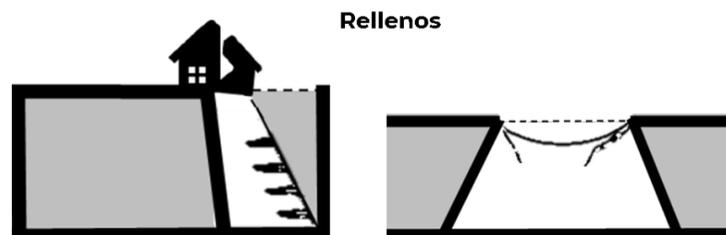


Figura 30. Clasificación de la propagación de grietas por rellenos

Este tipo de agrietamiento se presenta con frecuencia en obras públicas al colocar tuberías en las calles o cuando el drenaje se rompe y el material del subsuelo comienza a deslavarse y filtrarse por la tubería rota.

10) Hundimiento: provoca el agrietamiento de tensión interna (estiramiento), siendo el más importante y destructivo, debido a que el hundimiento es diferencial o disparejo en distintas zonas del terreno. Aunque se trata de un fenómeno que sucede de manera paulatina (figura 31), los principales peligros para la población son las afectaciones en construcciones, las deformaciones y roturas de las tuberías de agua potable y/o de drenaje, la inclinación de edificios, la generación de daños en líneas de transmisión eléctrica, vialidades y puentes.

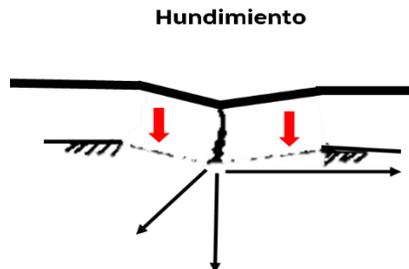


Figura 31. Clasificación de la propagación de grietas por hundimiento

No existe una regla general respecto a la delimitación de una zona de seguridad ante este tipo de fenómenos en función de la cercanía o lejanía de una obra o estructura, respecto al agrietamiento. En tanto la grieta no pase directamente sobre una vivienda, se tienen menos posibilidades de que las construcciones resulten afectadas, aunque pueden generarse daños en vialidades, estacionamientos, tuberías u otras obras de infraestructura.

Las edificaciones que manifiesten agrietamientos en muros, columnas y travesaños mayores a 2 mm, y ante la posibilidad de que el agrietamiento del terreno continúe, se recomienda que sean deshabitados y revisados por un especialista



en estructuras quien determinará el nivel de daño y las acciones a implementar para la rehabilitación, o bien, la recomendar la desocupación permanente del inmueble.

Afortunadamente el fenómeno sucede de manera lenta, por lo que pueden tomarse acciones de prevención para salvaguardar a la población. Una forma de controlar o retardar la aparición de grietas en rellenos, es modificando el estado de esfuerzos del suelo por medio del uso de rellenos aplicados progresivamente para reducir los esfuerzos de tensión en el vértice de la grieta.

ALGUNOS EJEMPLOS EN MÉXICO

El CENAPRED tiene documentados diferentes tipos de hundimientos y agrietamientos del terreno; a la fecha de elaboración de este documento (diciembre 2021), se contabilizan al menos **324 municipios** y **15 alcaldías** de la República Mexicana con daños en viviendas, calles, carreteras, obras de infraestructura, industrias, tierras de cultivo, tuberías y puentes. Algunos casos están vinculados con la extracción de agua, otros a eventos de lluvias intensas y, desafortunadamente, la gran mayoría son hundimientos súbitos asociados a fugas y daños en los sistemas de agua potable y drenaje. En la siguiente figura (32), se muestra un mapa con todos los municipios que han registrado algún hundimiento y/o agrietamiento del terreno, clasificado por el detonante más común a nivel nacional.

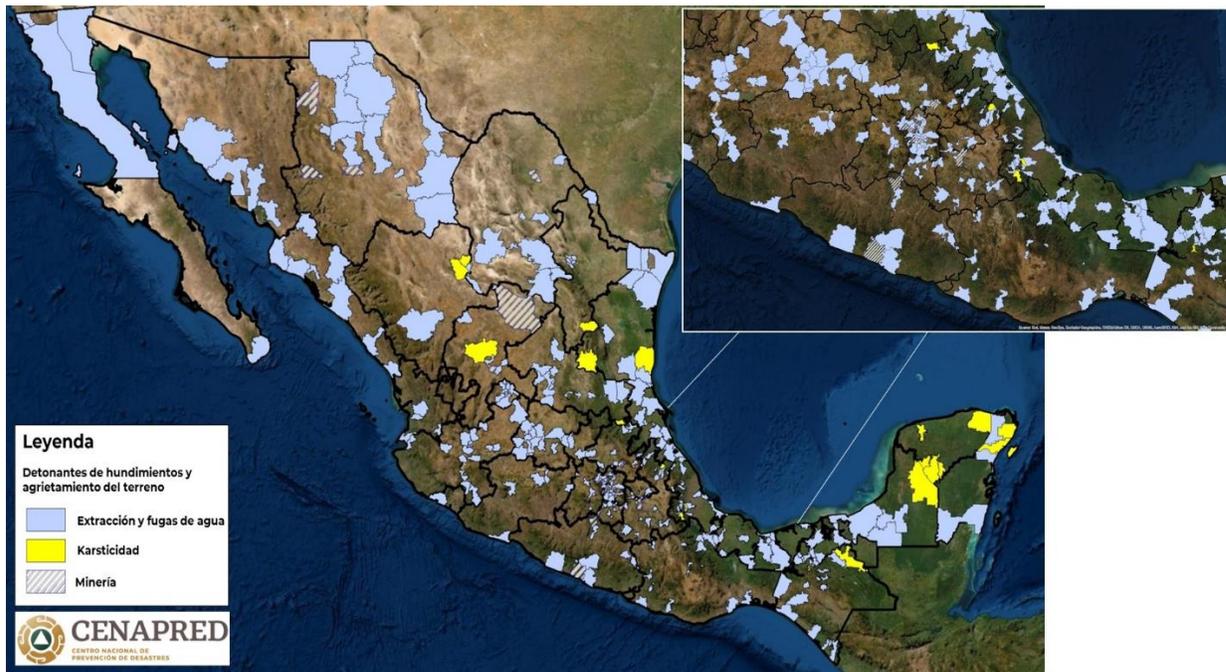


Figura 32. Mapa del detonante de hundimientos y agrietamiento del terreno más común en la República Mexicana

Hundimiento del terreno comunidad de Santa María Zacatepec, municipio de Juan Crisóstomo Bonilla, Puebla

La comunidad de Santa María Zacatepec se localiza al oeste del estado de Puebla, 5 km al sureste de la ciudad de Huejotzingo, y 1.5 km al sur del aeropuerto de Puebla, en una planicie conformada por depósitos aluviales no consolidados de origen volcánico, constituidos por suelos arenosos y arenolimosos no consolidados, intercalados con pómez.

El 29 de mayo del 2021 se reportó un estruendo, generado por la formación de un hundimiento súbito (socavón). El fenómeno se originó en un campo de cultivo a lo largo de capas de suelo permeables que formaron conductos (redes de flujo), generados por la tubificación natural (piping o sufusión) que produjo un efecto de socavación en los estratos más profundos, los cuales, al ser erosionados, formaron un hueco que, al colapsar súbitamente, originó el hundimiento (figura 33), el cual contenía un espejo de agua en su interior (figura 34).

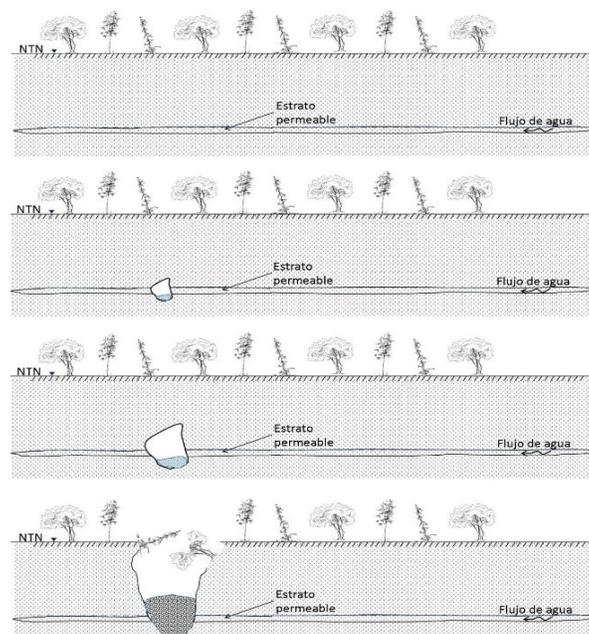


Figura 33. Esquema ilustrativo que muestra las fases de formación de un socavón



La erosión de estos huecos o conductos también puede ser propiciada por la extracción excesiva de agua subterránea, mediante bombeo. Especialmente cuando al extraer el líquido se genera arrastre de sedimentos, ocasionando que el material sea llevado a la superficie. De acuerdo con información de la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT) de Puebla y del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la CONAGUA, del total de permisos de extracción de agua en esa zona, 80% corresponden a pozos para uso agrícola, 15% doméstico y 5% industrial.

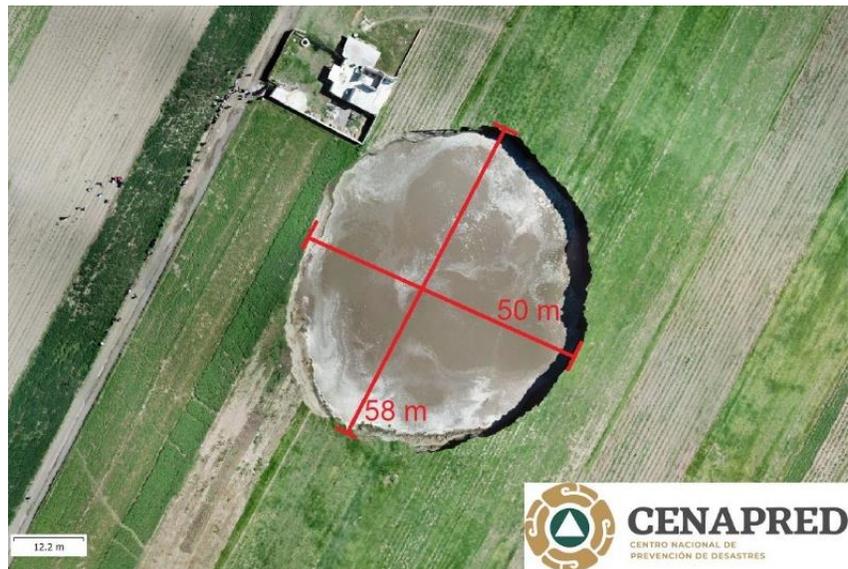


Figura 34. Dimensiones del socavón estimadas con imágenes obtenidas con Vehículo Aéreo No Tripulado, el 31 de mayo de 2021

El crecimiento del hundimiento ocasionó la destrucción de una vivienda que se encontraba a poco más de 210 m de la mancha urbana y a escasos 1 600 m al extremo sur de la pista del Aeropuerto Internacional Hermanos Serdán de Puebla. Los primeros registros del Centro Nacional de Comunicación y Operación en Protección Civil (CENACOM), indicaban que el diámetro del hundimiento creció de 10 m, el 29 de mayo, a 50 m, el 30 de mayo. Desde entonces, y hasta el 22 de junio, el tamaño de la oquedad aumentó en forma elíptica, alcanzando 126 m en el eje mayor y 122 m en el menor (figura 35).



Es decir, que la tasa de crecimiento tuvo su mayor intensidad entre el 29 de mayo y el 1 de junio, originados por la presencia de agua dentro de la oquedad; la cual tuvo un descenso en fechas posteriores.

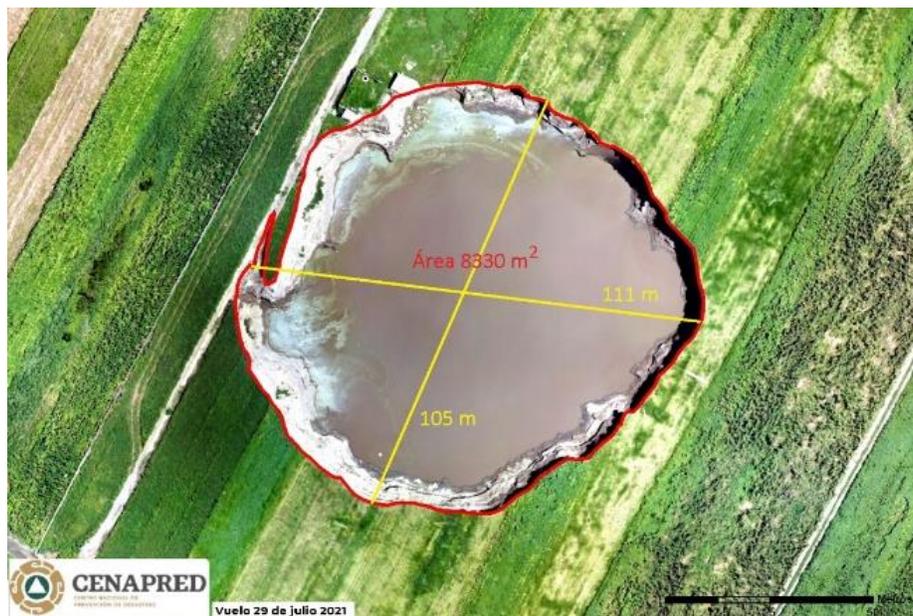


Figura 35. Dimensiones del socavón del 2 de junio y 29 de julio de 2021, estimadas con imágenes obtenidas con Vehículo Aéreo No Tripulado



Hundimiento de la Ciudad de México

La Ciudad de México ha sido observatorio de decenas o cientos de evidencias de los efectos del hundimiento local y regional. Dichos procesos se observan a simple vista en muchas construcciones y en obras de infraestructura. Por ejemplo, calles con abultamientos (lomos) que no se apreciaban antes y los desplomos en numerosos de edificios, como la Catedral Metropolitana.

De acuerdo con Lugo (1990), la formación geológica de la cuenca de México data de 600 mil años, donde los depósitos vulcano sedimentarios, tienen una proporción y variedad de microfósiles que forman parte de la microestructura del suelo (Díaz Rodríguez y coautores, 1998), y se caracterizan por tener propiedades mecánicas muy singulares que no están dentro de los patrones de comportamiento de la mayoría de suelos en el mundo. Debido a esta singularidad, existen correlaciones entre el hundimiento del terreno, el abastecimiento de agua potable, las inundaciones en zonas urbanas y el comportamiento edificios.

El acuífero superior de la cuenca de México tiene entre 600 y 700 metros de espesor, según reportes del ingeniero Roberto Gayol (1920), pionero en observar las consecuencias del hundimiento regional desde finales del siglo XIX y principios del XX. En 1925 fue el primero en documentar las primeras grietas en la ciudad, sugiriendo que una de las principales causas era el desagüe de la Ciudad de México, demostrando que la extracción desmedida del agua de los pozos artesianos y profundos, era responsable de los diversos hundimientos (Auvinet, 2011).

Sin embargo, fue hasta 1947, cuando el ingeniero Nabor Carrillo confirmó la hipótesis de Gayol, formalizando las investigaciones y recopilando datos de 2 215 bancos de nivel para diferentes periodos, distribuidos en toda la cuenca. Así, en la actualidad existen zonas de la ciudad donde la velocidad del hundimiento del terreno puede rebasar los 30 cm por año (figura 36), en tanto que en otras zonas

apenas llega a los 10 cm cada año (Legorreta y Coautores, 2005). Quizás el dato más impresionante de este fenómeno es el que se tiene registrado en el año de 1951, en el cual la ciudad se hundió en promedio 46 cm y fue entonces cuando se declaró la veda de los pozos ubicados en el centro de la Ciudad.

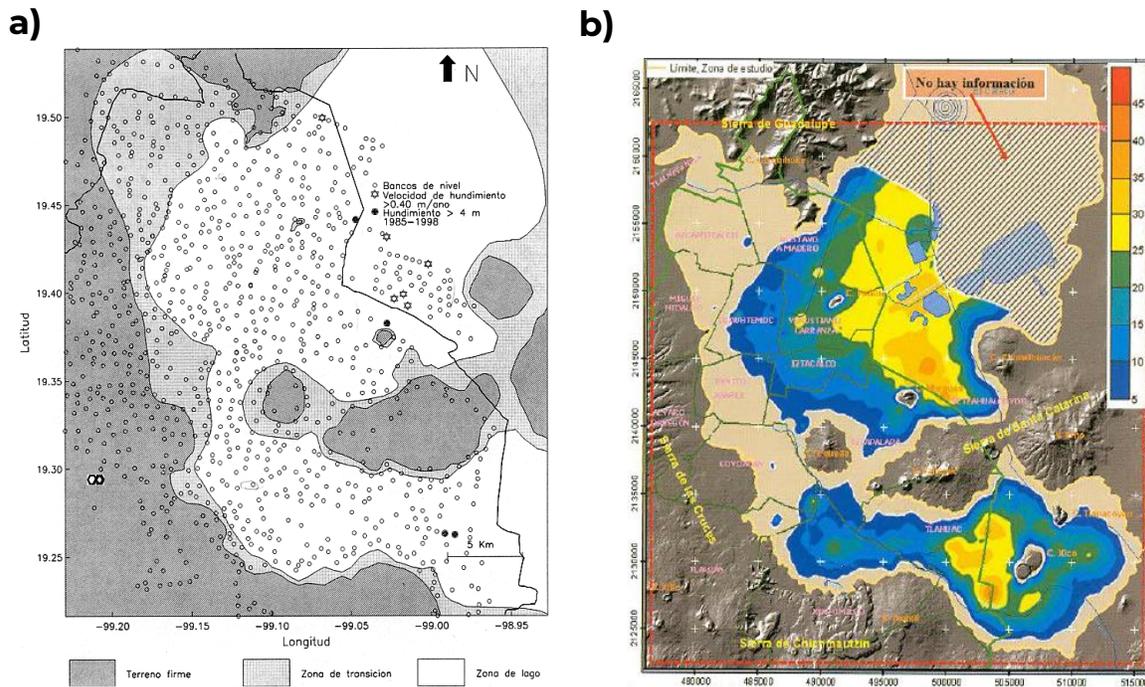


Figura 36. a) Bancos de nivelación (Aguilar 2003) y b) velocidad de subsidencia 2000-2005 (Auvinet, 2009)

La intensidad de las tasas de extracción de agua subterránea y la recarga del acuífero juegan un papel crucial en su evolución, control y minimización de riesgo (Figuerola y coautores, 2018). Con el propósito de actualizar el mapa de velocidades de hundimiento en la Cuenda de México, el CENAPRED elaboró un mapa del hundimiento de la Ciudad de México (figura 37), el cual muestra valores que van desde cero centímetros, representados en colores azules, hasta los 30.63 cm (máximo en rojo) por año. La alcaldía con un máximo de hundimiento al año es Iztapalapa y el municipio de mayor subsidencia es Nezahualcóyotl.



Hundimiento diferencial de la CDMX entre el 23-nov-2018 al 05-ene-2020

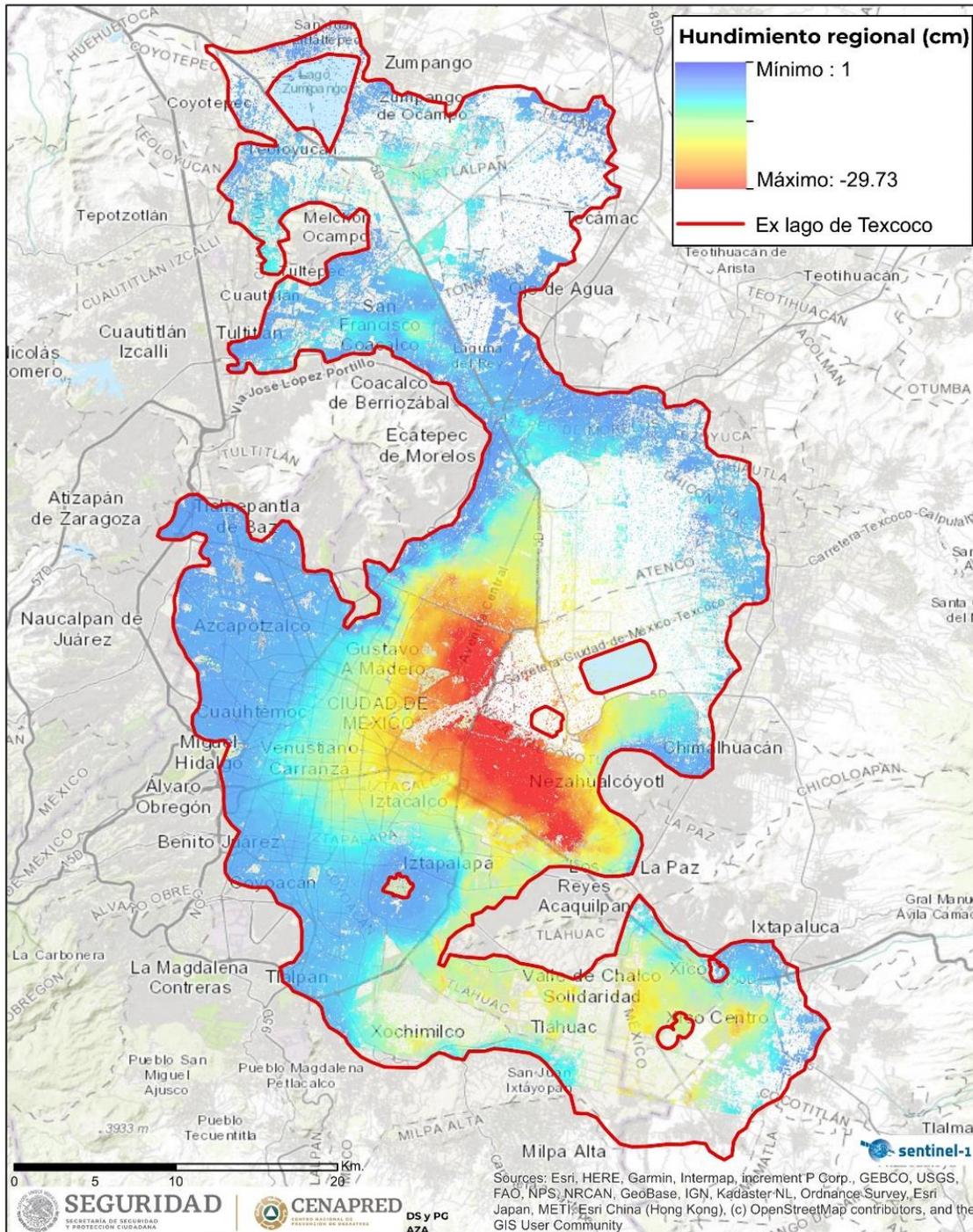


Figura 37. Hundimiento regional de la Ciudad de México (CENAPRED, 2020)



MEDIDAS PREVENTIVAS Y MONITOREO

En 1969 la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) y la UNESCO comenzaron una investigación que, después de 30 años, ha permitido recopilar y documentar las principales causas y la distribución espacio-temporal de los hundimientos en el mundo, demostrando que la ocurrencia de este fenómeno es más frecuente de lo que se pensaba, por lo que la prevención debe basarse en la identificación y análisis de todos aquellos procesos y factores que condicionan al fenómeno, permitiendo realizar acciones previsoras para el ordenamiento territorial y el desarrollo urbano.

Desde el punto de vista de la resistencia de materiales, los rangos de hundimiento son variables debido a que están condicionados por el espesor y las características geomecánicas de los sedimentos; sin embargo, todo tipo de suelos y rocas son propensos a deformarse y agrietarse, pero su magnitud y velocidad de ocurrencia dependen de diversos factores, como el grado de alteración (intemperismo), la consolidación del suelo y la permeabilidad, (ENAPROC, 2014).

En 2019, el CENAPRED determinó que de 1 964 375 km² que tiene la República Mexicana, únicamente el 0.96% cuenta con una alta propensión a presentar afectaciones por hundimiento y agrietamiento del terreno (tabla 2).

Tabla 2. Rangos de Afectación por hundimiento y agrietamiento del terreno

| Porcentaje | Km² | Rango de Afectación por hundimiento y agrietamiento |
|-------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| 53.06% | 1,042369.56 | MUY BAJO |
| 7.61% | 149 523.92 | BAJO |
| 32.18% | 632 156.87 | MEDIO |
| 6.21% | 122 045.05 | ALTO |
| 0.96% | 18 279.57 | MUY ALTO |



Algunos métodos de análisis del hundimiento y agrietamiento del terreno que se pueden implementar son:

1) Elaboración de cartografía

La cartografía de hundimientos es de carácter cuantitativa y se puede diferenciar en dos (González de Vallejo y coautores, 2002):

- Natural, derivados de procesos kársticos o suelos blandos, donde los mapas de susceptibilidad se basan en factores condicionantes que evalúen la potencialidad, propiedades geomecánicas de los materiales, factores hidrogeológicos y climáticos, considerando también, si es el caso, factores sísmicos.
- Antrópica, desencadenada por procesos en materiales no susceptibles a priori o acelerando las zonas con susceptibilidad. Estos mapas de susceptibilidad y peligro se realizan con base en la situación de actividades mineras o excavaciones de otro tipo que pueden ser causa de inestabilidades, debiendo considerar también las características mecánicas de los materiales y la influencia de las variaciones del nivel freático en su comportamiento.

Además es fundamental tener un inventario de casos documentados, con coordenadas geográficas y fotografías, para corroborar que la cartografía es adecuada.

2) Geología Estructural y Superficial

Se realiza una inspección geológica donde se analice el terreno con el objetivo fundamental de reconocer y evaluar rasgos superficiales que evidencien la presencia de procesos geológicos potencialmente peligrosos, en este caso erosión, hundimientos y agrietamientos; además se realizan estudios de mecánica de suelo, a fin de determinar sus condiciones de estabilidad; los



procedimientos y métodos para determinarlas deben ser revisadas tanto en campo como en el laboratorio, a fin de determinar la posición del nivel freático, el tipo de materiales y las propiedades mecánicas esfuerzo-deformación (bajo condiciones estáticas y dinámicas) de los estratos del subsuelo. González de Vallejo y coautores (2002), señala la necesidad del reconocimiento e identificación del tipo de litologías susceptibles a sufrir hundimientos o colapsos.

Por otra parte, la detección de cavidades subterráneas naturales puede resultar muy difícil según su tamaño y profundidad, los métodos más efectivos para identificarlas son los geofísicos, como los sondeos exploratorios (gravimetría, microgravimetría y el geo-radar), pero también se pueden realizar sondeos geotécnicos directos, como perforaciones a rotopercusión o sondeos de penetración estándar, que son menos costosos (González de Vallejo y coautores, 2002).

3) Exploración Geotécnica In situ

Un equipo versátil y económico que sirve para identificar capas de suelos y detectar posibles oquedades superficiales como las originadas por fugas de agua, excavaciones y lugares de difícil acceso (sótanos, interiores de viviendas, zonas con pendientes) es el Penetrómetro Dinámico Ligero de Energía Variable (PANDA por sus siglas en francés).

Se trata de un dispositivo mecánico-electrónico portátil que se utiliza para determinar la variación de la resistencia del suelo en función de la profundidad (figura 38).

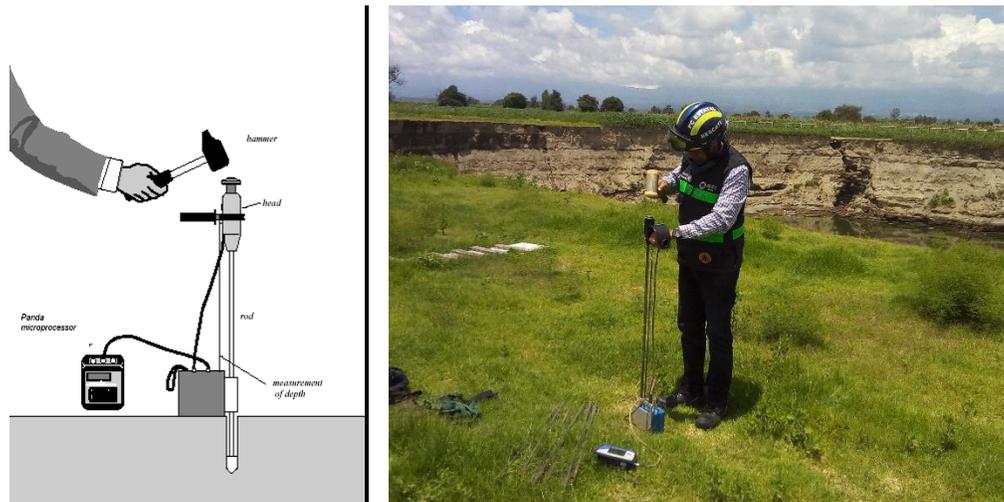


Figura 38. Esquema de la operación del Penetrómetro Dinámico de Energía Variable (PANDA)

El equipo está compuesto por barras de 50 cm de longitud, que se unen formando un tren de barras hasta llegar a una punta cónica, la cual se hincan en el terreno mediante golpes con un martillo sobre el cabezal eléctrico que registra centímetro a centímetro la resistencia del suelo. Los resultados obtenidos por este equipo sirven para obtener un diagnóstico rápido de zonas con problemas geotécnicos superficiales, y por su versatilidad es muy útil para el mapeo de zonas con suelos blandos y control de hundimientos.

Monitoreo

Algunos de los indicios que se pueden percibir al iniciarse un hundimiento son pequeños desniveles y agrietamientos en banquetas, calles y carreteras. En algunos casos también se han reportado ruidos y/o movimientos telúricos que finalizan con un colapso de la superficie del terreno. En las construcciones empiezan a aparecer pequeñas fisuras en muros, techos y cualquier elemento estructural. Generalmente, el deterioro de las edificaciones progresa al ritmo en que evoluciona el movimiento diferencial del subsuelo, pudiendo llegar hasta el colapso total si no se identifica claramente y se elimina la causa de los desplazamientos.



La subsidencia del orden de **1 mm por año** no exige tratamiento de urgencia, ya que genera daños ligeros en muros o de mayor tamaño, dependiendo si el proceso se estabiliza o no. Sin embargo, si son del orden de **10 o 12 mm por mes (2 o 3 mm por semana)**, implican una condición de riesgo más importante ya que el fenómeno evoluciona rápidamente, requiriendo una atención inmediata.

Para poder determinar si estos indicios evolucionan o abarcan grandes extensiones, se requiere de un monitoreo continuo de las grietas existentes, así como de la detección de nuevas, a fin de contar con elementos suficientes para la toma de decisiones, especialmente ante condiciones que puedan poner en riesgo la estabilidad de las estructuras y la seguridad de las personas que las habitan.

Adicionalmente se puede utilizar una red de piezometría, a fin de tener un mayor control para el análisis y seguimiento de la evolución cuantitativa de las masas de agua subterránea. Dicha piezometría permite conocer las variaciones del nivel freático. Con esta información se pueden hacer análisis a nivel cuantitativo, o bien, a nivel cualitativo mediante testigos de yeso en pisos o muros, para conocer si las grietas o fisuras siguen moviéndose. En la actualidad, la aplicación de la tecnología en el monitoreo remoto también ha permitido estudiar y analizar de una mejor manera el fenómeno:

1) Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT)

El empleo de estas aeronaves eleva sustancialmente el grado de eficiencia, mapeo y seguridad cuando se necesitan realizar misiones complejas, en áreas extensas (figura 39), ya que esta tecnología puede llenar algunos vacíos en los métodos de exploración, mejorando la resolución espacial y temporal de los sistemas de sensores remotos actuales.

Los VANT presentan varias ventajas, como realizar vuelos pre-programados, tener acceso a zonas de topografía complicada a baja altura y obtener



imágenes de alta resolución a muy bajo costo (Ojeda y coautores, 2017). La integración de imágenes con sensores de posición (Global Navigation Satellite System) posibilita georreferenciar directamente las capturas, y posteriormente, realizar Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Ortoimágenes (serie de imágenes), utilizados en la identificación de agrietamientos en el terreno (Bento, 2008).

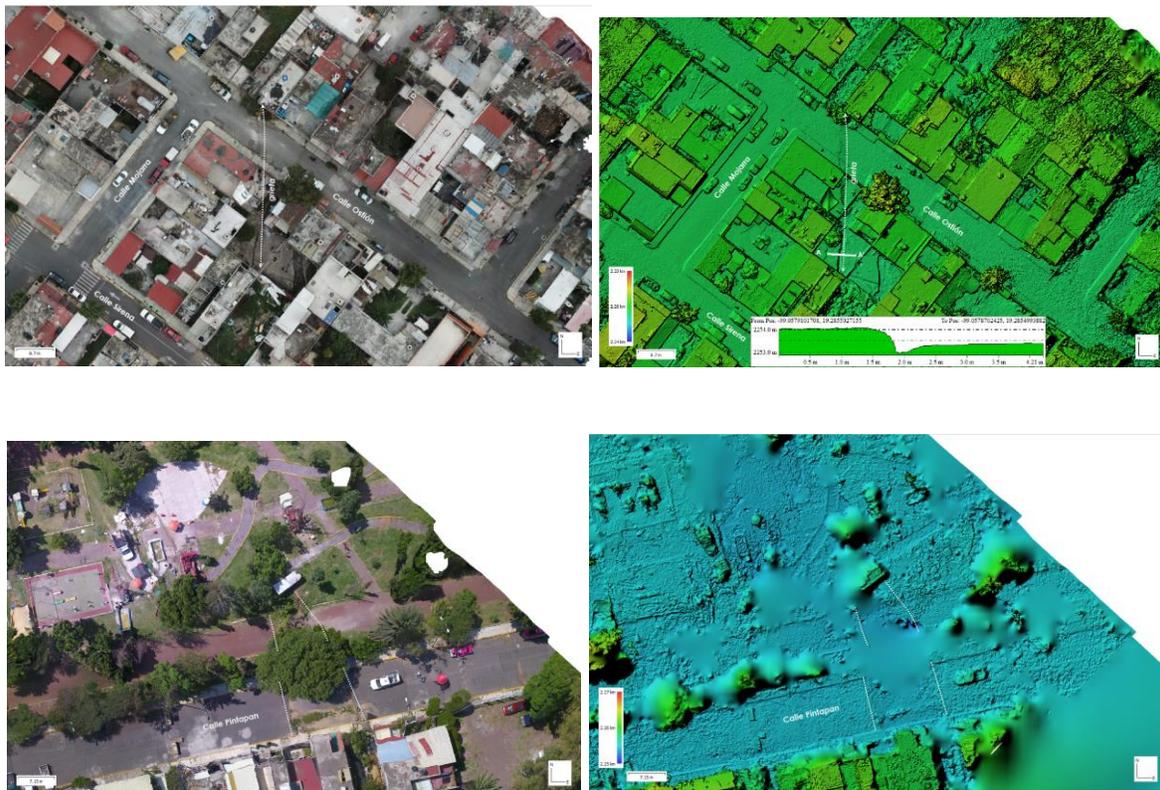


Figura 39. Ortoimagen (izquierda) y MDS (derecha) obtenidas en las alcaldías Tláhuac e Iztapalapa, base de datos CENAPRED, 2019-2020

2) Percepción Remota

En la actualidad, el uso de Geotecnologías ha ayudado a tener una mejor forma de recrear escenarios y obtener modelos basados en la teledetección, logrando posicionarse dentro de los análisis favoritos de la superficie terrestre, por lo que es una herramienta esencial en el estudio del hundimiento y agrietamiento de terreno.

En los últimos años, el CENAPRED (2020), ha implementado una de las técnicas más utilizadas para el análisis de hundimientos a través de imágenes de satélite de tipo SAR (Radar de Apertura Sintética), procesadas con la técnica de **Interferometría Diferencial** (InSAR). Con estos instrumentos y esta técnica es factible obtener información sobre el desplazamiento de la superficie del terreno (o de objetos ubicados sobre ésta, así como infraestructuras, edificios, árboles, entre otros) con un rango de movimiento que va desde milímetros hasta metros (figura 40), dependiendo de la resolución de los equipos.

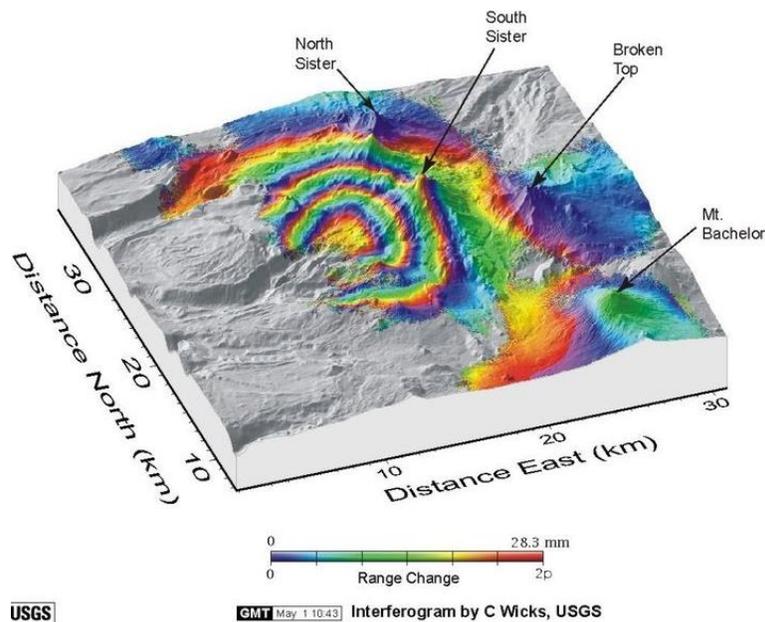


Figura 40. Aplicación de datos del mes: Mapeo de Deformación del Terreno Usando DInSAR, Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal (<https://www.un-spider.org/es/enlaces-y-recursos/fuentes-de-datos/daotm-mapeo-deformacion-dinsar>)

La técnica de InSAR estima el cambio de fase de la señal de radar, desde dos o más tomas simultáneas generadas por dos antenas, o en varias adquisiciones de la misma escena por la misma antena en distintos periodos de tiempo (Hanssen, 2001). El producto que se obtiene es un interferograma (figura 41), el cual se obtiene con la diferencia de fases de las dos imágenes que forman el par interferométrico (Lira, 2018).



Dentro de la imagen se puede visualizar una serie de colores o franjas, relacionadas con las zonas de mayor deformación debido al hundimiento regional, el desplazamiento y la zona de grietas. En estas últimas las franjas se concentran sobre las zonas con mayor acumulación de cambios en las deformaciones del terreno.

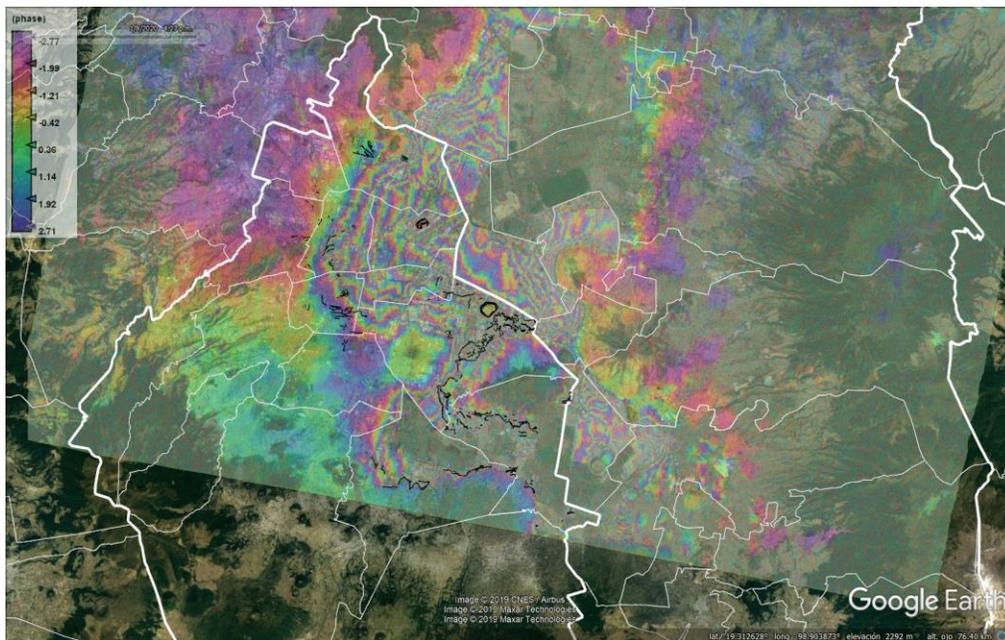


Figura 41. Interferogramas de la Ciudad de México sin y con la fase topográfica (CENAPRED, 2020)



CONCLUSIONES

Se trata de un fenómeno que cada vez afecta más zonas habitadas, por lo que se alerta a las instituciones de gobierno, a los cuerpos colegiados, a la sociedad y a las universidades, a fin de tomar acciones en este sentido. Es evidente que no sólo afectan a las construcciones, sino que también a los sistemas de drenaje y de abastecimiento de agua, así como a las líneas de conducción de gas y petróleo, las cuales resultan altamente peligrosas por el tipo de sustancias que conducen.

En tanto no se regulé la extracción de agua del subsuelo en el país, se deberá asumir la permanencia del hundimiento y la ocurrencia de más daños, por lo que es necesario que se consideren campañas o planes de mantenimiento, reparación o reforzamiento de las estructuras que llegaran a verse comprometidas o dañadas.

El hundimiento es un proceso difícil de revertir; sin embargo, algunos de los daños que se generan en las construcciones pueden sobrellevarse aplicando técnicas de reparación y reforzamiento estructural, por lo que la población debe aprender a convivir con el problema implementando sistemas flexibles de construcción, drenaje y agua potable, con el fin de evitar mayores afectaciones y pérdidas en sus viviendas o estilos de vida.

En lo que se refiere a los casos de hundimientos locales, especialmente por actividad minera y karst, se recomienda documentar cada caso en particular y establecer contacto con las autoridades de protección civil así como con los cuerpos colegiados, universidades e instituciones de educación superior para realizar estudios más detallados que permitan identificar la ubicación y dimensiones de los huecos o conductos que se forman antes del colapso de las cavidades.



GLOSARIO

Acuífero: formación geológica sitiada en el subsuelo en la zona denominada saturada, está constituido por una o más capas de rocas de extensión y espesor considerables, capaces de almacenar y permear agua subterránea. Esta agua puede ser extraída para su uso posee.

Agua subterránea: agua de lluvia que caen sobre la tierra y desciende lentamente, bajo la acción de la gravedad, hasta encontrar un acuífero. Puede variar según las condiciones meteorológicas, las tasas de explotación y las tasas de recarga.

Cohesión: cualidad de unirse o adherirse entre sí o a la materia que están formadas.

Compresibilidad: propiedad que produce la disminución significativa en el volumen de la materia al ser sometida a una presión o compresión constante.

Consolidación: propiedad de dar firmeza, seguridad, estabilidad y solidez a algo. Se denomina consolidación de un suelo a un proceso de reducción de volumen de suelos finos cohesivos (arcillas o limos plásticos), provocado por la actuación de cargas sobre su masa y que ocurre en el transcurso de un tiempo.

Esfuerzo cortante: el esfuerzo de corte, de cizalla o de cortadura es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas que soporta una estructura en el sentido perpendicular a su eje principal.

Esfuerzo normal: esfuerzo interno que soporta una estructura bajo carga axial resultante de las tensiones perpendiculares, es decir, cuando la carga a lo largo de su eje principal.

Esfuerzo de punzonamiento: esfuerzo de tensión (tensión tangencial) sobre un área de apoyo que puede fracturar una estructura.

Estrato: capas superpuestas de rocas, mineral o suelos con espesor más o menos uniforme.

Fractura: superficie de rotura de dos o más planos producida en la roca por separación bajo presión y tensión al interior del material sobrepasando su límite de resistencia específico.



Flujo subterráneo: se origina en el agua subterránea y fluye a velocidades variables, puede ser local, intermedio y regional.

Geoformas: o landform es una unidad de la superficie de la Tierra formada por procesos naturales de tal forma que puedan ser reconocidas y descritas por su topografía, drenaje, tamaño, volumen, textura o vegetación natural.

Geotecnia: rama de la geología que estudia las características y el comportamiento de los suelos, como material de construcción o como soporte para la construcción en ingeniería; aplicando los principios de la mecánica, la física, las matemáticas y la resistencia de materiales, para definir las características de resistencia y de deformación del subsuelo, así como otras características físicas que influyen en su comportamiento.

Gradiente hidráulico: representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud. Deriva de la altura total de energía respecto a la distancia recorrida por el agua a lo largo de una línea de corriente.

Mantos profundos: son estratos permeables compuestos por grava, arena o piedra porosa que permite la circulación y almacenamiento del agua subterránea.

Medio geológico: comprende todos los procesos, rápidos o lentos, al interior o el exterior del planeta.

Nivel freático: nivel superior del agua en un acuífero. Puede medirse mediante una perforación en el subsuelo.

Nivel piezométrico: nivel superior del nivel freático respecto al nivel del mar o la altura que alcanzaría al interior del acuífero hasta igualarse a la presión atmosférica.

Permeabilidad: capacidad que tiene el suelo o la roca de transmitir agua y/o aire sin alterar su composición.

Porosidad: fracción volumétrica de poros (espacios vacíos) en superficie o estructura interna de la materia. Se asocia con la densidad del material y el origen de sus compuestos.

Presión hidrostática: presión que se somete un cuerpo sumergido en un fluido.



Roca: agregado de uno o varios minerales cohesionados cohesionados, con propiedades físicas y químicas definidas, agrupados de forma volcánica o tectónica en estratos.

Roca basal: roca madre, macizo rocoso u horizonte R, el estrato consolidado primario que da origen al suelo.

Tensión capilar: o tensión superficial es una propiedad de los líquidos, por la cual parecen mantener una membrana elástica en estado de tensión.

Valle aluvial: también conocidos como valle fluvial o de inundación, sus características dependen de la orografía y el caudal.



BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, H R, M Galicia, L E Pérez-Rocha, J Avilés, L Vieitez y M Salazar, (2003). Boston, Efecto del hundimiento regional en las propiedades dinámicas del suelo. XII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.

Auvinet G. (2008). Agrietamiento de suelos. Memorias, XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos. Los nuevos retos de la Ingeniería Geotécnica en el Siglo XXI, volumen especial, Aguascalientes, México, pp. 299-313.

Auvinet G. y Juárez M. (2009). Ingeniería geotécnica en zonas urbanas afectadas por hundimiento regional. México, Volumen preparado por el Comité Técnico #36 de la ISSMGE. Instituto de Ingeniería / Universidad Nacional Autónoma de México / Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos.

Auvinet G. Y. (2011). El ingeniero Roberto Gayol y Soto y el hundimiento de la Ciudad de México. México, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. 222: pp. 8-12.

Benet Solé A., Alvera B., Puig de Fábregas J. (2011). Asociación entre actividades de la fauna y tubificación (piping) en condiciones climáticas y edáficas contrastadas. Cuadernos de Investigación Geográfica, No. 37 (1), Universidad de La Rioja, pp. 79-98.

Bento N. María de Fátima. (2008). Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. Inside GNSS 54, January/February, pp. 54-61. [<http://tinyurl.com/d8wo2kn>].

Centro Nacional de Prevención de Desastres (2017a). Declaratoria de Corroboración sobre la existencia de fenómeno natural perturbador hundimiento, acaecido el 30 de abril en el municipio de Lerdo, Durango.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (2017b). Declaratoria de Corroboración sobre la existencia de fenómeno natural perturbador hundimiento, acaecido el 30 de abril en el municipio de Gómez Palacio, Durango.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (2020). Estimación del hundimiento diferencial del terreno utilizando la técnica double-pass para la GIRD en la ciudad de México. Programa Anual. Ciudad de México.

Carreón Freyre Dora C., Hidalgo Moreno Claudia M., Hernández Marín Martín (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Número Especial de Geología Urbana, Vol. 58, Núm. 2, pp. 237- 250.

Carreón Freyre Dora Celia (2011). Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal. Al México, INGENIERÍA GEOLÓGICA, pp. 1-52.

De Pedraza Gilsanz Javier (1996). Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones. Madrid, Editorial Rueda S. L. pp. 329-336.



Díaz Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E. y Girón, P. (1998). Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City: a geotechnical perspective, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 600-610.

Escuela Nacional de Protección Civil (2014). Asignatura: Fenómenos Naturales II: Geológicos. Curso Técnico Básico en Gestión Integral del Riesgo.

Espinasa Pereña Ramón (2007). El Karst de México, Mapa NA III 3. Nuevo Atlas Nacional de México, Coll-Hurtado, A., Coord., Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Figuroa Miranda Sócrates, Tuxpan Vargas José, Ramos Leal José Alfredo, Hernández Madrigal Víctor Manuel, Villaseñor Reyes Cecilia Irene (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology* 246, pp. 91-106.

González de Vallejo Luis I., Ferrer Mercedes, Ortuño Luis, Oteo Carlos (2002) *Ingeniería Geológica*, PEARSON EDUCACIÓN, Madrid, BBN: 84-205-3104-9.

Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry. Data interpretation and error analysis*; Kluwer Academic Publishers. New York. 298 pp.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2022). Agua y Desarrollo Económico en Zonas Cársticas, Núm. 14, 24 de abril. [<https://www.gob.mx/imta/es/articulos/agua-y-desarrollo-economico-en-zonas-carsticas?idiom=es>].

Jachens Robert y Holzer Thomas (1982) Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona. *GSA Bulletin*, 93 (10): 998-1012. U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Road, Mento Park, California 9402.

Kargbo David M., Wilhelm Ron G. y Campbell David J. (2010) Natural Gas Plays in the Marcellus Shale: Challenges and Potential Opportunities. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 44, 15, 5679-5684.

Legorreta J., Contreras C., Flores M. A. y Jiménez N. (2005). Los pozos y sus efectos: El hundimiento de la ciudad. Biblioteca temática del Agua, Centro Virtual de Información del Agua.

Lira Chávez Jorge (2018). Tratamiento digital de imágenes multispectrales. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. 605 pp.

Lugo Hubp José (2011). *Diccionario Geomorfológico. Geografía para el Siglo XXI. Serie: Textos Universitarios*. Instituto de Geografía, UNAM.

Marker Brian R. (2013). Land Subsidence. *Encyclopedia of Natural Hazards*. Editor Peter T. Bobrowsky, pp. 583-590. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_208].

Marsal R. J., Mazari M. (1969). El subsuelo de la Ciudad de México. Instituto de Ingeniería México/ Universidad Nacional Autónoma de México.



Martin del Pozzo, A. L., Espinoza R., Barba L. y López, J. (1997). Volcanic Impact in Central México. General Assembly, Field Guide, Puerto Vallarta, Jalisco, pp. 19-24.

Mendoza Manuel, Rivera Darío y Domínguez Leobardo (2009), El fenómeno de asentamiento regional y agrietamiento del terreno. Subdirección de Estructuras y Geotecnia. Dirección de Investigación. CENAPRED.

Missouri Geological Survey. Desarrollo de Dolinas, tomado del, Departamento de Recursos Naturales del estado de Missouri, [<https://dnr.mo.gov/geology/geosrv/envgeo/sinkholes.htm>].

Mora P. Lucy, Bonifaz Roberto y López-Martínez Rafael (2016). Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 68, No. 3, pp. 377–394.

Ojeda Bustamante¹ Waldo, González Sánchez Alberto, Mauricio Pérez Azucelli y Flores Velázquez Jorge (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola¹. Tecnología y ciencias del agua vol.8, no.4 Jiutepec jul./ago. Versión On-line ISSN 2007-2422

Rodríguez Castillo Ramiro y Rodríguez Velázquez Isaías (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geofísica, Número Especial de Geología Urbana, tomo LVIII, núm. 2, UNAM, México, pp. 265-269.

Soriano María Asunción (2013). Sinkhole. Encyclopedia of Natural Hazards. Editor Peter T. Bobrowsky, pp.912-.913. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4399-4_321].

Terzaghi V. K. (1943) Theoretical Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.

Tomás Roberto, Herrera Gerardo Delgado, José y Peña Fernando (2009). Subsidencia del Terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17.3, pp. 295-302.

Vera Pérez Mónica y López Blanco Jorge (2010). Evaluación de amenazas por inundaciones en el centro de México: el caso de Iztapalapa, Distrito Federal (1998–2005). Geografía física. Investigación. Geográfica, no.73, Ciudad de México. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112010000300003].