

Avances sobre el fenómeno del agrietamiento del suelo en el Valle de México

Advances on the phenomenon of soil cracking in the Valley of Mexico.

Gabriel Auvinet Guichard, Edgar Méndez Sánchez, Moisés Juárez Camarena, Daniel Hernández Andrade
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México, GAuvinetG@iingen.unam.mx

RESUMEN: Este trabajo presenta un panorama general de los avances logrados en el estudio del fenómeno de agrietamiento del suelo en el Valle de México. Se realizaron numerosos levantamientos físicos *in situ* y se logró el posicionamiento satelital e indirecto de más de cuatro mil sitios con presencia de grieta, que fueron gestionados con las herramientas de análisis espacial que ofrecen los Sistemas de Información Geográfica. La consolidación y automatización del acervo fotográfico de grietas es otro de los logros que se presentan. Otro alcance se refiere al establecimiento de una primera propuesta de zonificación de los agrietamientos en función de su mecanismo de generación y propagación. Se presenta por otra parte algunos comentarios sobre la relación entre agrietamiento y fallas geológicas. Antes de presentar las conclusiones y las referencias, se describe algunos ejemplos de medidas de mitigación y control de los efectos indeseables de las grietas tanto en las edificaciones en general como en las líneas vitales alojadas en el territorio del Valle de México.

ABSTRACT: This work presents an overview of the progress achieved with respect to the problem of soil cracking in the Valley of Mexico. Continuous *in situ* physical surveys have been performed as well as satellite and indirect positioning of more than four thousand sites with the presence of cracks, which were managed with the spatial analysis tools offered by the Geographic Information Systems. The consolidation and automation of the photographic collection of cracks is another of the achievements presented. Another scope refers to the establishment of a first proposal for the zoning of cracks according to their generation-propagation mechanism. The relationship between cracking and geological faults is also examined. Before presenting the conclusions and references, some examples of mitigation and control measures of the undesirable effects of cracks in buildings in general as well as in the lifelines located in the territory of the Valley of Mexico are described.

KEYWORDS: Agrietamiento, Valle de México, Subsistencia, Zonificación.

1 INTRODUCCIÓN

El fenómeno del agrietamiento del suelo constituye un innegable factor de riesgo que debe ser evaluado para definir medidas de protección. Por tal motivo, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a través del grupo del Laboratorio de Geoinformática, y con la colaboración de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica y el apoyo tanto del CONACYT como de los Gobiernos de la Ciudad de México y del Estado de México, ha emprendido desde el año 2005 importantes esfuerzos para capturar, ordenar y estudiar sistemáticamente el fenómeno del agrietamiento. El objetivo es poder formular medidas de mitigación y control de las grietas del suelo y contribuir a la atención de tan importante problema que impacta tanto a las líneas vitales (vialidades, metro, agua potable, drenaje, gasoductos, otras) como a las edificaciones en general.

El fenómeno del agrietamiento se puede manifestar a consecuencia de cualquier condición que genera esfuerzos de tensión o cortante importantes en el suelo (Auvinet, 2008 y 2012). El fenómeno del agrietamiento tiene por tanto distintas causas, incluyendo la contracción de las arcillas lacustres por secado, la existencia de esfuerzos de tensión asociados al peso de las construcciones, el fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos, etc. Sin embargo, las grietas más importantes y destructivas son una consecuencia directa del hundimiento regional que se presenta en la Ciudad de México por efecto del bombeo de agua en estratos profundos. El propósito del presente trabajo es presentar los trabajos realizados hasta este momento para documentar esta problemática para fines de prevención y de definición de medidas de mitigación.

2 ANTECEDENTES

El fenómeno del agrietamiento no es exclusivo de la Ciudad de México y su zona conurbada (Méndez *et al.*, 2012). Este fenómeno se extiende a otras ciudades de México como: Toluca; Querétaro; Morelia; Silao; Aguascalientes; Soledad de Graciano Sánchez en San Luis Potosí y otras. En la Figura 1, se muestra la distribución espacial de los principales estados afectados por el fenómeno del agrietamiento en México.



Figura 1. Estados afectados por el fenómeno del agrietamiento en México.

Los estudios y las acciones relativos al problema del agrietamiento realizados con anterioridad han sido aislados y preliminares, con interpretaciones contradictorias, y buscando soluciones a corto plazo sin profundizar en el entendimiento del problema. Tampoco se ha evaluado la eficiencia de algunas soluciones para minimizar los efectos dañinos en las construcciones y, por consiguiente, definir recomendaciones para el control del agrietamiento basadas en evidencias.

Antes se pensaba que el fenómeno de agrietamiento solo ocurría en el vaso seco del Lago de Texcoco; pero en los últimos años, se observa que ya afecta por lo menos cinco zonas del Valle de México (SMMS, 1991): 1) Zona Sur: Xochimilco, Tláhuac y Chalco; 2) Zona Oriente: Iztacalco, Iztapalapa, Nezahualcóyotl, Chimalhuacán y Los Reyes; 3) Zona Centro: Peñón de los baños y Venustiano Carranza; 4) Zona Norponiente: Naucalpan, Azcapotzalco y G. A. Madero y 5) Zona Nororiente: ex Lago de Texcoco.

En algunos predios de Iztapalapa y Tláhuac, el impacto del agrietamiento del suelo en zonas de transición abrupta entre materiales de suelo firme y blando ha tomado mucha importancia por su moderada pero continua capacidad de destrucción, particularmente en bardas y en aquellas edificaciones de autoconstrucción que suelen ser muy precarias en cuanto a su cimentación y a sus elementos estructurales con baja calidad de los materiales como las observadas en estas tres demarcaciones (Auvinet *et al.*, 2022a). También los servicios públicos de agua, drenaje, así como los ductos de Pemex y gas natural padecen el mismo impacto. En Xochimilco el impacto del agrietamiento del suelo en zonas de transición abrupta entre materiales de suelo firme y blando es considerablemente menor (Auvinet *et al.*, 2022b).

3 RECOPIACIÓN, PROCESAMIENTO, CAPTURA Y GESTION DE LA INFORMACIÓN

Se emprendió una campaña sistemática de recopilación de estudios de muy distinta índole relacionados con el fenómeno de agrietamiento (pozos de agua, hundimiento regional, topografía, etc.), así como la identificación de los sitios que tenían registro de agrietamiento. En esta etapa, resultó muy importante la colaboración y trabajos de levantamientos de grietas que el Sistema de Aguas del Gobierno de la CDMX solicitaba a empresas.

Paralelamente, se realizaron trabajos de captura física en campo consistentes en levantamientos directos de grietas *in situ* recurriendo a técnicas de control geodésico, empleando el método de levantamiento diferencial GPS estático rápido con post-proceso como se ilustra en la Figura 2.

Se tomaron y clasificaron más de veinte mil fotografías panorámicas en formato digital de las grietas y de los daños que ocasionan en las construcciones. Cabe destacar que, hasta el momento, se ha logrado documentar 568 sitios de agrietamiento, descartándose 198 sitios que tenían reporte de grieta. En efecto, en las visitas de campo, resultó evidente que las anomalías reportadas no eran grietas y que podían atribuirse a otros efectos (principalmente, socavación). Cabe señalar que muchas de las reparaciones del pavimento en la Ciudad, se deben a las socavaciones provocadas por las fugas que tiene la red de agua potable y alcantarillado y no al agrietamiento.

Para abordar la gestión de la información sobre los sitios con presencia de grietas y el estudio del problema del fenómeno de agrietamiento con eficiencia, el grupo del Laboratorio de Geoinformática recurrió, como en otras ocasiones, al empleo de las herramientas de análisis espacial que ofrecen los Sistema de Información Geográfica.

A estos sistemas, se les ha podido integrar a través de los años otras capas de información que han permitido definir con mayor detalle y precisión el marco geográfico, histórico, físico y social de la unidad principal de estudio que es el territorio de la Cuenca

de México. La información respecto a la ubicación de cada grieta y a la descripción de las características físicas y geométricas de las mismas fue almacenada en la base de datos denominada: SIG para Grietas, SIG-G. En la Figura 3, se muestra la distribución espacial de los 568 sitios hasta ahora almacenados en el Sistema de Información Geográfica para Grietas, SIG-G.

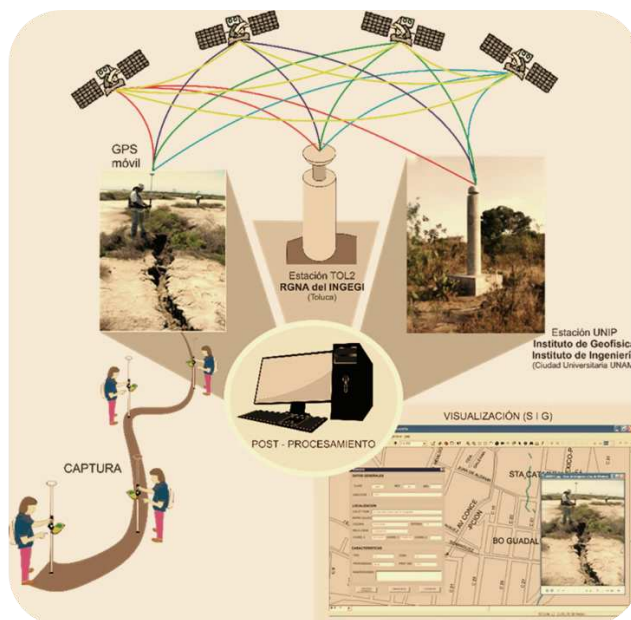


Figura 2. Tareas de captura, procesamiento y visualización de las grietas

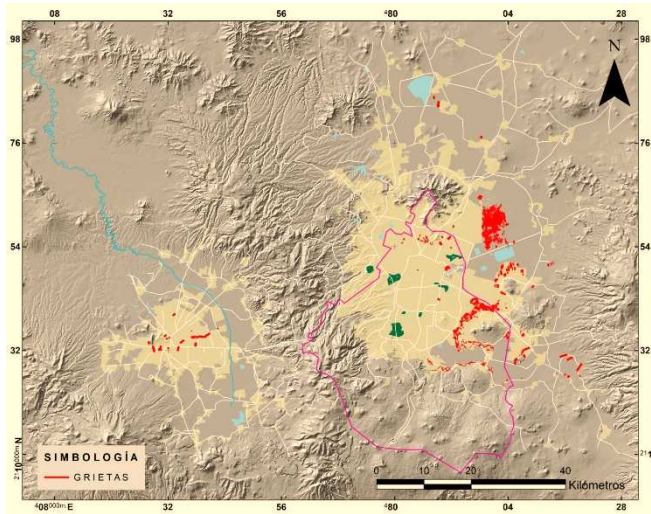


Figura 3. Distribución espacial de los 568 sitios hasta ahora almacenados en el SIG-G.

4 ACERVO FOTOGRÁFICO DE GRIETAS.

Cabe destacar que este archivo fotográfico se conformó a partir de los resultados de distintos estudios que corresponden a nueve campañas de trabajos de campo organizadas en el curso de más de una década (1996, 1999, 2001, 2002, 2005, 2006, 2007, 2008, 2017 - 2023). Las primeras cuatro fueron realizadas por el Gobierno del Distrito Federal a través del Sistema de Aguas de la

Ciudad de México. En cambio, las últimas cinco campañas las realizó el grupo del Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se han sacado más de 9800 fotografías panorámicas en formato digital de las grietas y de los daños que ocasionan en las construcciones.

El acervo fotográfico puede considerarse como una herramienta idónea para hacer avanzar los estudios que se orientan al entendimiento del fenómeno del agrietamiento del suelo, así como a la definición de nuevas medidas de mitigación y control del fenómeno.

El grupo del Laboratorio de Geoinformática ha recurrido, como en otras ocasiones, al empleo de un sistema de cómputo con el propósito de automatizar el acceso al robusto acervo fotográfico de los sitios con presencia de grietas en los suelos que se ha formado en el transcurso de más de una década.

La automatización del acervo fotográfico de las grietas facilita el acceso de los usuarios de modo ágil e intuitivo al expediente fotográfico de cada una de las grietas que se encuentra almacenado en la Base de Datos. A cada expediente de una grieta, se le asigna una clave numérica y un nombre (por ejemplo: calle o colonia donde se encuentra). Asimismo, cada expediente incluye un conjunto de fotos ordenadas en una lámina para diferentes momentos, con objeto de examinar tanto la evolución de la altura del escalón de las grietas generadas en las zonas de transición abrupta entre materiales firmes y blandos, como del progreso del ancho de la ranura de las grietas generadas y propagación por fracturamiento hidráulico.

Del mismo modo, el expediente fotográfico contiene, en una o más láminas, las fotos ordenadas de los daños causados en las construcciones a través del tiempo, permitiendo no solo conocer la evolución de la grieta, sino el grado de afectación de las viviendas que cruza. Dichas imágenes resultan valiosas al momento de tomar decisiones para definir el proyecto de rehabilitación de las viviendas.

El sistema de computadora se inicia eligiendo en el menú del sistema de cómputo tipo mapa índice la alcaldía donde se encuentra el sitio o expediente de interés que se desea consultar (Figura 4). El expediente fotográfico de cada una de las grietas contiene el trazado en planta del espacio urbano donde se sitúa la grieta. (Figura 5).

Se ha consolidado y automatizado este robusto acervo fotográfico respecto a los sitios con presencia de grietas en los suelos del valle de México.

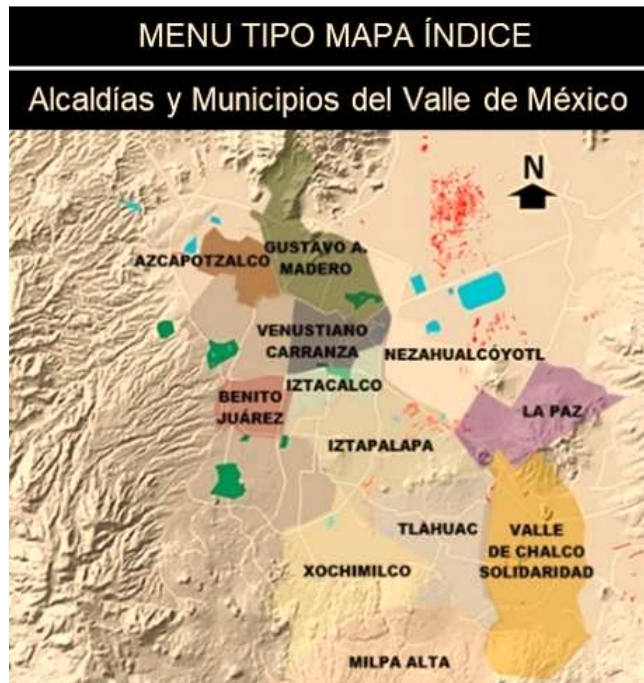


Figura 4. Elección de la alcaldía donde se encuentra el sitio de interés.

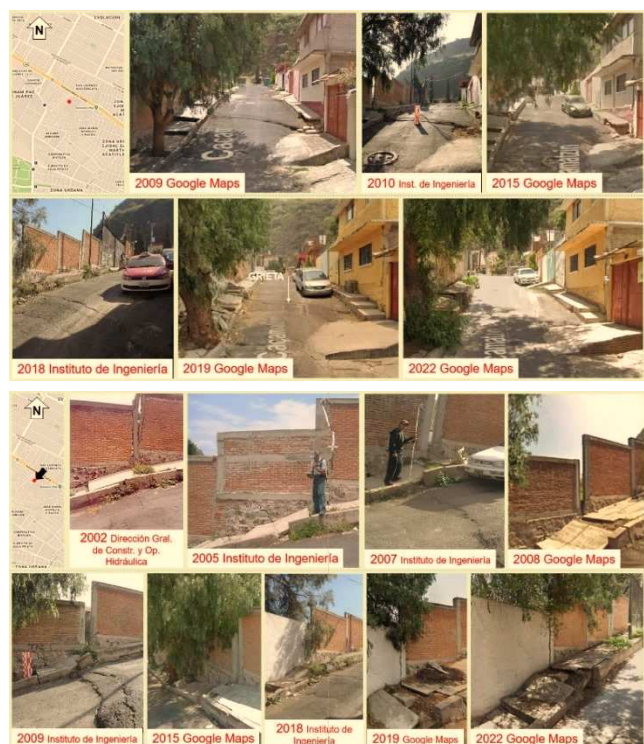


Figura 5. Condiciones y daños causados por la grieta Cacamatzin en diferentes fechas.

La base de datos de grietas facilitó el análisis orientado a la definición de una primera propuesta de zonificación de grietas presentes en los suelos del Valle de México en función del mecanismo de generación y propagación de estas. Otro logro fue el de haber contribuido al entendimiento del mecanismo de generación y propagación del agrietamiento, analizando los expedientes de cada grieta para diferentes años o momentos contenidos en el sistema de cómputo.

Gracias al acervo fotográfico de las grietas en los suelos que se encuentra almacenado y ordenado en la base de datos, fue posible analizar los eventos ocurridos en los sismos de septiembre del 2017. Se pudo concluir que estos eventos no favorecieron la generación-propagación de grietas, pero sí hicieron que creciera la altura de escalón en algunas grietas, y posiblemente reactivaron grietas anteriormente controladas (Reséndiz y Auvinet, 2017).

5 ZONIFICACIÓN DE LOS AGRIETAMIENTOS

Los sitios de agrietamiento hasta ahora documentados en el Valle de México no están distribuidos uniformemente. Se concentran en cinco zonas: 1) Zona Sur: Xochimilco, Tláhuac y Chalco; 2) Zona Oriente: Iztacalco, Iztapalapa, Nezahualcóyotl y Chimalhuacán.

Los Reyes; 3) Zona Centro: Peñón de los baños y Venustiano Carranza; 4) Zona Norponiente: Naucalpan, Azcapotzalco y G. A. Madero y 5) Zona Nororiente: Ex Lago de Texcoco.

Respecto a los mecanismos de generación y propagación del agrietamiento, el grupo del Laboratorio de Geoinformática ha podido determinar los siguientes mecanismos (Auvinet, 2008):

- Tipo I Agrietamiento por fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos
- Tipo II Agrietamiento asociado a la consolidación regional en zonas de transición abrupta
- Tipo III Agrietamiento atribuible a anomalías estratigráficas
- Tipo IV Agrietamiento atribuibles a la evapo-transpiración
- Tipo V Agrietamiento atribuibles a estructuras geológicas sepultadas
- Otros.

La lámina de la Figura 6 (Auvinet *et al.*, 2017) revela que las grietas predominantes se agrupan en dos mecanismos principales a lo largo y ancho del territorio del Valle de México. Cabe destacar, que la primera propuesta de zonificación de grietas en función de su mecanismo de generación-propagación de grietas, se determinó con base en los continuos levantamientos físicos *in situ* y de posicionamiento satelital, en los mecanismos de generación-propagación identificados y en la gestión de las herramientas de análisis espacial contenidas en los Sistemas de Información Geográfica. Esta figura se ha incorporado al Atlas de Riesgos del Gobierno de la ciudad de México.

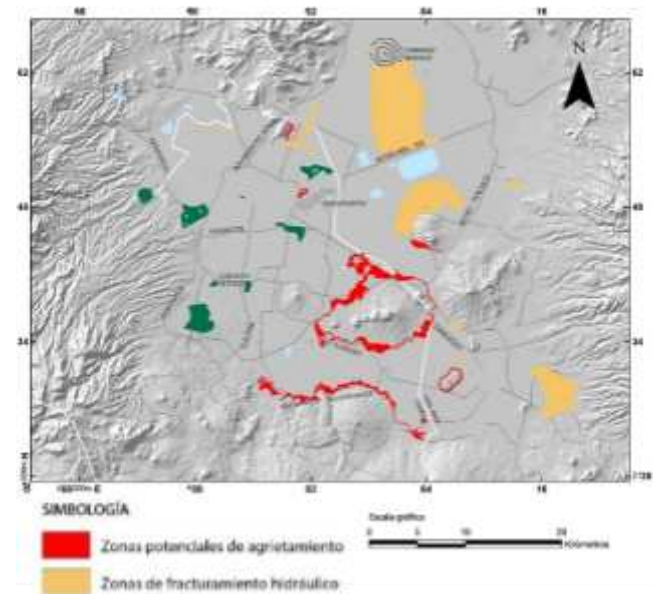


Figura 6. Zonificación de grietas en función de su mecanismo de generación-propagación.

6 RELACIÓN ENTRE AGRIETAMIENTO Y FALLAS GEOLÓGICAS

El grupo de Ingeniería Sismológica del Instituto de ingeniería ha conformado un catálogo de sismicidad local con 218 sismos y ha ejecutado un análisis tanto de la distribución espacial de los hipocentros generados como de la profundidad de los mismos que

permite determinar once zonas de sismicidad recurrente que corresponden a tres direcciones de estados de esfuerzos (Chavacan Ávila y Lermo Javier, 2007).

Estas once zonas de sismicidad comparadas con la distribución espacial de grietas proporcionada por el Sistema de Información Geográfica del Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM permitieron establecer que no hay relación entre fallas activas y la generación de grietas como ocurre en algunas otras ciudades. Del análisis del origen probable de estos dos fenómenos y al efectuar la visualización de la superposición de la distribución espacial de los hipocentros con las grietas en la superficie, se concluye que no existe una relación directa entre estos dos fenómenos (Figura 7).

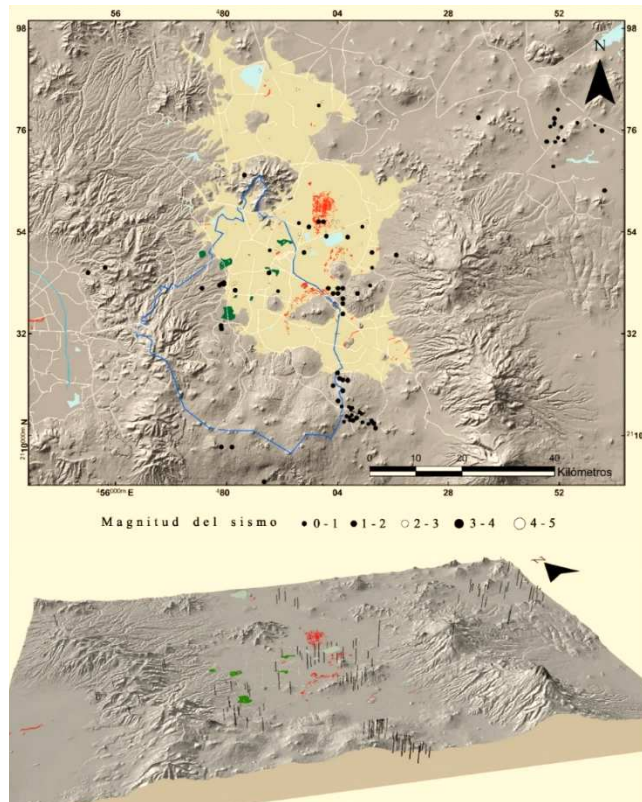


Figura 7. Vista en planta y oblicua de la Distribución espacial de los hipocentros (en color negro) y de las grietas (color rojo).

7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL

7.1 Medidas de Mitigación y Control para grietas Tipo I (Agrietamiento por fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos).

Es posible, por lo menos para algunos mecanismos, impedir la formación de grietas. Por ejemplo, las grietas generadas por fracturamiento hidráulico pueden evitarse si se mantiene un buen drenaje en las áreas susceptibles a encharcamientos.

Debe reconocerse que las grietas Tipo I se vuelven más aparatosas conforme se erosionan y ensanchan, por lo cual, deben sellarse rápidamente con material granular; por ejemplo, grava-arena limpia para restablecer la continuidad del medio. Se establece así una zona sin resistencia a la tensión que puede evitar que vuelva a aparecer la grieta paralelamente a la anterior y controlar la erosión interna en una forma análoga a la que ha resultado efectiva en presas de tierra y enrocamientos. Esta técnica ha sido empleada también para controlar las grietas longitudinales que se presentan en el canal Río de la Compañía.

Asimismo, se ha podido demostrar que la existencia de un simple terraplén con o sin refuerzo, o bien de una cimentación con sólida liga estructural permite confinar el suelo, disminuir la magnitud de esfuerzos y provocar el desvío de este tipo de grietas hacia otras zonas. Los refuerzos empleados en la base de los terraplenes construidos en zonas agrietadas deben ser cuidadosamente elegidos, considerando que las fuerzas de tensión que deben tomar pueden ser considerables (Auvinet, 1991)

7.2 Medidas de Mitigación y Control para grietas Tipo II (Agrietamiento asociadas a la consolidación regional en zonas de transición abrupta).

Estas grietas son muy difíciles de controlar. Teóricamente, bastaría con suspender el bombeo en pozos profundos para detener el hundimiento regional y la consolidación de los suelos blandos. Sin embargo, esta solución resulta utópica si se toma en cuenta que, actualmente, más de la mitad del agua potable consumida en la capital proviene de pozos locales.

Debe reconocerse que la altura del escalón de la grieta puede prosperar por lo cual deben ser intervenidas instalando una caja disipadora de deformaciones unitarias (Auvinet, 2018). Este tratamiento ha sido aplicado a más de 1500 grietas. Aun después de su tratamiento, las grietas siguen evolucionando mientras persiste el mecanismo que las originó, por lo tanto, es necesario que exista un seguimiento continuo que permita evaluar su evolución.

Por otro lado, es importante tomar en cuenta la presencia real o potencial de grietas en el diseño de construcciones e instalaciones para evitar o por lo menos disminuir el daño que puedan ocasionar a las estructuras.

En el caso de las viviendas, la colocación de juntas en muros y bardas, o bien el empleo de adoquín en pisos y patios, eventualmente ha sido suficiente para reducir o mitigar a un nivel tolerable de coexistencia, las molestias y daños a las estructuras provocados por las grietas Tipo II. Los problemas del agrietamiento del suelo asociados al hundimiento regional son de gran envergadura y requerirán una atención continua en el futuro.

8 CONCLUSIONES

En el curso de más de una década, el grupo del Laboratorio de Geoinformática ha logrado:

Actualizar la base de datos sobre la distribución espacial de los agrietamientos en los Valles de México, Cuautitlán y Toluca e incrementarla en más de cuatro mil sitios con presencia de grieta que fueron gestionados por un Sistema de Información Geográfica.

Hacer avanzar en forma significativa el estado del conocimiento acerca de la distribución espacial de las grietas en los Valles de México, Cuautitlán y Toluca.

Consolidar y automatizar el acervo de más de 9,800 fotografías panorámicas respecto a los sitios con presencia de grietas en los suelos del Valle de México y de los daños que ocasionan las grietas en las construcciones y que emanan de nueve campañas intensas de trabajos de campo organizadas durante el transcurso de más de una década (1996, 1999, 2001, 2002, 2005, 2006, 2007, 2008, 2017 - 2023). Los expedientes fotográficos contenidos en la base de datos de grietas resultan valiosos e importantes al momento de tomar decisiones para definir el proyecto de rehabilitación de las viviendas. El banco fotográfico permite auxiliar a los estudios encaminados al entendimiento del fenómeno del agrietamiento, con el propósito de establecer medidas de mitigación y control de los efectos indeseables de las mismas tanto en las edificaciones en general como en las líneas vitales.

Gracias al acervo fotográfico de las grietas en los suelos y que se encuentran almacenadas y ordenadas en una base de datos, fue posible analizar los eventos ocurridos en los sismos de septiembre del 2017. Fue posible concluir que estos eventos no favorecieron la generación-propagación de grietas; pero sí hicieron que creciera la altura de escalón en algunas grietas, y posiblemente reactivaron grietas anteriormente controladas (Reséndiz y Auvinet, 2017).

Establecer una primera propuesta de zonificación de los agrietamientos presentes en el Valle de México en función de su mecanismo de generación-propagación. La base de datos de grietas facilitó el análisis orientado a la definición de una primera propuesta de zonificación de grietas presentes en función del

mecanismo de generación y propagación de las mismas en los suelos del Valle de México

Determinar la relación entre agrietamiento y fallas geológicas.

Proponer medidas de mitigación y control de los efectos indeseables de las grietas tanto en las edificaciones en general como en las líneas vitales alojadas en el territorio del Valle de México.

Contribuir al entendimiento del fenómeno del agrietamiento acerca del mecanismo de generación y propagación a través de analizar los expedientes de cada grieta para diferentes años o momentos contenidos en el sistema de cómputo y mediante modelación numérica (Auvinet *et al.*, 2022)

Sin embargo, estos trabajos deben considerarse solamente como una primera etapa del estudio de este importante fenómeno, debido a que se requiere definir y ampliar las técnicas que permitan controlar el fenómeno del agrietamiento y mitigar sus efectos dañinos. Es además necesario definir zonas de observación continua y tramos de prueba para verificación de la eficiencia de soluciones implementadas

La continuidad en la voluntad para llevar a cabo estos estudios y en la movilización de los medios requeridos para su realización resultará esencial para que se logren resultados cada vez más satisfactorios.

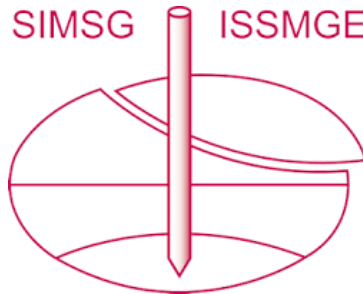
9 AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo continuo recibido para la realización de los trabajos descritos en el presente artículo por parte de las autoridades del Gobierno de la Ciudad de México y en particular del Instituto para la Seguridad de las Construcciones y de la alcaldía de Iztapalapa.

9 REFERENCIAS

- Auvinet, G., Juárez, M., Méndez, E. and Ovando, E., 1995. Sistema de Información Geográfica para Sondeos Geotécnicos, Proceedings, *Xth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 1, pp. 312-324, Guadalajara, México.
- Auvinet, G., Méndez, E. y Juárez, M., 2017. El subsuelo de la Ciudad de México, Vol. 3, *Complemento a la Tercera Edición del libro de R.J. Marsal y M. Mazari: Volumen adicional (Vol. 3) sobre avances en el conocimiento del subsuelo 1959-2016*, publicado con motivo del 60 aniversario de la fundación del Instituto de Ingeniería, UNAM. ISBN Vol. 3 978-607-02-8198-3
- Auvinet, G., Juárez-Camarena, M., Méndez-Sánchez, E., Hernández-Vizcarra, R., Martínez-Galván, S.A., Pérez-Angeles, M.A. and Sánchez-Guzmán, J., 2022 (a), *Assessment of soil cracking mechanism in the south-east area of Mexico City based on deep geotechnical exploration*, Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney, Australia.
- Auvinet, G., Juárez, M., Méndez, E., Hernández, F., Martínez, S., Delgado, M.E. y Pérez Angeles, M.A., 2022 (b). Evaluación del mecanismo de agrietamiento del suelo en el sur-oriente de la Ciudad de México. *Revista Geotecnia, SMIG*, Núm. 264, agosto, pp. 20 a 33, México.
- Méndez, E., Barragán, J., Vera, A., Juárez, M. y Auvinet, G., 2006. Avances en la caracterización geoinformática del subsuelo de la cuenca de México, Memoria, *XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, SMMS*, Tuxtla Gutiérrez, Vol. 2, pp. 559-568. ISBN 968-5350-18-3
- Méndez, E., Auvinet, G. y Lermo, J., 2008. Avances en la caracterización geotécnica del agrietamiento del subsuelo de la Cuenca de México, Memoria, *XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Aguascalientes, Vol. 2, pp. 495-502.
- Méndez, E., Auvinet G., Sánchez J.L., García J.A. y Díaz J.A., 2021. Agrietamiento del suelo en los tres principales valles del altiplano mexicano, Memorias técnicas de la *XXVI Reunión nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica*, (14-16 noviembre 2012) Cancún, Quintana Roo, México.
- Reséndiz, D. y Auvinet, G., 2017. Confusiones surgidas a partir de los sismos del 2017 en la ciudad de México, *Revista Geotecnia, SMIG*, No 246, CDMX. México.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), 1991, Memorias del simposio Agrietamiento de suelos, Ciudad de México, México.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.