

Anexo 2

I. Nombre del Proyecto de Investigación

Análisis de vulnerabilidad física a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento en la Ciudad de México

II. Requisitos de elegibilidad técnicos y administrativos

a) Elegibilidad técnica:

Durante el desarrollo del proyecto se llevará a cabo el análisis de la vulnerabilidad natural del medio geológico a la deformación vertical y horizontal que pueden causar afectación a la infraestructura urbana y degradación de la calidad de vida de los habitantes de la Ciudad de México (CDMX). Se realizará la cartografía de las fallas, fracturas y grietas principales, así como de las principales unidades geológicas y geomorfológicas en el área de estudio. El estudio de la deformación de la superficie del terreno se complementará con percepción remota. El análisis de los resultados obtenidos permitirá establecer modelos conceptuales de deformación para diferentes zonas de la CDMX e identificar los sitios de deformación crítica que requieren un estudio de mayor detalle. Se pretende entonces establecer un índice general de vulnerabilidad física al fracturamiento que permita hacer una estimación confiable de la afectación ante el peligro geológico de subsidencia o hundimiento. Algunos de estos sitios serán estudiados con mayor detalle y se utilizarán métodos indirectos de prospección geofísica para identificar los mecanismos de deformación para condiciones específicas. Los estudios de mayor detalle permitirán establecer índices complementarios de vulnerabilidad para lograr una estimación realista del riesgo geológico asociado a estos fenómenos. Durante la etapa final del proyecto se realizará un modelo numérico de la deformación para cuantificar los órdenes de magnitud de esfuerzo y desplazamiento de los materiales del subsuelo cuando es sometido a: (1) cargas estáticas debidas a la carga litostática o de estructuras urbanas, (2) cargas dinámicas asociadas al tráfico vehicular o a la actividad sísmica y (3) al incremento de esfuerzo efectivo asociado al abatimiento de niveles piezométricos.

El producto final del proyecto estará constituido por un sistema de información geográfica (SIG) con la base de datos recopilada, la cartografía y otros datos generados durante el desarrollo del Proyecto. Mediante este SIG se podrá hacer la estimación de los índices generales de vulnerabilidad física al fracturamiento en distintas zonas de la CDMX y de índices específicos en zonas de deformación crítica, cuando se cuente con la información de detalle adecuada. De igual manera se pretende integrar el análisis de vulnerabilidad social a nivel AGEB para identificar las zonas de mayor riesgo geológico y de menor resiliencia a estos fenómenos.

[Handwritten signatures and initials in blue and green ink]

Estos resultados serán de gran utilidad para el Sistema Nacional de Protección Civil para la evaluación y mitigación de los problemas de subsidencia, hundimiento y agrietamiento que afectan gran parte del territorio de la CDMX. Cabe remarcar que la ejecución de este proyecto contribuye a mejorar el conocimiento de uno de los problemas persistentes a nivel nacional (estos fenómenos afectan a la mayor parte de las capitales del centro del país, Carreon-Freyre et al., 2010) y que pueden agravarse ante el crecimiento de zonas urbanizadas, el cambio climático y el incremento en la extracción de agua subterránea.

b) Elegibilidad administrativa:

Conforme a lo señalado en el oficio de solicitud, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), como instancia técnica-científica de la Coordinación Nacional de Protección Civil se encuentra plenamente acreditado e identificado ante los órganos decisorios del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) y su representante legal cuenta con las atribuciones necesarias a fin de garantizar la adecuada ejecución del mismo.

El objetivo del Proyecto de Investigación se apega a lo establecido en la fracción I del artículo 48 de las ROFOPREDEN, el cual señala que la Subcuenta proporcionará financiamiento para *“Estudios o investigaciones orientados a generar y mejorar el conocimiento sobre los Fenómenos Naturales Perturbadores”*.

III. Monto del financiamiento con cargo a la Subcuenta de Investigación del FOPREDEN

\$5,850,000.00 (Cinco millones ochocientos cincuenta mil pesos, m.n.)

IV. Términos de referencia del Proyecto de Investigación:

a) Objetivo General del Proyecto de Investigación

Llevar a cabo el análisis de la vulnerabilidad del medio físico a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento del subsuelo en el territorio de la Ciudad de México, e identificar los sitios críticos con mayor probabilidad de afectación asociada a estos fenómenos. De igual manera se pretende realizar una evaluación de la vulnerabilidad social, definida por la afectación de la deformación diferencial del subsuelo en zonas socio-económicamente marginales que presentan una baja capacidad de resiliencia.

b) Objetivos Específicos del Proyecto de Investigación

Para lograr el objetivo, se realizarán los siguientes pasos:

1. Procesos administrativos

Revisión, preparación y suscripción de instrumentos jurídicos que se requieran.

2. Diagnóstico

2.1. Análisis de antecedentes de la problemática de subsidencia y fracturamiento asociado.

2.2. Recopilación de datos de subsidencia en la CDMX.

3. Diseño de un Sistema de Información Geográfico.

3.1. Adquisición y recopilación de información bibliográfica y bases de datos geográficos.

3.2. Estandarización de bases de datos.

3.3. Elaboración de cartografía digital e impresa.

4. Cartografía del fracturamiento y agrietamiento

4.1. Identificación y georeferenciación de los sistemas de fracturamiento.

4.2. Análisis de la distribución espacial del fracturamiento.

5. Estudios geofísicos de alta resolución en sitios de deformación crítica.

5.1. Adquisición y procesamiento de datos de Radar de Penetración Terrestre (RPT).

5.2. Adquisición y procesamiento de datos de propagación de ondas sísmicas superficiales (MASW).

5.3. Integración de datos geofísicos y topográficos.

6. Análisis de Vulnerabilidad

6.1. Estimación de la vulnerabilidad del medio físico al fracturamiento. Establecimiento de Índices Generales de Vulnerabilidad Física (IGVF).

6.2. Estimación de la vulnerabilidad social a nivel AGEB.

6.3. Análisis de la vulnerabilidad social al fracturamiento.

7. Preparación del Informe Final

7.1. Modelo numérico de la deformación bajo diferentes condiciones de esfuerzo.

7.2. Implementación de la base de datos en el Sistema de Información Geográfica.

7.3. Elaboración del mapa de vulnerabilidad física al fracturamiento del territorio de la Ciudad de México.

7.4. Integración de conclusiones principales, análisis de resultados y recomendaciones.

c) Descripción detallada del escenario de peligro, vulnerabilidad y/o riesgo que se debe estudiar o resolver, a través de la ejecución del Proyecto de Investigación

Gran parte de la Ciudad de México se encuentra asentada sobre un subsuelo constituido por depósitos volcánicos de distinto origen y secuencias fluvio-lacustres. En varias zonas estos materiales se encuentran interdigitados debido a la contemporaneidad de diversos eventos volcánicos y del depósito de materiales de relleno lacustre limo-arcilloso altamente compresible. Debido a esto, el subsuelo de la CDMX ha experimentado una deformación gradual generalizada principalmente vertical, a este fenómeno se le conoce como subsidencia cuando es generalizado o hundimiento cuando es localizado. Actualmente se tienen registrados valores de deformación vertical entre 0 y 40 cm/año en la zona nororiental de la CDMX. La creciente deformación asociada a la alta heterogeneidad de los materiales de relleno de la Cuenca de México da origen a desplazamientos diferenciales que generan distintos tipos de fracturamiento en el subsuelo y que pueden aflorar en superficie como grietas de tensión, de ahí que también se conoce a este fenómeno como "agrietamiento". Cabe remarcar que los materiales del subsuelo naturalmente vulnerables a la subsidencia, hundimiento y fracturamiento son además sometidos a factores que detonan o acentúan la localización de la deformación, como son la sismicidad característica de la zona y las cargas estáticas y dinámicas debidas a la infraestructura urbana.

Evaluación de la vulnerabilidad física del medio geológico a la subsidencia

Los fenómenos de subsidencia, hundimiento y agrietamiento afectan de manera directa, persistente e irreversiblemente la estructura de inmuebles, el funcionamiento de redes de servicios básicos (agua potable, drenaje, líneas de gas natural y electricidad) y la infraestructura de transporte. Esto repercute en el gasto público y familiar debido al mantenimiento y la reparación constante de la infraestructura afectada.

La distribución espacial del fracturamiento es determinada por zonas de vulnerabilidad natural del medio físico y además de la vulnerabilidad social que conlleva, donde la población se encuentra expuesta a distintos niveles de intensidad de deformación. Esto incide en un deterioro del entorno físico y urbano, ocasionando una disminución en la calidad de vida de las personas. Diversos estudios de caso en el país muestran que este es un problema generalizado que afecta principalmente a la zona central en donde se concentran la mayor parte de la población urbana (Carreon Freyre et al., 2010) (Figura 1). La creciente demanda de agua asociada a la urbanización, la industrialización y el crecimiento de la agroindustria son otros factores que contribuyen al riesgo de subsidencia y fracturamiento asociado. Un ejemplo de la afectación paulatina de esta la deformación a casas habitación e infraestructura urbana se muestra en la secuencia fotográfica de la Figura 2.

Se debe agregar además que el fenómeno de agrietamiento del subsuelo es dinámico, es decir, con el paso del tiempo aparecen nuevas grietas o se reactivan las ya existentes provocando importantes cambios en las condiciones iniciales mecánicas, por lo que su estudio requiere una caracterización sistemática en el tiempo y en el espacio.

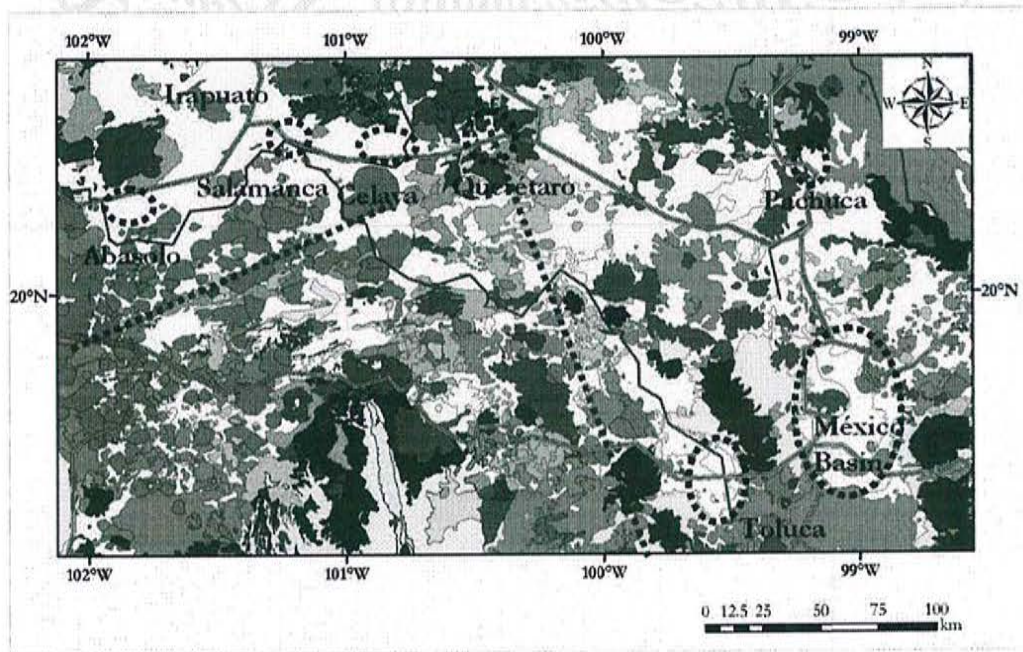


Figura 1. Zonas principales afectadas por subsidencia y fracturamiento en el centro de México (cuencas continentales dentro de las estructuras de la Faja Volcánica Transmexicana). (Modificado de Ferrari et al., 2000).

Los efectos de la Subsistencia del Terreno y Fracturamiento del Subsuelo
Calle Pedro Aceves Colonia San Sebastián Tecolotlán Delegación Iztapalapa



2008



2009



2011



2013

Figura 2. Afectación paulatina y persistente de la deformación a casas habitación e infraestructura urbana en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México.

Mediante el desarrollo de este proyecto se llevará a cabo:

- 1) Integración de estudios de cartografía de agrietamiento, topografía y geofísica (Radar de Penetración Terrestre y Sísmica de Ondas Superficiales) para evaluar las condiciones geológicas del subsuelo.
- 2) Investigaciones orientadas al diagnóstico, evaluación, modelación y reducción de la vulnerabilidad física y social, y de las capacidades de resiliencia de la población frente a fenómenos naturales perturbadores del tipo geológico. Se determinará la vulnerabilidad del medio físico, de acuerdo a las características del agrietamiento y se evaluarán las condiciones de vulnerabilidad social a partir de la correlación de variables censales. Se integrarán ambos indicadores para generar un índice final, con el que se estimen los distintos niveles de vulnerabilidad social al agrietamiento en la CDMX.

[Handwritten signatures and initials in blue and green ink, including a large signature and the word 'CO' in green.]

Referencias

Como antecedente de la metodología utilizada en este proyecto se han publicado los siguientes trabajos:

1. Carreón Freyre, D., Gutiérrez Calderón, R., González Hernández Cerca Martínez, M. Zacarias Ramírez, S., 2014. Capítulo 4. Subsistencia - Una amenaza de origen natural y antropogénica poco conocida - ejemplos de México. Ed. Theofilos Toulkeridis. Amenazas de origen natural y Gestión de Riesgo en el Ecuador. Tomo I. Algunos Elementos fundamentales en el Manejo de Reducción de Riesgo de Desastres. Publicado por el Centro de Geología, Volcanología y Geodinámica (CGVG) y la ESPE, Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador. pp. 107-115.
2. Centeno-Salas F., Carreón-Freyre, D., Flores-García W., Gutiérrez-Calderón R., 2014. Multiresolution analysis based on Mallat pyramidal algorithm applied to GPR data. Proc. of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. IEEE Xplore Digital Library. Editors: Sébastien Lambot, Antonis Giannopoulos, Lara Pajewski, Frédéric André, Evert Slob, and Christophe Craeye. IEEE Conference Record Number: 35163. ISBN: 978-1-4799-6789-6. IEEE Part Number: CFP14538-ART. pp. 666-669 Radar. Bruxelles, Belgium.
3. Gutiérrez-Calderón, R.I. Carreón-Freyre, D., Cerca M., Blancas D., Morales G., Jiménez A, González M., Espinoza F., 2011. Centro de Evaluación de Riesgo Geológico de la Delegación Iztapalapa, Ciudad de México. Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Toronto, Canadá.
4. Carreón Freyre, D., Cerca Martínez, M., Solís Valdez, S., Vega González, M., Millán Malo, B., González Hernández, M., Flores Castrellón, O., Gutiérrez Calderón, R. y , 2012. Análisis geomecánico de los sedimentos lacustres de la Delegación Iztapalapa, México D.F. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo. México. 10 p.
5. Gutiérrez Calderón, R., Carreón Freyre, D., González Hernández, M., Cerca Martínez, M., Jiménez Sánchez, A., López Quiroz, P., M., Blancas Domínguez, D., 2012. Zonificación geotécnica de la Delegación Iztapalapa, México D.F. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo. México. 6 p.
6. Cerca Martínez, M., Carreón Freyre, D., López Quiroz, P., Gutiérrez Calderón, R. y González Hernández, M., 2012. Ingeniería geológica en zonas de fracturamiento en valles volcánicos. Memorias de la XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Cancún, Quintana Roo. México. 2 p.

7. Carreón Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez Calderón, R., Huerta Ladrón de Guevara, M., 2010. Monitoring of land subsidence and fracturing in Iztapalapa, Mexico City. En Carreón Freyre, D., Cerca, M. and Galloway, D.L. (eds.), Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development (Proceedings of EISOLS 2010, Querétaro, México). Red Book Series Publication 339, IAHS Press, CEH Wallingford. UK. ISBN 978-1-907161-12-4. ISSN 0144-7815. pp. 44-50.

Descripción de la vulnerabilidad de la población e infraestructura expuesta

A la fecha ocho delegaciones de la Ciudad de México han reportado problemas de subsidencia, hundimiento y agrietamiento del terreno: Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac, Venustiano Carranza y Xochimilco. Sin embargo otras zonas de la ciudad también presentan un alto peligro asociado a estos fenómenos debido a que se ubican en zonas de fallas estructurales, cavidades y/o contactos litológicos que pueden constituir planos naturales de debilidad. La propagación de las grietas y cavidades se incrementa cuando los desplazamientos verticales causan la ruptura de tuberías de circulación de agua potable y drenaje en zonas de materiales granulares no cohesivos como arenas y cenizas volcánicas y dan origen a zonas de colapso de tamaño variable. Este tipo de colapso es de los más frecuentes en zonas de agrietamiento, como es el caso ocurrido el 7 de Julio del 2007 en la Colonia Lomas de San Lorenzo de la Delegación Iztapalapa en donde una fractura de 50 m de longitud en superficie y con una profundidad mayor a 15 m, provocó la primera muerte de una persona relacionada con estos fenómenos en el país.

Es sabido que los desastres causados por fenómenos naturales, tales como la subsidencia y el fracturamiento en su fase más crítica, constituyen detonadores de situaciones sociales y económicas preexistentes. Estos fenómenos avanzan lenta pero persistente y paulatinamente generando conflictos de uso de suelo y recursos hídricos que generalmente aparecen hasta que hay un abatimiento importante del agua subterránea.

Actividades a desarrollar durante el proyecto:

1. Procesos administrativos para el ejercicio del recurso

Actividades de revisión de documentación, actividades y firma de convenio de acuerdo al protocolo administrativo de cada institución.

2. Diagnóstico

Handwritten signatures and initials in blue and green ink, including a large 'y' and 'I'.

Se recopilara la información sobre las condiciones geológicas y su relación con problemas de hundimiento, subsidencia y agrietamiento de la Ciudad de México. Así mismo se compilara datos históricos de afectaciones tanto en la infraestructura como equipamiento urbano.

3. Diseño del Sistema de Información Geográfica

Re-estructuración y estandarización de datos digitales obtenidos del INEGI: LiDAR, ortofotos y datos vectoriales, Información geológica del SGM y publicaciones, además de datos obtenidos de la CONAPO. De este modo se generará la cartografía base en formato digital e impreso a distintas escalas. Estas permitirán la creación de modelos morfológicos de detalle para la identificación de las zonas de fracturamiento en las distintas delegaciones, así como los posibles daños a viviendas, infraestructura y equipamiento urbano.

4. Cartografía del fracturamiento y agrietamiento

La cartografía es prioritaria en el trabajo de campo para la identificación de los sistemas principales de fracturamiento que afectan a la CDMX. La escala de trabajo para la adquisición de datos será de 1:10,000 y los formatos finales serán impreso y digital. A partir de la identificación de los sistemas de fracturamiento de cada zona y su asociación con posibles lineamientos estructurales se obtendrá su geometría y distribución espacial; posteriormente se geo-referenciará en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Finalmente se llevará a cabo el análisis de la distribución espacial de fracturas, fallas y grietas.

5. Estudios geofísicos de alta resolución en sitios selectos de deformación crítica

Se realizarán estudios puntuales de geofísica de alta resolución, aplicando los métodos de Radar de Penetración Terrestre (RPT) y métodos de propagación de ondas sísmicas superficiales (MASW) con ajuste topográfico. Estas técnicas se utilizaran para investigar la estructura del subsuelo y entender las condiciones de propagación de la deformación del terreno y del agrietamiento del subsuelo.

6. Análisis de Vulnerabilidad

Estimación de la vulnerabilidad del medio físico al fracturamiento. Mediante la generación de información topográfica, geológica, geofísica y geográfica, se realizará una matriz de datos de manera semi-cuantitativa. Esta matriz permitirá la aplicación de algebra de mapas para la propuesta de un Índice General de Vulnerabilidad Física al Fracturamiento (IGVF) y la identificación espacial de las zonas vulnerables. Dichas zonas serán prioritarias para la proponer medidas de mitigación de la problemática para la disminución del riesgo.

Estimación de la vulnerabilidad Social. Se integrará la cartografía de los sistemas de agrietamiento y afectación identificados. Al obtener las zonas vulnerables al agrietamiento y asociarlas con la marginación urbana a nivel AGEB (información obtenida de la CONAPO con datos de 2010), se obtendrá la Vulnerabilidad Social al Agrietamiento (VSA) de la Ciudad de México, es decir, se tendrán identificados los AGEB's con la población más expuesta a ser afectada por este fenómeno.

7. Elaboración del Informe Final

Se llevará a cabo la integración, análisis e interpretación de los resultados obtenidos para llevar a cabo una zonificación de la vulnerabilidad física y social del territorio de la Ciudad de México a los fenómenos de subsidencia y hundimiento y agrietamiento, mediante los índices propuestos. Se propondrán algunos modelos conceptuales de deformación y se llevara a cabo un primer ejercicio de modelado numérico de la deformación para identificar y cuantificar los factores de formación y propagación para un caso de estudio específica. Finalmente se presentara la aplicación de los índices propuestos para evaluar la vulnerabilidad a estos fenómenos por medio del un Sistema de Información Geográfica y proponer medidas de mitigación.

d) Características de los entregables que se espera obtener como resultado de la ejecución del Proyecto de Investigación

Se entregara un reporte impreso y electrónico de las actividades desarrolladas durante el proyecto con entrega de reportes parciales de avance cada 3 meses. Al finalizar el proyecto se entregara de igual manera la base de datos generada y el Sistema de Información Geográfica implementado para la estimación de índices de vulnerabilidad. El Informe Final incluye el análisis de resultados obtenidos, la cartografía realizada, el modelo conceptual, el modelo numérico de deformación, el mapa de vulnerabilidad física al fracturamiento de la CDMX y recomendaciones generales para la estimación del riesgo geológico asociado.

e) Forma y medio en que deberán ser entregados los resultados del Proyecto de Investigación

Todos los entregables serán presentados en medios digitales, a fin de facilitar su análisis y procesamiento.

f) Plazo máximo para el desarrollo del Proyecto de Investigación;

18 meses, en función de la fecha de inicio del Proyecto de Investigación.

g) Programa de la ejecución del gasto del Proyecto de Investigación

Se adjunta Programa de Actividades, Plazos y Costos.

h) Calendario de entrega de reportes trimestrales

A más tardar el último día hábil de los meses 3, 6, 9, 12, 15 y 18, en función de la fecha de inicio del Proyecto de Investigación.

i) Criterios considerados para la evaluación del Proyecto de Investigación

1. Integralidad, coherencia y pertinencia de la información analizada.
2. Cobertura geográfica acorde con las necesidades de la CDMX
3. Precisión de los datos de estudio de detalle en los sitios selectos de deformación crítica.
4. Compatibilidad de la información entregada con la plataforma del SIG del CENAPRED.