

# **HISTORIA Y ACTUALIDAD DEL HUNDIMIENTO REGIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

Por Enrique Santoyo Villa

## **ANTECEDENTES**

En el año de 1945 la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica inició los estudios del subsuelo de la ciudad de México. El Dr. Nabor Carrillo era el jefe de la Sección de Mecánica de Suelos y los ingenieros Fernando Hiriart y Raúl Sandoval los investigadores. La empresa Ingenieros Civiles Asociados apoyó decididamente este empeño con los estudios geotécnicos de las obras que construía en la ciudad; para ello los profesores Raúl J. Marsal y Marcos Mazari montaron el Laboratorio ICA y entre los años 1947 a 1952 dirigieron la ejecución de sondeos, llevaron a cabo un enorme número de pruebas de laboratorio, instalaron estaciones piezométricas y midieron los asentamientos de edificios singulares. Con toda esa vasta información pudieron interpretar las distintas condiciones estratigráficas del subsuelo y elaborar el Plano de la Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México, que con ligeras modificaciones sigue siendo actual. El segundo aspecto fundamental que investigaron fue el del hundimiento regional, que antes había interpretado el Dr. Nabor Carrillo como la consecuencia de la consolidación de las arcillas inducida por la extracción de agua para el abastecimiento de la ciudad. Marsal y Mazari demostraron que la interpretación del Dr. Carrillo era acertada.

Los trabajos anteriores estimularon la formación de la Comisión Hidrológica del Valle de México, que se encargó de recopilar toda la información técnica e instrumentar con una red de referencias topográficas y estaciones piezométricas a toda la zona urbana de entonces.

Los profesores Marsal y Mazari difundieron los resultados de sus investigaciones en los “Cuadernos ICA” y en 1959 los reunieron en el libro “El Subsuelo de la Ciudad de México”. Por su parte la CHCVM empezó por recopilar la información histórica sobre el hundimiento, con la valiosa nivelación topográfica del Ing. Roberto Gayol de 1895, que empezó por tomar como banco de referencia a una roca basáltica ubicada en el atrio de la iglesia de Atzacualco, considerando que era un afloramiento exento de hundimientos; sin embargo, por los años 40 se detectó que se trataba de una roca suelta sobre arcilla y por ello se reubicó el banco a un afloramiento confiable de basalto, cercano a la misma iglesia, y se le siguió denominando como Banco Atzacualco. Los datos sobre niveles topográficos y las mediciones de piezometría conformaron a partir de 1961 los Boletines de Mecánica de Suelos; el décimo y último se dio a conocer en 1986. Es de lamentar que en los 22 años transcurridos no se ha difundido la evolución de los hundimientos y piezometría, incluso se desconoce si se continúa con las mediciones. Otra institución que vigila el hundimiento regional es la Dirección General de Construcción de Obras Hidráulicas, actual Sistema de Aguas de la Ciudad de México; sin embargo, la información que recopila es de uso restringido, sin acceso abierto a los innumerables usuarios potenciales de tan importantes datos.

## **ORIGEN DEL HUNDIMIENTO**

La sobreexplotación del acuífero del valle de México se ha transformado en una preocupación que se incluye a la larga lista de ciudades y regiones del orbe con ese problema; el descenso continuo del nivel de los acuíferos

provoca la disminución de las presiones del agua intersticial e incrementa el esfuerzo que actúa en la parte sólida del subsuelo. Esto desencadena hundimientos de la superficie que casi siempre terminan por afectar a las construcciones e instalaciones municipales. Otra consecuencia de la extracción excesiva de agua es la reducción de la producción agrícola en muchas regiones del mundo.

En México el problema se ha extendido a otros lugares de la república; así sufren de hundimiento regional y de los consecuentes agrietamientos las ciudades de Celaya, Irapuato, Querétaro, Torreón y Aguascalientes y empieza a manifestarse en Toluca y Puebla.

## **HUNDIMIENTO EN LAS CIUDADES DE MÉXICO, SHANGAI Y BANGKOK**

Es interesante mencionar las cifras significativas del hundimiento regional de la ciudad de México junto con los de Shangai y Bangkok, por la cierta similitud de sus subsuelos constituidos por arcillas blandas, la sobreexplotación de sus acuíferos, pero sobre todo porque son un ejemplo de las acciones que se deben tomar en nuestra ciudad. Vale aclarar que algunos ven en Shangai y Bangkok, por ser ciudades costeras, problemas más apremiantes; sin embargo, los daños que manifiestan sus estructuras, líneas de metro e instalaciones municipales son muy semejantes.

**La ciudad de México.** Se ubica a 2236 metros sobre el nivel del mar, la población metropolitana es algo mayor de los 20 millones, existen unos 1,600 pozos profundos en operación, así como innumerables pozos clandestinos; la extracción de agua es de unos 76.6 m<sup>3</sup>/s. Pero también son significativas las pérdidas de agua por: el bombeo desde sótanos faltos de estanqueidad, de las líneas del metro, colectores y túneles del sistema de drenaje; otras formas de extracción son: la evaporación solar, el consumo de los árboles y los pozos abandonados y mal sellados.

La ciudad se ha hundido desde 1856 casi 9.0 m, según la referencia de la Catedral Metropolitana, que se hunde actualmente con 6 a 7 cm/año. En cuanto a las zonas con mayor velocidad de hundimiento se identifican con la información del año 1995 de la GAVM en: el Peñón del Marqués con alarmantes 40 cm/año, Coapa y Ecatepec con 20 cm/año y Chalco con 30 cm/año.

Así, al paso de los años los hundimientos se advierten a simple vista, muchas calles tienen lomos que no se apreciaban antes y cada vez es más notorio el desplomo de un gran número de edificios en toda la ciudad. Algunas colonias que antes se consideraban exentas de los efectos del fenómeno, como la del Valle y la Roma, presentan edificios con evidentes inclinaciones y daños.

**La ciudad de Shangai.** Se ubica a 4 m sobre el nivel del mar y su población en toda el área metropolitana es de unos 20 millones. La ciudad se hundía en la década de los 60 a casi 10 cm por año; así que de mantenerse esa velocidad en sólo 40 años quedaría inundada. Esto obligó a sus autoridades a estudiar el problema, reducir el desperdicio de agua y recargar el acuífero, con los siguientes resultados: en el año 2000 el hundimiento se redujo a 8.3 mm por año, en el 2007 fue de 7.5 mm y pretenden que para el año 2010 el hundimiento anual sea de 5 mm. Pero aún con este hundimiento las autoridades reconocen que con esa tasa de hundimiento las líneas del metro tienen problemas de mantenimiento y filtraciones de agua.

**La ciudad de Bangkok.** Se ubica a 2 m sobre el nivel del mar, su población es de 6 millones. El hundimiento se empezó a manifestar hace 35 años; algunos puntos de la ciudad han descendido casi 1 m/año con graves inundaciones. Para enfrentar el problema, las autoridades de la ciudad emprendieron estudios y acciones correctivas a partir de 1970; las principales fueron racionalizar el consumo de agua, desarrollar la tecnología para la recarga del acuífero y elevar notablemente el precio del agua. Con estas medidas lograron que el hundimiento entre los años 1980 a 1990 fuera de 5 a 10 cm/año, aunque el acuífero descendió a más de 60 m; en 1995 se extraían de 1313 pozos profundos un caudal de 6.6 m<sup>3</sup>/s. Hoy se ha elevado a casi 23 m<sup>3</sup>/s en 1879 pozos, pero el hundimiento ha disminuido significativamente pues ahora es de 1.5 a 2.2 cm/año. Pero sigue siendo excesivo, considerando la elevación de la ciudad.

## RECARGA DEL ACUIFERO

Desde hace muchos años se ha reconocido la importancia de recargar el acuífero del Valle de México mediante la infiltración de agua, sobre lo que se han tenido las siguientes experiencias:

***Infiltración de agua en las arcillas.*** El Reglamento de Construcciones obliga a que las obras nuevas cuenten con pozos de infiltración del agua pluvial, pretendiendo que el agua penetre a gravedad lo cual esto es casi imposible porque las arcillas blandas son prácticamente impermeables. Para demostrarlo se realizó una prueba de inyección al oriente de la ciudad en pozos de 10 cm de diámetro a 22 m de profundidad, aplicando únicamente la presión hidrostática, se pudo infiltrar 0.5 l/min; aumentó a 10 l/min con una presión menor de 1 kg/cm<sup>2</sup>. Pero al inducir fracturamiento hidráulico de la arcilla con presión de 1 a 3 kg/cm<sup>2</sup> alcanzó valores de hasta 100 a 300 l/min.

Se debe señalar que los pozos de infiltración profundos instalados en arcillas, cuando están mal instalados facilitan el flujo de agua de la parte somera a la profunda y por ello reducen la presión del agua intersticial, causan la consolidación de las arcillas e inducen asentamientos adicionales.

***Infiltración de agua en las tobas.*** El Ing. Ignacio Sainz Ortiz realizó en 1957 una prueba de infiltración al pie de la presa Mixcoac. Para ello habilitó tres pozos de 40 cm de diámetro, el primero a 150 m de profundidad, el nivel freático se detectó a 86 m. Inicialmente se inyectó un gasto de 100 l/s sin que se observaran síntomas de saturación por lo cual estimó que el caudal de inyección podría incrementarse a 200 o 250 l/s. En el segundo pozo el nivel del agua se localizó a 113 m y fue posible inyectar un gasto 340 l/s. El tercer pozo encontró el agua a 118 m. Operando los tres pozos juntos, estimó que era factible introducir 1.12 m<sup>3</sup>/s. Durante los seis días que duró la prueba agotó los 119,400 m<sup>3</sup> de agua que tenía almacenada la presa. Como consecuencia de esa infiltración, en otros tres pozos cercanos se recuperaron los niveles en 1 m. Se desconoce la razón por la que se abandonaron estos pozos de infiltración, pero se dice que se debió a que el agua de la presa Mixcoac estaba contaminada.

Es importante aclarar que estas pruebas tuvieron éxito porque se realizaron en tobas con estratos muy permeables. Por el contrario, son innumerables los fracasos cuando se ha intentado introducir agua en tobas de baja permeabilidad, sin estratos de arena.

***Infiltración de agua en los basaltos.*** Recientemente el Gobierno de la Ciudad realizó la instalación de pozos de absorción en los basaltos del poniente de la ciudad, pero se desconoce los resultados alcanzados. Convendría también considerar que los túneles naturales que dejaron las corrientes de lava podrían también funcionar como difusores de agua.

## ACTUALIDAD DEL HUNDIMIENTO

Los bancos profundos instalados en la Catedral Metropolitana y en la Alameda Central son los únicos disponibles, que por la deformabilidad axial de su tubo exterior, no se ven afectados por el pandeo de los bancos convencionales. Se instalaron 4 bancos apoyados a: 40 m, sobre la Capa Dura; a 60 m sobre los Depósitos Profundos; a 80 m en Arcillas Limosas Preconsolidadas y a 100 m en las Arenas Limosas Profundas. El resumen de las mediciones realizadas en la Catedral entre 1991 a 2005 se reproduce en la Fig. 1, excepto la del a 60 m que se dañó en 1999. La información de esa figura fue correlacionada topográficamente con el Banco Atzoacalco y por su trascendencia se describe brevemente a continuación:

***Hundimiento superficial.*** En 1991 era de 7.2 cm/año, cuando no había influencia de los trabajos en el subsuelo de la Catedral (cuadros superiores de la Fig. 1); en 2003 se elevó a 8.7 cm/año por efecto de la subexcavación y bombeo; para 2004 se tenía 7.8 cm/año, para 2005 creció a 9.2 cm/año; la recuperación del comportamiento del subsuelo se advirtió para el año 2006 con el hundimiento de 7.5 cm/año y para 2007 resultó de 6.1 cm/año.

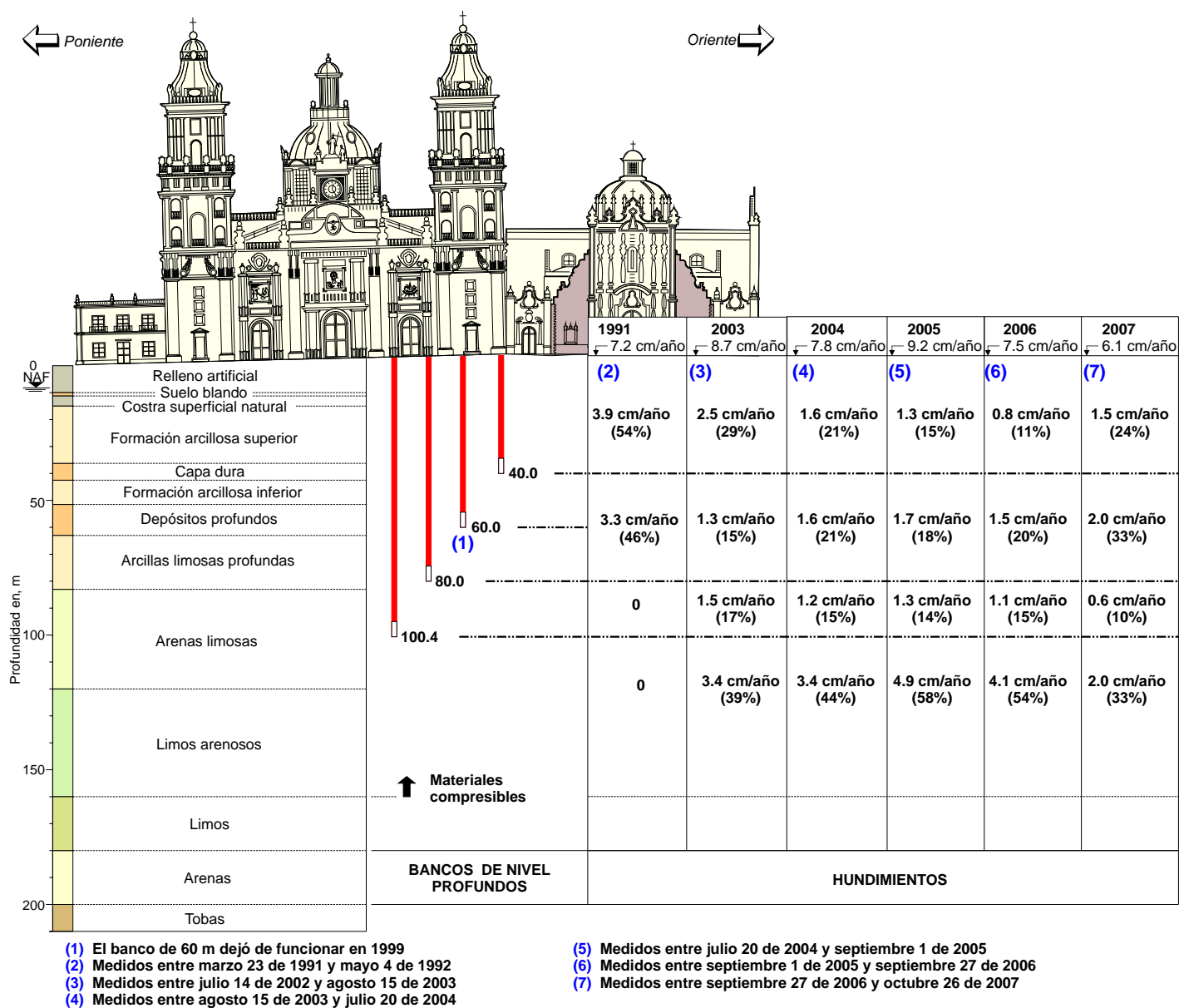


Fig. 1 Distribución de hundimientos anuales entre 1991 y 2007 en la Catedral

**Consolidación de la Formación Arcillosa Superior.** Con el banco a 40 m de profundidad se pudo medir que en 1991 reducía su espesor en 3.9 cm cada año, lo cual correspondía al 54 % del hundimiento total en la superficie, se redujo a 1.5 cm/año para el 2007, con el 24 % del total.

**Consolidación de la Formación Arcillosa Inferior.** Con los bancos entre 40 y 80 m se advierte que el hundimiento en 1991 era de 3.3 cm/año que correspondía al 46 % del hundimiento total en la superficie y para el 2007 fue de 2.0 cm, con el 33 % del total

**Con los bancos a 80 y 100 m de profundidad.** En 1991 el hundimiento era cero, lo cual significa que los asentamientos medidos en la superficie se debían únicamente a la consolidación de las dos formaciones arcillosas. Posteriormente creció y sin duda fue una consecuencia de los trabajos en la Catedral; pero estos se concluyeron en enero del 2001, así que los 0.6 cm medidos en el 2007 y que se asocian con el 10 % del total, se deben en parte a la consolidación de las arcillas y también a la contribución de la deformabilidad de los suelos granulares profundos. Lo anterior es una nueva e inquietante fuente del hundimiento.

**El hundimiento a más de 100 m de profundidad.** En 2007 fue de 2.0 cm/año que corresponde con el 33 % del total, lo cual ratifica que los suelos granulares contribuyen al hundimiento.

**Hundimiento según el banco profundo en la Alameda Central.** En 1994 se instaló junto al quiosco de ese jardín un banco profundo a 120 m de profundidad. Las nivelaciones topográficas desde el Banco Atzacualco indican que para septiembre de 2005 el hundimiento superficial era de 11.4 cm/año y el correspondiente a 120 m de profundidad fue de 3.9 cm/año, que significa el 34 % del total. Así la información de este banco ratifica las mediciones de la Catedral.

**Agrietamiento superficial.** Las orillas del ex-lagos de México, San Cristóbal y Xaltocan, así como en los remanentes de los lagos de Xochimilco, Chalco y Zumpango están sufriendo con mayor frecuencia la formación de grietas que causan daños a estructuras pobremente cimentadas y que inclinan hasta a las mejor construidas. Este fenómeno se está convirtiendo en un grave problema social que tendrá también un enorme costo, Fig. 2.



Fig. 2 Grieta típica en una zona plana

## CONCLUSIONES

El hundimiento regional de la ciudad de México se debe a la extracción de agua que a su vez indujo consolidación de las dos formaciones de arcillas blandas características del subsuelo. Existía la hipótesis de que al paso de los años la consolidación se terminaría y los hundimientos se reducirían; sin embargo, la información aquí presentada demuestra, aunque limitada a dos puntos de la ciudad, que la consolidación aún no termina y que, además, las arcillas duras y hasta los materiales granulares por debajo de los 80 m de profundidad aportan un porcentaje grande de hundimiento.

Lo anterior amplía el reto de conservar la ciudad, sus monumentos, edificios e instalaciones municipales. Implica reconocer que el hundimiento regional es el principal problema que debe ser resuelto o al menos aminorado, por lo cual es urgente que se elabore un programa que actualice el conocimiento del subsuelo, basado en una instrumentación geotécnica suficiente, incluyendo sistemas de posicionamiento geográfico e imágenes de satelitales. También urge realizar un programa de investigaciones experimentales y teóricas que permitan interpretar y predecir confiablemente el comportamiento que tendrá el subsuelo a largo plazo.

El objetivo fundamental de esos estudios será identificar las acciones que se deberán implementar, como son: experimentar las técnicas de inyección de agua, identificar las mejores soluciones de cimentación y establecer las normas y restricciones que se necesitará adoptar en todo lo relativo al subsuelo y en particular al consumo del agua, incluyendo suministrarla a un precio racional. Todo esto conlleva a que autoridades y centros de investigación, como en Shangai y Bangkok, se interesen y realicen esta compleja tarea que requerirá de muchos años de esfuerzo y dedicación. Más aún, ese esfuerzo se debe extender por ahora a las ciudades de Celaya, Irapuato, Querétaro, Aguascalientes, Torreón, Toluca y Puebla y más adelante a las ciudades que también manifestarán hundimientos y grietas.