

Narciso Jesús Vázquez Carretero

José Luis de Justo Alpanés

**LA SUBSIDENCIA EN MURCIA.
IMPLICACIONES Y CONSECUENCIAS
EN LA EDIFICACIÓN**

Narciso Jesús Vázquez Carretero

José Luis de Justo Alpanés

LA SUBSIDENCIA EN MURCIA. IMPLICACIONES Y CONSECUENCIAS EN LA EDIFICACIÓN



Región de Murcia
Consejería de Obras Públicas,
Vivienda y Transportes



ASEMAS



MMC

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS
TEORÍA DE ESTRUCTURAS E INGENIERÍA DEL TERRENO
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Murcia, mayo 2002

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transcribirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de los autores.

© Narciso Jesús Vázquez Carretero. 2002
José Luis de Justo Alpanés. 2002

ISBN: 84-87138-36-5
Depósito Legal: MU-753-2002
Imprime: Imprenta Regional de Murcia

En los años 90, la ciudad de Murcia sufrió el primer caso importante de subsidencia registrado en España debido a un prolongado período de sequía. El descenso experimentado por las aguas freáticas ha influido de forma notable en el subsuelo, donde asientan las edificaciones, provocando deterioros y problemas en edificios, urbanizaciones, instalaciones y obras públicas, originándose un problema que trasciende de lo económico para instalarse en lo social.

El trabajo aquí presentado, es el primer cálculo sobre hundimiento de terrenos producido por el descenso del nivel freático realizado en España, y se pretende que sirva de base para un estudio sistemático del problema que permita tomar las medidas necesarias para disminuir la intensidad del mismo y evitar sus dañinas consecuencias ante hipotéticos nuevos asentamientos generalizados, así como resulta de gran interés para la prevención de una causa de graves patologías, cuya primera manifestación en España se ha producido en la ciudad de Murcia.

En cualquier caso, los resultados hallados deben considerarse como estimaciones que pueden ser muy útiles para el asesoramiento de determinadas actuaciones, en función de su repercusión en los efectos de subsidencia del terreno.

No quiero terminar sin mencionar a los autores del presente estudio, D. Narciso Jesús Vázquez Carretero y D. José Luis de Justo Alpanés, así como a los integrantes del Servicio de Gestión de Calidad en la Edificación, dependiente de esta Consejería, y a ASEMAS, por su participación en la publicación del trabajo.

Por último deseamos que esta publicación sea de la máxima utilidad, y que contribuya a paliar los efectos que puedan producirse por descenso del nivel freático, ya sea en la ciudad de Murcia o en cualquier otra.

Joaquín Bascunana García
Consejero de Obras Públicas,
Vivienda y Transportes

A partir del año 1993, y de una forma intensa en el año 1994, peritos expertos observaron patologías extrañas en varios edificios. No eran danos habituales, todo apuntaba hacia posibles asientos diferenciales.

Nos encontrábamos ante el primer caso conocido en España de subsidencia, provocada por el descenso generalizado de los niveles piezométricos a causa de una sequía prolongada y la consiguiente sobreexplotación de acuíferos.

Movilizados Servicios Técnicos Municipales, Regionales y Colegios Profesionales comenzó a estudiarse el fenómeno de la bajada del nivel freático, se recopilaban datos de estudios geotécnicos comparándolos con medidas de niveles freáticos. Todo esto confirmó un descenso considerable de los niveles cuyas consecuencias económicas y sociales eran muy alarmantes.

La Sociedad Murciana, los afectados y todos interesados tuvieron la oportunidad de conocer el problema, así como sus consecuencias, mediante la organización de unas jornadas técnicas. En ellas participaron los profesores D. José Luis de Justo, D. Antonio Jaramillo, D. Fructuoso Mana, D. Juan Luis Ballesteros, D. Ramón Pablo García, D. José Luis Fernández Salso y D. Antonio Santos Moreno, exponiendo sus teorías sobre el problema y sus difíciles soluciones.

Afortunadamente, la naturaleza devolvió los niveles freáticos a sus cotas habituales en un plazo menor de lo esperado, tras un inusual régimen pluvial en 1997. La advertencia no debe haber caído en saco roto.

El Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla realizó un estudio en profundidad con las observaciones piezométricas y las patologías aparecidas, desarrollando el profesor D. Narciso Vázquez una interesante tesis doctoral, cuyo resumen nos ocupa. En él nos ilustra sobre el fenómeno de la subsidencia en Murcia, analizando casos conocidos semejantes, investigando las causas y los efectos sobre los edificios, proponiendo finalmente medidas contra la subsidencia.

Desde ASEMAS, mutua de seguros de Arquitectos, realizamos una labor de estudio de patologías en edificación destinada a reducir sus efectos o evitarlos, basada en datos extraídos de los siniestros atendidos.

En esta línea queremos apoyar esta publicación encaminada a divulgar el porqué de unas patologías en edificación e infraestructuras, causadas por una alteración de las condiciones del suelo, consideradas por el autor como “Caso Fortuito”, evento imprevisible o que previsto fuese inevitable.

Felicitemos a nuestro compañero por el resultado de su brillante tesis, invitándole a continuar esta labor de investigación en aras a la mejora de la seguridad de la edificación e infraestructuras.

Fulgencio Avilés Inglés
Arquitecto. Presidente del C. A. de ASEMAS

El agua es la base de la vida en nuestro planeta; sin ella las tierras fértiles se vuelven áridas y estériles, y los animales y las plantas son incapaces de sobrevivir. El agua ha sostenido a la población humana mundial durante miles de años, en compleja interacción con el resto del ambiente natural. Pero en la actualidad, ningún rincón del planeta parece inmune a las crisis hidrológicas de uno u otro tipo. Considerados como fenómenos inconexos, las inundaciones, las sequías, la escasez de agua y el hambre parecen encajar en nuestra definición de «desastres naturales»; pero la verdad es que muchos de ellos son el resultado directo del uso y el abuso cotidiano que hacemos del agua.

(Lanz y Greenpeace España, 1997)

ÍNDICE

PRÓLOGO	23
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. RECORRIDO HISTÓRICO	
1.1. INTRODUCCIÓN	29
1.1.1. Definición de subsidencia terrestre	29
1.1.2. Importancia del fenómeno	29
1.1.3. Factores causantes de la subsidencia	29
1.1.4. Subsidencia causada por la extracción de agua desde acuíferos confinados	30
1.2. CASOS DE SUBSIDENCIA REGISTRADOS EN EL MUNDO A LO LARGO DE LA HISTORIA	32
1.2.1. La Cuenca de Méjico	32
1.2.1.1. El área metropolitana de Ciudad de Méjico	32
1.2.1.1.1. Marco hidrogeológico	32
1.2.1.1.2. Reconocimiento histórico del problema	34
1.2.1.1.3. Seguimiento hidrológico y geotécnico	35
1.2.1.1.4. Registros y consecuencias de la subsidencia	35
1.2.2. Subsidencia en EE.UU.	36
1.2.2.1. Arizona Central	37
1.2.2.1.1. Origen del fenómeno	37
1.2.2.1.2. Fisuras terrestres	39
1.2.2.1.3. Daños y consecuencias del fenómeno	39
1.2.2.2. El Valle de San Joaquín en California	40
1.2.2.2.1. El problema de la subsidencia	40
1.2.2.2.2. Marco hidrogeológico	40
1.2.2.2.3. Desarrollo del bombeo y trayectoria del nivel piezométrico	41
1.2.2.2.4. Registros y zonas de subsidencia	42
1.2.2.2.5. Importaciones de agua superficial	43
1.2.2.2.6. Cambios hidrogeológicos y nuevas condiciones ante una segunda explotación	44
1.2.3. Subsidencia en Japón	45
1.2.4. Subsidencia en Italia	46
1.2.4.1. Venecia	48
1.2.4.1.1. Marco hidrogeológico	48
1.2.4.1.2. Desarrollo del bombeo y trayectoria del nivel piezométrico	48
1.2.4.1.3. Registros de subsidencia	49

1.2.4.1.4. Daños y consecuencias del fenómeno	49
1.2.4.1.5. Estudio y control de la subsidencia. Medidas de recuperación del nivel piezométrico	50
1.2.4.1.6. Medidas de protección contra las inundaciones	50
1.3. CONCLUSIONES	52
CAPÍTULO 2. LA SUBSIDENCIA EN MURCIA. TOMA DE DATOS. ZONIFICACIÓN DE LA CIUDAD	
2.1. LA SUBSIDENCIA EN MURCIA	57
2.1.1. Marco hidrogeológico	57
2.1.1.1. Geomorfología	57
2.1.1.2. Climatología y meteorología	57
2.1.1.3. Hidrología superficial	57
2.1.1.4. Hidrología subterránea. El sistema acuífero de las Vegas Media y Baja del Segura	58
2.1.2. Causas del descenso del nivel piezométrico	59
2.1.2.1. La sequía	59
2.1.2.2. Otras causas	59
2.1.2.2.1. La disminución en la alimentación de agua en el terreno	59
2.1.2.2.2. Los caminos de extracción del agua	60
2.1.2.2.3. La eliminación del riesgo de inundación	61
2.1.2.2.4. El aumento de la demanda de agua	61
2.1.3. La explotación de los recursos hidrogeológicos	61
2.1.4. La situación actual de la Cuenca	62
2.1.4.1. Las dos últimas sequías. Medidas del descenso del nivel piezométrico en Murcia	62
2.1.4.1.1. La sequía de los años 80	62
2.1.4.1.2. La sequía de los años 90	63
2.1.4.2. Estado general de los acuíferos	64
2.1.5. Registros de subsidencia y danos provocados	64
2.1.5.1. Valores de asiento del terreno	64
2.1.5.2. Situación de los edificios con danos	65
2.1.5.3. Danos generales	66
2.1.5.4. Exigencias de responsabilidades	69
2.1.5.5. Relación entre las lesiones y las tipologías estructurales y de cimentación	69
2.1.5.5.1. Distribución de las lesiones en función de la altura de los edificios	69
2.1.5.5.2. Variación de las lesiones según el tipo de cimentación	70
2.1.5.5.3. Relación de las lesiones con las soluciones que combinan diferentes tipologías estructurales y de cimentación	75
2.1.5.6. Estabilización de los asientos	75

2.2. ESTUDIO DEL TERRENO DE LA CIUDAD DE MURCIA	75
2.2.1. Datos para el estudio	75
2.2.2. El perfil del terreno en Murcia	75
2.2.2.1. Caracterización general	75
2.2.2.2. Distribución de la potencia y las profundidades de los estratos en el casco urbano de Murcia	76
2.2.2.2.1. <i>Profundidad del relleno (capas 1)</i>	76
2.2.2.2.2. <i>Espesor y profundidad del muro de la capa de arcilla (capas 2)</i>	76
2.2.2.2.3. <i>Espesor y profundidad del muro de la capa de arena (capas 3)</i>	77
2.2.2.2.4. <i>Profundidad del techo y fondo de la capa de gravas (capa 4)</i>	77
2.2.2.3. Corte medio del terreno del casco urbano de Murcia	78
2.2.3. Estratos del subsuelo de Murcia y propiedades geotécnicas	79
2.2.3.1. Estratos del subsuelo de Murcia	79
2.2.3.2. Valores medios de los parámetros geotécnicos	80
2.2.4. Ensayos edométricos	80
2.3. ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN PIEZOMÉTRICA DE LA CIUDAD DE MURCIA	81
2.3.1. Datos del nivel piezométrico en Murcia	81
2.3.1.1. Fuentes de procedencia de los datos	81
2.3.1.2. Evolución general	82
2.3.1.2.1. <i>Variaciones estacionales</i>	82
2.3.1.2.2. <i>Variaciones interanuales</i>	82
2.3.2. Estudio de las variaciones piezométricas interanuales	83
2.3.2.1. Evolución piezométrica de cada localización	83
2.3.2.2. Distribución de las variaciones piezométricas en el casco urbano	83
2.3.2.3. Zonificación piezométrica del casco urbano de Murcia	84
2.3.2.4. Elección de los pozos con mayores descensos del nivel piezométrico	85
2.4. LAS CIMENTACIONES DE LOS EDIFICIOS DE MURCIA	86
2.5. CONCLUSIONES	87

CAPÍTULO 3. **EL USO DE LA CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL EN LA PREDICCIÓN DE LA SUBSIDENCIA PARA UN DESCENSO CONOCIDO DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO**

3.1. EL ESTUDIO DE LA SUBSIDENCIA. UNA REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	91
3.1.1. Revisión de modelos adoptados en el estudio de la subsidencia	91
3.1.2. La solución unidimensional para la subsidencia	91

3.2. LA ECUACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA LA SUBSIDENCIA DE UN SUELO SATURADO	92
3.2.1. Soluciones explícitas	94
3.2.1.1. Solución general	94
3.2.1.2. Variación lineal de h	98
3.2.2. Resolución por métodos de cálculo numérico	101
3.2.2.1. Cálculo de presiones intersticiales	101
3.2.2.1.1. <i>Diferencias finitas</i>	101
3.2.2.1.2. <i>Método de predictor-corrector</i>	103
3.2.2.2. Cálculo de asientos	104
3.3. LA ECUACIÓN UNIDIMENSIONAL PARA LA SUBSIDENCIA DE UN SUELO PARCIALMENTE SATURADO	118
3.3.1. Resolución por diferencias finitas	122
3.3.2. Resolución por el método de predictor-corrector	127
3.4. LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL EN UN ESTRATO COMPRESIBLE PROFUNDO SEGÚN SU CONSOLIDACIÓN	135
3.5. CONCLUSIONES	139
CAPÍTULO 4. CÁLCULO DE LA SUBSIDENCIA PRODUCIDA EN LAS LOCALIZACIONES MÁS DESFAVORABLES DE MURCIA	
4.1. SELECCIÓN DE SONDEOS REPRESENTATIVOS	143
4.1.1. Conceptos de elección	143
4.1.2. Datos de los puntos seleccionados	143
4.2. CÁLCULO DE LA SUBSIDENCIA	144
4.2.1. Sondeo S'13. Pozo P17	144
4.2.2. Sondeo S'46. Pozo P20	148
4.2.3. Sondeo SR1. Pozo P35	152
4.2.4. Sondeo S'16. Pozo P34	156
4.2.5. Sondeo S'18. Pozo P58	159
4.2.6. Sondeo S1. Pozo P18	163
4.3. CONCLUSIONES. CUADRO RESUMEN DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS	167

CAPÍTULO 5. CÁLCULO DE ROZAMIENTO NEGATIVO EN PILOTES PRODUCIDO POR LA SUBSIDENCIA UNIDIMENSIONAL

5.1. EFECTO DE LA SUBSIDENCIA SOBRE LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS	171
5.1.1. Interacción suelo-cimentación	171
5.1.2. Rozamiento negativo en pilotes provocado por la subsidencia	171
5.1.2.1. Origen del fenómeno	171
5.1.2.2. Resistencia del pilote con rozamiento negativo	172
5.1.2.3. Desarrollo del fenómeno según el tipo de pilote	173
5.1.2.4. Influencia de la tasa de asiento del terreno	175
5.1.2.5. Rozamiento negativo en pilotes cargados inicialmente en cabeza	175
5.2. MÉTODO DE CÁLCULO	176
5.2.1. Revisión de los métodos de cálculo empleados para el rozamiento negativo en pilotes	176
5.2.2. Método elasto-plástico para el cálculo de pilotes	177
5.2.2.1. Hipótesis de cálculo	177
5.2.2.2. Datos de partida	177
5.2.2.3. Proceso de cálculo	178
5.2.2.4. Salida de resultados	180
5.2.3. Incorporación de la subsidencia	180
5.2.3.1. Modificación del programa	180
5.2.3.2. Chequeo del programa	181
5.2.3.2.1. <i>Pilote columna</i>	181
5.2.3.2.2. <i>Pilote flotante</i>	182
5.3. CÁLCULO DEL ROZAMIENTO NEGATIVO EN LOS PUNTOS DE MURCIA MÁS DESFAVORABLES EN CUANTO A LA SUBSIDENCIA	186
5.3.1. Pilotes	186
5.3.1.1. Sondeo S'25. Pozo P39	186
5.3.1.1.1. <i>Pilote empotrado</i>	187
5.3.1.1.2. <i>Pilote flotante</i>	190
5.3.1.2. Sondeo S'46. Pozo P20	193
5.3.1.2.1. <i>Pilote empotrado</i>	193
5.3.1.3. Sondeo S1. Pozo P18	196
5.3.1.3.1. <i>Pilote empotrado</i>	197
5.3.1.3.2. <i>Pilote flotante</i>	200
5.3.2. Micropilotes	203
5.3.2.1. Sondeo S'16. Pozo P34	203
5.3.2.1.1. <i>Micropilote empotrado</i>	204
5.3.2.1.2. <i>Micropilote flotante</i>	207

5.3.2.2. Sondeo S1. Pozo P18	210
5.3.2.2.1. Micropilote empotrado	210
5.3.2.2.2. Micropilote flotante	213
5.4. CONCLUSIONES. CUADRO RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE ROZAMIENTO NEGATIVO REALIZADOS	216
CAPÍTULO 6. EFECTOS SOBRE LOS EDIFICIOS. MEDIDAS CONTRA LA SUBSIDENCIA. CONCLUSIONES GENERALES	
6.1. EFECTOS SOBRE LOS EDIFICIOS	223
6.1.1. El asiento del terreno	223
6.1.1.1. Los asientos diferenciales	223
6.1.1.2. Relación con la normativa	224
6.1.1.3. Recuperación de los asientos	225
6.1.2. Relación de los asientos con las tipologías de cimentación	225
6.2. ACTUACIONES PARA FRENAR LA SUBSIDENCIA EN MURCIA	227
6.2.1. Necesidad de creación de una comisión de seguimiento	227
6.2.2. Medidas contra la subsidencia	227
6.2.2.1. Medidas para la recuperación del nivel piezométrico	227
6.2.2.2. Medidas a nivel de proyecto	229
6.2.2.3. Medidas en los edificios con danos	230
6.3. CONCLUSIONES GENERALES	231
6.4. APORTACIONES. UTILIDAD DEL TRABAJO	236
6.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ABIERTAS	237
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	241

PRÓLOGO

Siempre resulta reconfortante presentar un nuevo libro. Además, en este caso, se trata del resultado de una investigación científica, constante y metódica, realizada completamente en el Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno de la Universidad de Sevilla, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, que comenzó en el año 97 y aún continúa.

La publicación se lleva a cabo patrocinada por tres instituciones: la Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transportes de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, ASEMAS (Mutua de Seguros y Reaseguros a Prima Fija), y la Universidad Hispalense, a través del Departamento de Mecánica de Medios Continuos, Teoría de Estructuras e Ingeniería del Terreno y la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.

El libro desarrolla, en esencia, un proceso para el análisis de la subsidencia del suelo originada por la extracción de agua desde acuíferos, y lo aplica al caso producido en Murcia durante la sequía de los 90. Además hace un estudio de la repercusión que el fenómeno tiene sobre los edificios y, en concreto, sobre las cimentaciones profundas, mediante el rozamiento negativo, proponiendo un método de cálculo del mismo.

Por lo tanto, resulta de gran interés en la evaluación y predicción de los movimientos del terreno, en cuanto a que nuevas épocas de prolongada ausencia de lluvia puedan llevar a futuros asentamientos generalizados en el casco urbano de Murcia o en cualquier otro lugar. Este hecho, sin precedentes en España hasta los años 90, ya no puede considerarse fortuito, imprevisible o inevitable. Desde el momento en el que se produjo por vez primera, la Administración tiene la obligación de tomar las medidas necesarias para evitar o disminuir los daños derivados de la subsidencia ocasionada por el bombeo indiscriminado de agua subterránea.

La estructura del trabajo de investigación que ve la luz con este libro deriva de una planificación meticulosa basada en seis capítulos:

1. En el primero se define la subsidencia terrestre y se encuadra su importancia a través de un repaso de los casos más relevantes producidos a lo largo de la Historia.
2. En el segundo se estudia el marco físico que afecta a la subsidencia que se ha producido en la ciudad de Murcia, mediante la observación de los asentamientos registrados, las lesiones que han causado, las propiedades geotécnicas del suelo, la evolución piezométrica desde 1972 y las soluciones de cimentación más usuales.
3. En el tercero se presenta el núcleo científico de la publicación. Comienza con la consideración de la consolidación unidimensional como el medio más adecuado para analizar el fenómeno de la subsidencia. A continuación se plantea la formulación necesaria para obtener las variaciones de la presión intersticial, y los asentamientos que provocan, según tres

teorías: considerando al suelo saturado, saturado-parcialmente saturado, o saturado con una teoría no lineal para la consolidación. Según los casos, se ensayan soluciones explícitas exactas o por métodos de cálculo numérico, que pueden consistir en diferencias finitas explícitas, o implícitas, mediante el método de predictor-corrector. En todas las ocasiones el modelo se va comprobando y ajustando mediante cálculos realizados sobre las propiedades de uno de los puntos más representativos de la estratigrafía de la ciudad de Murcia. Se llega a la conclusión de que el método de predictor-corrector en los suelos saturados-parcialmente saturados es el que permite una aplicación más amplia.

4. En el cuarto se calculan los valores del hundimiento del terreno producido en las localizaciones más desfavorables del casco urbano de Murcia. La elección se realiza sobre la base de las variaciones del nivel piezométrico, el espesor y la resistencia del estrato compresible. Para ello, se utiliza la formulación más general de las estudiadas, con la que se llega a resultados del mismo orden de magnitud que los conocidos durante la última sequía.
5. En el quinto se estudia uno de los principales efectos que la subsidencia provoca sobre las cimentaciones profundas: el rozamiento negativo. Se usa un método elasto-plástico para el cálculo de pilotes en un suelo que asienta y se aplica al suceso de la subsidencia en Murcia. Se tienen en cuenta tanto los pilotes como los micropilotes.
6. En el sexto se hacen consideraciones sobre las consecuencias que el asiento del terreno causa en los edificios. También se establece una serie de actuaciones encaminadas a frenar la subsidencia, en tres niveles: la recuperación del nivel piezométrico, las medidas que deben tomarse en el proyecto de nuevos edificios y en aquellos que ya hayan sufrido danos. Por último, se cierra el estudio con un apartado de conclusiones generales, insistiendo en sus aportaciones y remarcando las posibles líneas que se ofrecen abiertas a su continuación.

No debemos entender que toda investigación lleva hacia una meta, detrás de la cual no hay nada. Muy al contrario, una búsqueda rigurosa, seria y, al mismo tiempo, imaginativa, no tiene como objetivo una solución final, sino que dicha solución sea el punto de partida de futuras tareas, pues, al alcanzarla, se habrán formulado nuevos problemas. El planteado en Murcia durante la sequía de los años 90 necesitaba una mirada desde fuera, una investigación dentro de la Mecánica de los Medios Continuos, como punto de partida de un largo camino que recorrer.

Para atacar el reto con posibilidades de éxito resultaba obligado disponer de un conjunto de datos significativos, en número y en importancia: una información fidedigna sobre las variaciones del nivel piezométrico en los acuíferos de la ciudad, ensayos geotécnicos suficientemente fiables para un adecuado conocimiento del terreno afectado y la recopilación de medidas de una extensa red de nivelaciones que informaran sobre los movimientos de la superficie del suelo y permitieran el ajuste de los distintos modelos propuestos para la prevención del fenómeno.

Este último punto es en el que debe basarse la prolongación del trabajo. Para ello, resulta imprescindible el compromiso de las Administraciones Públicas de Murcia en el establecimien-

to de una malla de nivelaciones en el casco urbano, con la suficiente precisión como para que ofrezcan un detallado seguimiento de los asientos del terreno ante nuevos movimientos del nivel piezométrico y hagan posible el control de la subsidencia provocada por ellos.

Esta investigación no ha recibido subvención alguna de ningún organismo público ni privado, lo que constituye un ejemplo de hasta donde puede llegar el interés de los autores por la Ciencia y por resolver un importante problema a una ciudad, en la que se han producido danos a edificios e instalaciones urbanas.

Esperamos que el libro pueda servir para que esta investigación se prosiga con medios suficientes para evitar que la próxima sequía coja desprevenida a la ciudad de Murcia.

Sevilla, abril de 2002

José Orad Aragón

Director de la Escuela Técnica Superior
de Arquitectura de Sevilla

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN
RECORRIDO HISTÓRICO

1.1. INTRODUCCIÓN

1.1.1. Definición de subsidencia terrestre

La subsidencia terrestre es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie de la Tierra en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas (Corapcioglu, 1984).

1.1.2. Importancia del fenómeno

Los movimientos verticales y laterales de la superficie terrestre han ocurrido en muchas partes del mundo a lo largo de la Historia (ver 1.2). El fenómeno representa uno de los mayores cambios medioambientales que se ha impuesto sobre el ecosistema en el siglo XX. Con el incremento de la población, la construcción de urbanizaciones en grandes áreas y el desarrollo de la industrialización, sus consecuencias han cobrado gran importancia. En particular, tras la II Guerra Mundial, la subsidencia se ha convertido en un riesgo geológico reconocido mundialmente.

La velocidad con la que suceden puede variar desde extremadamente alta, desarrollándose en segundos, hasta muy baja, cuando la consolidación se produce en largos períodos de tiempo, por ejemplo, miles de años. En este segundo caso es menor su repercusión ingenieril e impacto sobre las actividades humanas. La superficie afectada por la subsidencia también recorre todas las escalas, con áreas que ocupan desde unos pocos metros cuadrados hasta miles de kilómetros cuadrados.

El número de sucesos se ha incrementado alarmantemente. Cuando los movimientos son causados por el hombre se desarrollan en cortos períodos de tiempo, con el consiguiente peligro para las construcciones. Algunos ejemplos de los efectos de la subsidencia son la interrupción de los gradientes de los arroyos naturales, canales y drenajes, la inversión del sentido del flujo del agua en las acequias de riego, la quiebra de las cubiertas de los pozos, el fallo de los estribos de los puentes o los mapas topográficos fuera de fecha antes de su publicación.

En las áreas urbanas los perjuicios son ilimitados, afectando a los edificios, las instalaciones y los pavimentos. Han aparecido grietas en la construcciones, desarreglos en las carreteras y vías de ferrocarril, roturas de conductos de alcantarillado y de suministro de agua. En algunas regiones se han provocado inundaciones.

1.1.3. Factores causantes de la subsidencia

Según Prokopovich (1979), en un sentido puramente genético se puede clasificar la subsidencia según dos grupos de factores: exogénicos y endogénicos (Vázquez, 2001).

La subsidencia endogénica se refiere esencialmente a los procesos que se originan dentro del planeta, tales como pliegues, fallas, volcanismo o deriva continental.

La exogénica, a los que nacen cerca de la superficie terrestre, y consiste en una expresión superficial de la compactación de depósitos profundos debida a causas naturales o inducidas por el hombre. Se puede subdividir, a su vez, en la provocada por el traslado de sólidos (minería, Karst) y la causada por un incremento de la carga en los estratos por la extracción de fluidos. Dependiendo del carácter de la carga, esta forma de subsidencia puede deberse a un aumento de presión total o efectiva. Un ejemplo de la primera es la relacionada con el descenso de masas de agua no confinadas en el suelo. Del segundo grupo se puede citar la extracción desde sistemas acuíferos confinados de agua, crudo o gas.

Los mecanismos que desencadenan la subsidencia son examinados con detalle por Scott (1979). Entre todos destaca la extracción de fluidos desde reservas y manantiales subterráneos, que pueden ser petróleo, agua subterránea, gas o vapor de agua.

1.1.4. Subsidencia causada por la extracción de agua desde acuíferos confinados

La explotación mundial de petróleo, gas y aguas geotermales ha creado muchas áreas de subsidencia terrestre en las que han sido provocados grandes daños. Pero, según Corapcioglu y Brutsaert (1977), el fenómeno es más corriente cuando se saca agua en exceso que en los campos petrolíferos o de gas. La extracción de agua del subsuelo destaca entre todas las causas por su importancia y significación. Señalan, asimismo, que las zonas de subsidencia importante corresponden al bombeo desde acuíferos confinados, y que no se ha observado asientos, ni siquiera con nivelación de precisión, cuando el bombeo se realiza exclusivamente desde acuíferos libres, es decir, sin confinar. La primera vez que se relacionó la subsidencia con el traslado de agua fue en 1908 (Fuller).

La bajada del nivel piezométrico en el terreno reduce la presión intersticial del agua en los poros del suelo y, como consecuencia, aumenta la presión efectiva, que en un suelo saturado es igual a la presión total menos la presión del agua.

$$' = - u \quad [1.1]$$

En la zona situada por encima del nivel piezométrico el agua se encuentra a presión negativa, es decir, inferior a la atmosférica, y la presión efectiva no siempre obedece a la ley citada, pero la disminución de la presión del agua también produce una disminución de volumen; en cualquier caso, en arcillas plásticas, para succiones inferiores a 500 kPa, sigue siendo válido con frecuencia el principio [1.1] (Lytton, 1977). Esto da lugar a un proceso de consolidación del terreno que puede originar asientos considerables y, si afecta a una superficie extensa, a un descenso generalizado de todo el área.

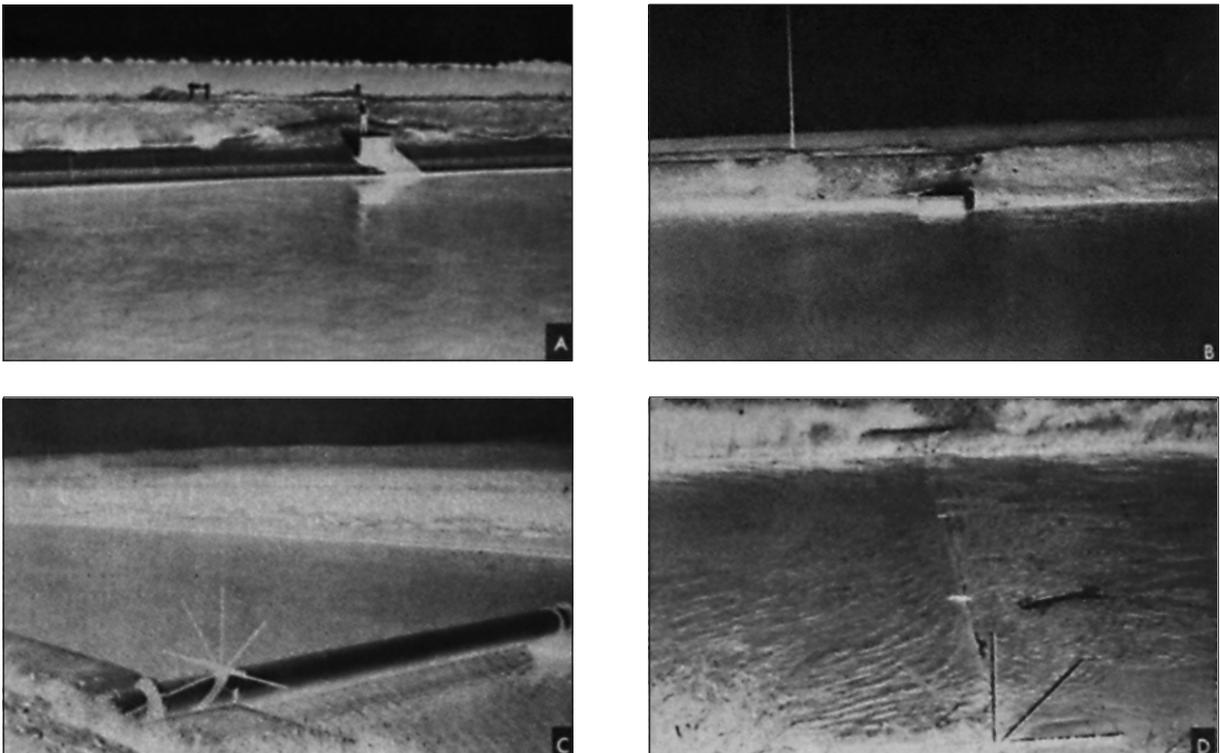
La compactación es el resultado del lento escape del agua en los poros del estrato cuya tensión efectiva aumenta, pues se ve acompañado por una transferencia gradual de tensión desde el agua de los poros a la estructura granular del suelo. La presión efectiva aumenta y la compactación en el estrato que contiene al agua comienza a ocurrir tan rápidamente como el agua pueda moverse. El ajuste del incremento de tensión aplicado se puede llevar años, e incluso décadas, en capas gruesas, de grano fino y drenaje lento, mientras que será rápido en los acuíferos de grano grueso. El valor de la deformación dependerá de la magnitud del incremento de tensión efectiva que se produce, de la compresibilidad y el espesor de los estratos, del tiempo durante el que se aplican las tensiones, de la velocidad de aplicación y del tipo de tensión.

Por lo tanto, gran parte de la compactación ocurre en los estratos arcillosos de grano fino (acuítardos), que son los más compresibles pero que tienen baja permeabilidad. La salida del agua, al disminuir la presión en los poros, y el incremento de presión efectiva son lentos y dependientes del tiempo, aunque la compactación última es grande. Parte de este descenso no puede recuperarse con nuevos aportes de agua, lo que provoca una disminución permanente en el volumen de suelo.

La figura 1.1 muestra un ejemplo de los efectos de la subsidencia provocada por la extracción desde el sistema acuífero confinado sub-Corcorán, en el valle de S. Joaquín, en California (ver 1.2.2.2). En la imagen *A* aparecen las paredes de hormigón del canal y un desagüe en un tramo estable, mientras que en la *B* tenemos los mismos elementos en un tramo que ha asentado. El desagüe ha quedado inutilizado y la pared del canal sumergida. En las imágenes *C* y *D* aparecen las paredes de hormigón del canal y un conducto que cruza en una zona estable y en otra que ha experimentado subsidencia.

Figura 1.1

Subsidencia provocada por la extracción de agua en el Valle de San Joaquín, California (Prokopovich, 1979)



1.2. CASOS DE SUBSIDENCIA REGISTRADOS EN EL MUNDO A LO LARGO DE LA HISTORIA

En las tablas 1.1 a 1.4 quedan recogidos los datos fundamentales de los casos más relevantes de subsidencia provocada por la extracción de agua del terreno que han ido ocurriendo en el mundo a lo largo de la Historia (Vázquez, 2001).

A continuación se detallan los experimentados en Ciudad de Méjico, Arizona Central, el Valle de S. Joaquín en California, Japón e Italia. Otros registros de menor entidad se han producido en Bangkok (Tailandia), Taipei (Taiwan), Londres (Inglaterra) o Las Vegas (EE.UU.).

1.2.1. La Cuenca de Méjico

La tabla 1.1 refleja los sucesos más notables de la Cuenca de Méjico (Vázquez, 2001).

1.2.1.1. El área metropolitana de Ciudad de Méjico

1.2.1.1.1. Marco hidrogeológico

El área metropolitana de Ciudad de Méjico, con una población cercana a los 20 millones de personas, depende principalmente de los recursos subterráneos para el suministro de agua doméstica e industrial. Una buena parte se obtiene de un depósito extensivo de material aluvial que conforma un acuífero granular semiconfinado del Terciario bajo un acuitardo compuesto de sedimentos del Cuaternario altamente compresibles y extremadamente porosos (60-90%), de espesor variable (10-100 m en Ciudad de Méjico), que contiene una cantidad apreciable de arcilla y un alto porcentaje de materia orgánica (tabla 1.1).

La ciudad se localiza casi completamente en la llanura lacustre, dentro de la cuenca, y se encuentra rodeada por montañas volcánicas (ver figura 1.2). La cuenca está hidrológicamente cerrada y, por ello, el suelo estuvo ocupado por una serie inmóvil de lagos interconectados hasta finales del siglo XVIII, fecha en la que se construyó un sistema de drenaje artificial.

En la actualidad una red de canales superficiales dirige las fugas provocadas por las tormentas y las pérdidas del agua industrial y doméstica hacia el principal canal de drenaje, situado en el norte. A él se le ha añadido un conjunto de profundos túneles para conducir las crecientes tasas de flujo, derivadas del incremento progresivo de la extracción de agua subterránea local y de la introducción de agua adicional traída a la cuenca desde reservas distantes para atender a una demanda cada vez mayor.

Tabla 1.1
Resumen de casos de subsidencia registrados en la Cuenca de Méjico

Emplazamiento	Periodo de observación	Caudal	Tasa de asiento	s_{max}	Suelo Tipo y espesor	Descenso nivel piezom. (- h)		s/(- h)	Referencias
						Tasa	Total		
Área metropolitana de Ciudad de Méjico	1854-1959			750	Sedimentos lacustres Cuaternario c limosa y s Acuífero granular Terciario 700 m		35	21,4	Bouwer, 1977 Carbognin et al., 1978 Figueroa, 1977 Placzek, 1989 Ricceri y Butterfield, 1974 Scott, 1979
	1891-1973		4,5	> 850			16		
	1891-1938			800			33		
	1938-68		7,6						
	1938-48		44						
	1948-50		46						
1950-51	9				3				
1951-70					3				
1973			5						
Cuenca Chalco	1970's	5	12,5		Ídem anterior Espesor máx. acuitardo 300 m Espesor máx. acuífero 400 m				Ortega-Guerrero et al., 1999
	1984-91	7,8	40	800		0,5			
	1950's-91					1,5	30	27	

Leyenda:
c = arcilla
s = arena

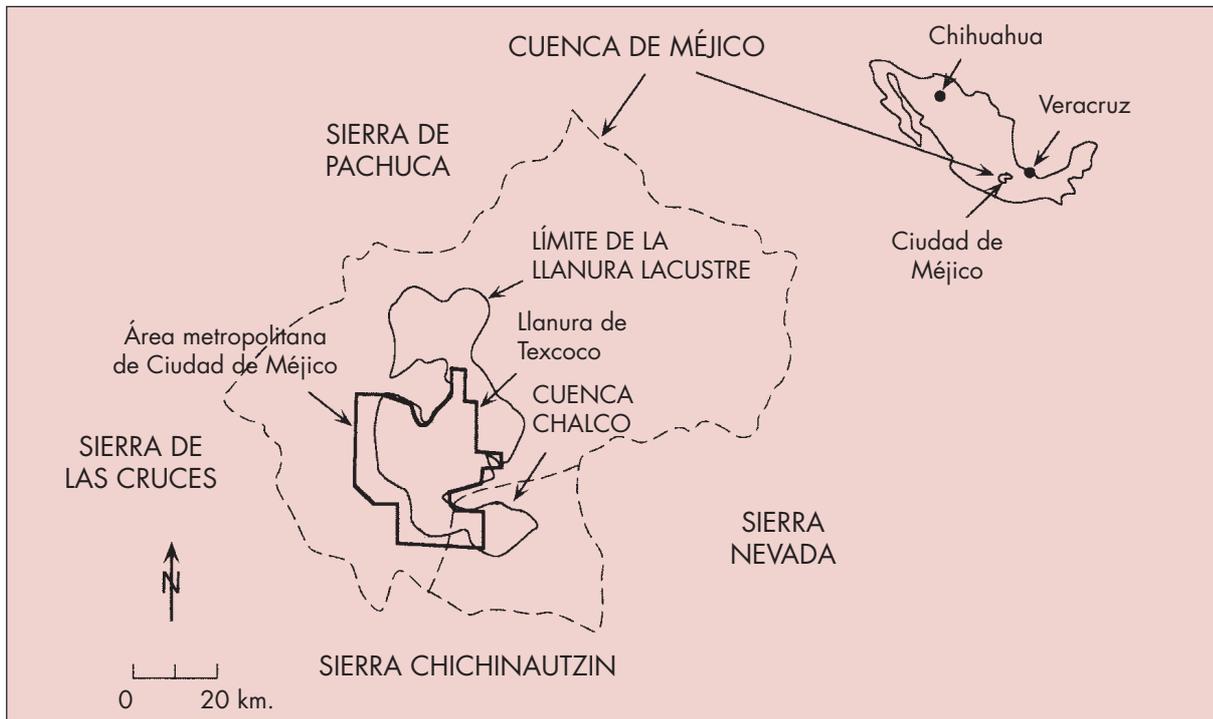
g = grava
m = limo

H = Holoceno
Pl = Pleistoceno

P = Plioceno

* máximo
+ agua inyectada

Figura 1.2
Cuenca de Méjico (Ortega-Guerrero et al., 1999)



1.2.1.1.2. Reconocimiento histórico del problema

Uno de los problemas más graves que ha tenido Ciudad de Méjico a lo largo de su historia ha sido la subsidencia provocada por el bombeo de agua subterránea. El fenómeno, que comenzó durante el siglo XIX, fue descubierto en 1925 por Roberto Gayol, autor del proyecto del alcantarillado de Ciudad de Méjico y director de las obras de su construcción. En 1924 fue culpado del hundimiento de la estructura hidráulica de S. Lázaro, situada en la cabecera del principal canal de la ciudad. Sin embargo, demostró ante la Asociación de Ingenieros y Arquitectos de la Ciudad de Méjico que la causa era el descenso generalizado del fondo del valle, mediante la comparación de dos nivelaciones de precisión de un monumento localizado cerca de la Catedral, tomadas en 1877 y 1924. Gayol atribuyó el fenómeno al efecto drenante del sistema de saneamiento recién construido.

El primer reconocimiento de la relación de la subsidencia terrestre con el bombeo de agua del subsuelo apareció en la literatura geotécnica, de manos de Cuevas (1936). Como Ciudad de Méjico creció rápidamente en los años 30, aumentó la demanda de agua y se radicalizaron los problemas relacionados con el descenso del terreno. En 1948, Nabor Carrillo demostró, basándose en la Teoría de Consolidación de Terzaghi, que la subsidencia de la ciudad se debía a la extracción de agua subterránea desde los acuíferos situados a profundidades entre 30 y 50 m para usos doméstico, industrial y municipal (Figuroa, 1977). La causa del asiento reside en el descenso en la presión del agua debido a un bombeo, particularmente fuerte en el centro de la ciudad, que supera a las aportaciones de la lluvia, riego o filtración de corrientes superficiales y profundas. Este descenso produce un incremento en la presión efectiva y, a raíz de ello, un asiento (ver [1.1]).

1.2.1.1.3. Seguimiento hidrológico y geotécnico

En un principio el agua era proporcionada por los manantiales localizados en la zona inferior de las montañas, al oeste de la ciudad. En 1860 se perforó el primer pozo profundo para suministrar agua a una piscina pública y a partir de entonces se generalizó el bombeo en toda la zona. En 1890 desaparecieron las fuentes más cercanas, situadas en el bosque de Chapultepec. Es probable que el descenso del nivel piezométrico y la subsidencia empezaran por la misma fecha. A principios del siglo XX todos los pozos de la ciudad eran artesianos.

La Comisión Hidrológica del Valle de México (C.H.M.V.), autoridad responsable de los recursos de agua, comenzó en 1950 la instalación de una red de más de 300 piezómetros que se extendían por toda la llanura lacustre, y cuya situación fue estudiada especialmente para proporcionar información sobre la variación de la presión del agua en los poros de los sedimentos. Se establecieron seis niveles diferentes de supervisión, cuyas profundidades variaban entre la proximidad a la superficie y unos 100 m. Estos grupos de piezómetros, muchos de los cuales aún funcionan hoy, han proporcionado una información histórica de incalculable valor acerca de los cambios en la presión intersticial del acuífero.

Al mismo tiempo, durante los años 50, se realizó una profunda investigación para hallar las características físicas de los sedimentos lacustres. Se determinó la compresibilidad y el contenido volumétrico de agua, resultando ambos con valores altísimos, por lo que fueron los causantes de una capacidad potencial de asiento sin precedentes.

1.2.1.1.4. Registros y consecuencias de la subsidencia

Carbognin et al. (1978) dicen que en el período entre 1854 y 1959 una subsidencia máxima de 750 cm correspondió a un descenso del nivel piezométrico de 35 m, de donde resulta una ratio entre asiento de subsidencia y variación del nivel piezométrico, $s/(-h)$, de 21,43 cm/m. Ricceri y Butterfield (1974) dan un promedio de 16 cm/m para dicho cociente (tabla 1.1).

La subsidencia ha sido cuantificada con nivelaciones de precisión que arrancan de 1891 (Figueroa, 1977). Desde 1952 estas nivelaciones se han extendido a toda la superficie de la ciudad. Como media, la parte más antigua tuvo una tasa de subsidencia de 4,5 cm/año de 1891 a 1938, 7,6 cm/año de 1938 a 1948, con máximos de 44 cm/año de 1948 a 1950 y 46 cm/año de 1950 a 1951, correspondientes a una bajada del nivel piezométrico de 3 m/año (Scott, 1979). En esta fecha el bombeo llega a su cenit de 9 m³/s y se mantiene estable hasta 1970.

En general coinciden las zonas donde se ha medido la máxima subsidencia con aquellas en la que hay una mayor profusión de casos. El máximo asiento se ha observado en los límites de la ciudad más antigua y su valor supera los 850 cm (tabla 1.1), lo que no significa, sin embargo, que sea el extremo absoluto. Bouwer (1977) apunta un asiento de

800 cm entre 1938 y 1968. Como promedio, desde 1960 la subsidencia ha alcanzado más de 300 cm en el área metropolitana completa (Scott, 1979).

La construcción de nuevas fuentes de agua para el abastecimiento de la ciudad y las restricciones del bombeo por parte de la legislación en el centro de Ciudad de Méjico redujeron la dependencia de los pozos, lo que hizo que la tasa de subsidencia descendiera considerablemente, disminuyendo a 5 cm/año en los años setenta (tabla 1.1). En cuanto al área total ocupada por la ciudad, también ha sido disminuida la máxima tasa de subsidencia de 14 cm/año correspondiente al período 1952-59 a 6 cm/año en 1970-73.

Los problemas causados por la subsidencia son de varios tipos: daños en edificios, cimentaciones, pavimentos, sistemas de transportes e instalaciones como redes de agua corriente y saneamiento. Sin embargo, el más importante podría ser el derivado de una posible inundación de la ciudad por las aguas del alcantarillado. Este agua ahora tiene que ser bombeada al canal principal, que se encontraba inicialmente bajo el nivel general de la ciudad. Aunque el riesgo ha disminuido por la citada construcción de túneles profundos de alcantarillado, aún sigue presente pues el canal principal se mantiene en servicio. Además, la subsidencia futura podría llegar a poner en peligro al conjunto de túneles profundos e, incluso, al metro.

En cuanto a la repercusión sobre la edificación, hay que añadir continuamente escalones a los edificios pilotados al quedar separados del terreno. Incluso se colocan gatos entre el pilote y los pilares para ir bajando la construcción a medida que asienta la superficie del suelo. Un ejemplo de edificio con grandes asientos, a pesar de los recalces realizados, es el Palacio de Bellas Artes, donde la planta baja se ha convertido en planta sótano, debido al descenso del edificio respecto al nivel de la calle (Jiménez Salas et al., 1980; Jaramillo, 1997).

1.2.2. Subsidencia en EE.UU.

La subsidencia en EE.UU. se ha desarrollado a partir de la II Guerra Mundial como consecuencia de la extracción de agua subterránea para satisfacer las crecientes necesidades de agua, petróleo y gas del terreno (Vázquez, 2001).

La mayoría de las partes afectadas se extienden a lo largo de las costas, donde el fenómeno se hace más evidente por la subida del nivel del agua del mar o de los lagos existentes. Hay zonas muy pobladas y en las que se desarrolla una industria muy importante que son protegidas de inundaciones mediante la construcción de un caro y complicado sistema de diques, presas y estaciones de bombeo. Por otra parte, la subsidencia a menudo se desarrolla en un área extensa y con una velocidad baja, de manera que no se hace evidente en las zonas del interior hasta que no se lleva a cabo una nivelación de precisión o se rompen los conductos subterráneos, las cubiertas de los pozos fallan o se quedan elevadas sobre la superficie del terreno, o los canales no pueden mantener por más tiempo el sentido de la corriente para el que fueron diseñados.

En la tabla 1.2 se refleja un resumen de los casos más significativos de subsidencia que se han producido en los EE.UU. Varían desde algo menos de un metro en Baton Rouge (Louisiana) hasta unos 9 m en el Valle de S. Joaquín (California). La extensión superficial, desde 10 km² en el Valle de S. Jacinto hasta cerca de 14.000 km² en el Valle de S. Joaquín, ambos en California (Johnson, 1992).

1.2.2.1. Arizona Central

1.2.2.1.1. Origen del fenómeno

Las grandes presas de los ríos de Arizona Central proporcionaban inicialmente el agua necesaria para el desarrollo agrícola e industrial. Si a estas posibilidades se les agrega un clima soleado, seco y apacible, Arizona se convierte en un lugar deseable para vivir. Entre 1970 y 1975 el aumento de población fue de un 25%, la mayor tasa de crecimiento de los EE.UU.

Figura 1.3

Descensos del nivel piezométrico y fisuras terrestres en Arizona Central (Winikka y Wold, 1977)

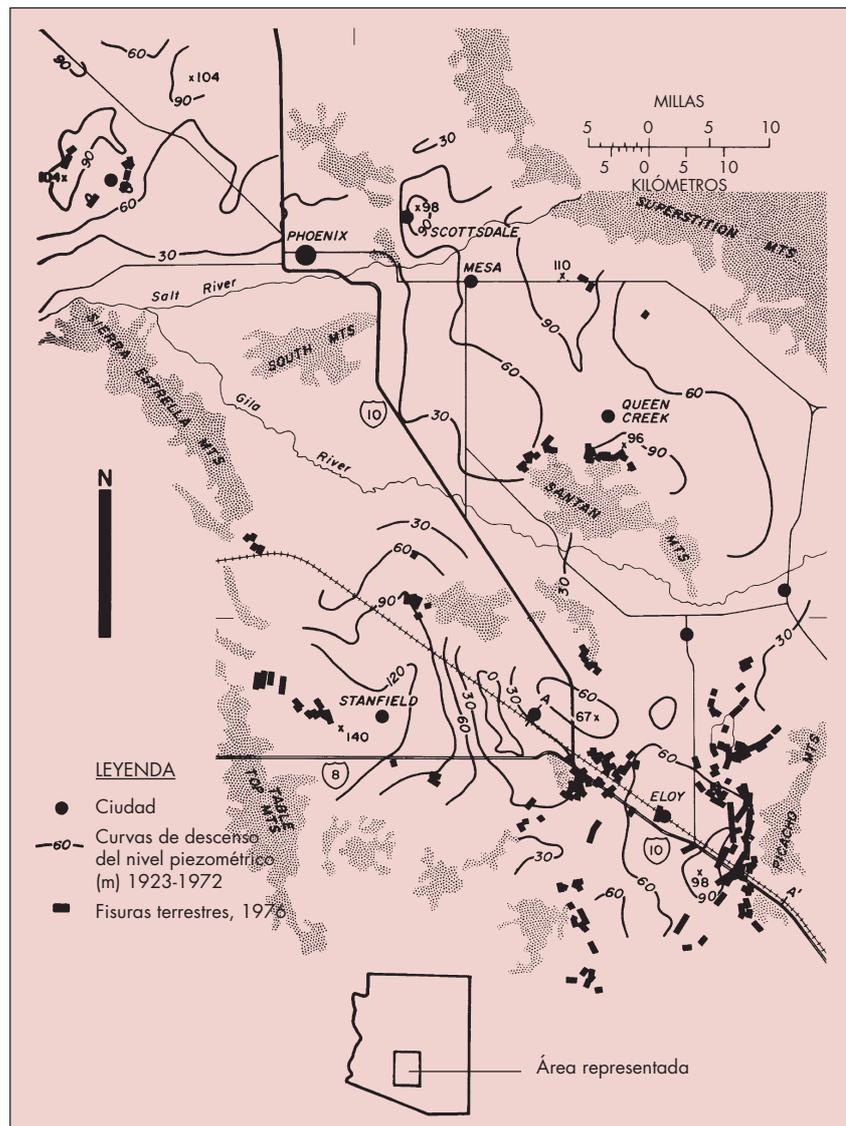


Figura 1.4

Fisura avanzando hacia las construcciones en Arizona (Winikka y Wold, 1977)



Figura 1.5

Fisura erosionada en Arizona (Bouwer, 1977)



Las crecientes exigencias de agua provocaron un aumento sin límite del bombeo, con lo que rápidamente el volumen sacado superó a la tasa de recarga. La extracción de agua del subsuelo a gran escala, principalmente para satisfacer las necesidades de riego, ha derivado en la subsidencia y en la aparición de fisuras terrestres de gran longitud (ver figura 1.3). La primera vez que se registraron las fisuras fue en 1927 y que se midió la subsidencia en 1948 (Vázquez, 2001).

1.2.2.1.2. Fisuras terrestres

En la periferia de las áreas descendentes han aparecido fisuras terrestres que atraviesan las vías de drenaje natural y actúan ellas mismas como drenaje. Por lo tanto, en las zonas sin explotar interceptan a la escorrentía superficial y en las tierras cultivables capturan el agua de riego. Bouwer (1977) afirma que estas grietas se corresponden con discontinuidades en el sustrato rocoso.

Inicialmente el ancho en superficie de las grietas es de 1-2 cm y la longitud varía entre 1 y 2 km, aproximadamente. Los movimientos descendentes y laterales del agua en las fisuras las ensanchan rápidamente cerca de la superficie, en parte debido a los desprendimientos y principalmente por la erosión de los lados. El resultado son grietas de 5 a 10 m de ancho y más de 10 km de longitud (ver figura 1.4). La profundidad final ronda los 5 a 10 m y puede haber sido mayor anteriormente pues las porciones más profundas se van rellenando por la acumulación y sedimentación de los materiales que entran en ellas (ver figura 1.5).

1.2.2.1.3. Daños y consecuencias del fenómeno

Se han producido daños en la Reserva de Picacho, las tierras agrícolas, los sistemas de distribución de agua, los pozos, los edificios, las carreteras interestatales y locales, las calles, y se ha propuesto el desvío de un gran acueducto. La subsidencia también ha causado la rotura de innumerables cubiertas de pozos y, en algunos lugares, han quedado sobresaliendo de la superficie, lo que ha requerido su modificación o sustitución.

Además la expansión residencial, industrial y comercial se ha visto afectada por el inevitable efecto de depreciación que las fisuras terrestres tienen sobre las propiedades, tanto en las zonas de desarrollo rural como en las de riego (ver figura 1.6).

En la figura 1.6 se muestra una vista aérea oblicua de la fisura tomada en abril de 1970, tres días después de que apareciera durante el riego, y una vista aérea frontal fotografiada en junio de 1974, en las que se aprecia la extensión agrícola que hubo que poner fuera de producción.

La subsidencia en Arizona Central adquirió el suficiente alcance como para que las autoridades responsables tomaran las actuaciones pertinentes. El Proyecto de Arizona Central y los de control de las inundaciones han tratado de minimizar sus efectos.

Figura 1.6
 Fisura terrestre en zona agrícola de Arizona (Winikka y Wold, 1977)



1.2.2.2. El Valle de San Joaquín en California

En la figura 1.7 aparecen las áreas de California que han sufrido subsidencia causada por la extracción de agua del terreno. Las zonas de mayor extensión y máximo asiento se han encontrado en el Valle de San Joaquín (Corapcioglu, 1984; Johnson, 1992).

1.2.2.2.1. El problema de la subsidencia

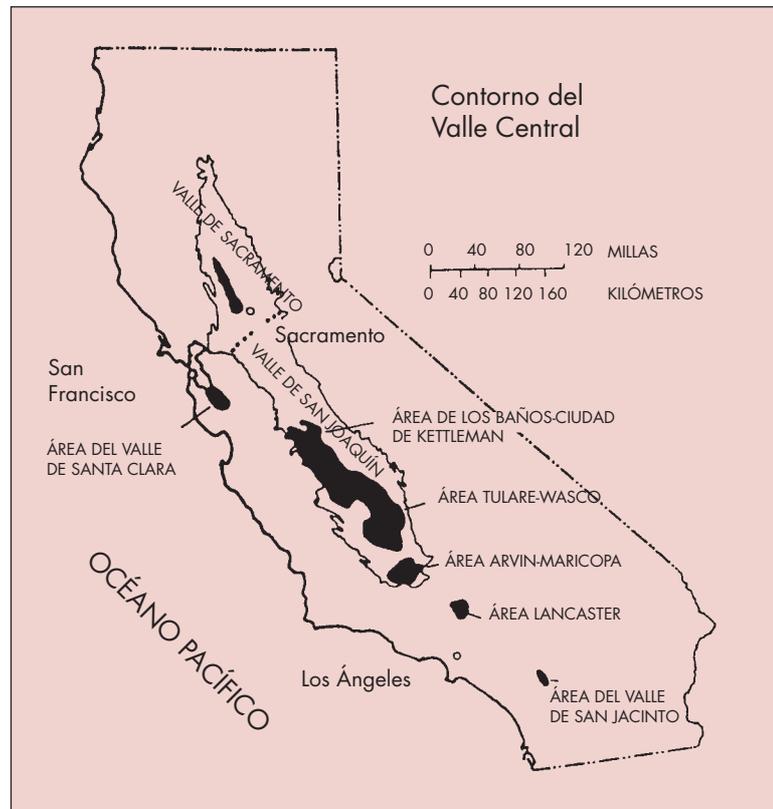
Los registros de subsidencia del Valle de S. Joaquín ocupan el primer puesto de todos los casos ocurridos en el mundo a lo largo de la Historia, compartiendo este lugar con Ciudad de Méjico. Aproximadamente la mitad del valle, lo que representa 13.500 km² de tierras agrícolas para riego, se ha visto afectada por el fenómeno y el valor máximo ha superado los 880 cm (Bouwer, 1977; Logfren, 1977).

1.2.2.2.2. Marco hidrogeológico

El Valle de S. Joaquín es una extensa y aluvial depresión estructural que ocupa dos tercios del Valle Central de California (ver figura 1.8). Mide aproximadamente 400 km de longitud y entre 40 y 90 km de ancho. El conjunto de todos los sedimentos forma una inmensa cuña que crece de este a oeste y de norte a sur. En el límite sur el espesor supera los 8.500 m (tabla 1.2). La figura 1.8 muestra la situación del valle, los principales elementos geográficos y las zonas de subsidencia.

Figura 1.7

Áreas de subsidencia causadas por la extracción de agua del terreno en California (Johnson, 1992)



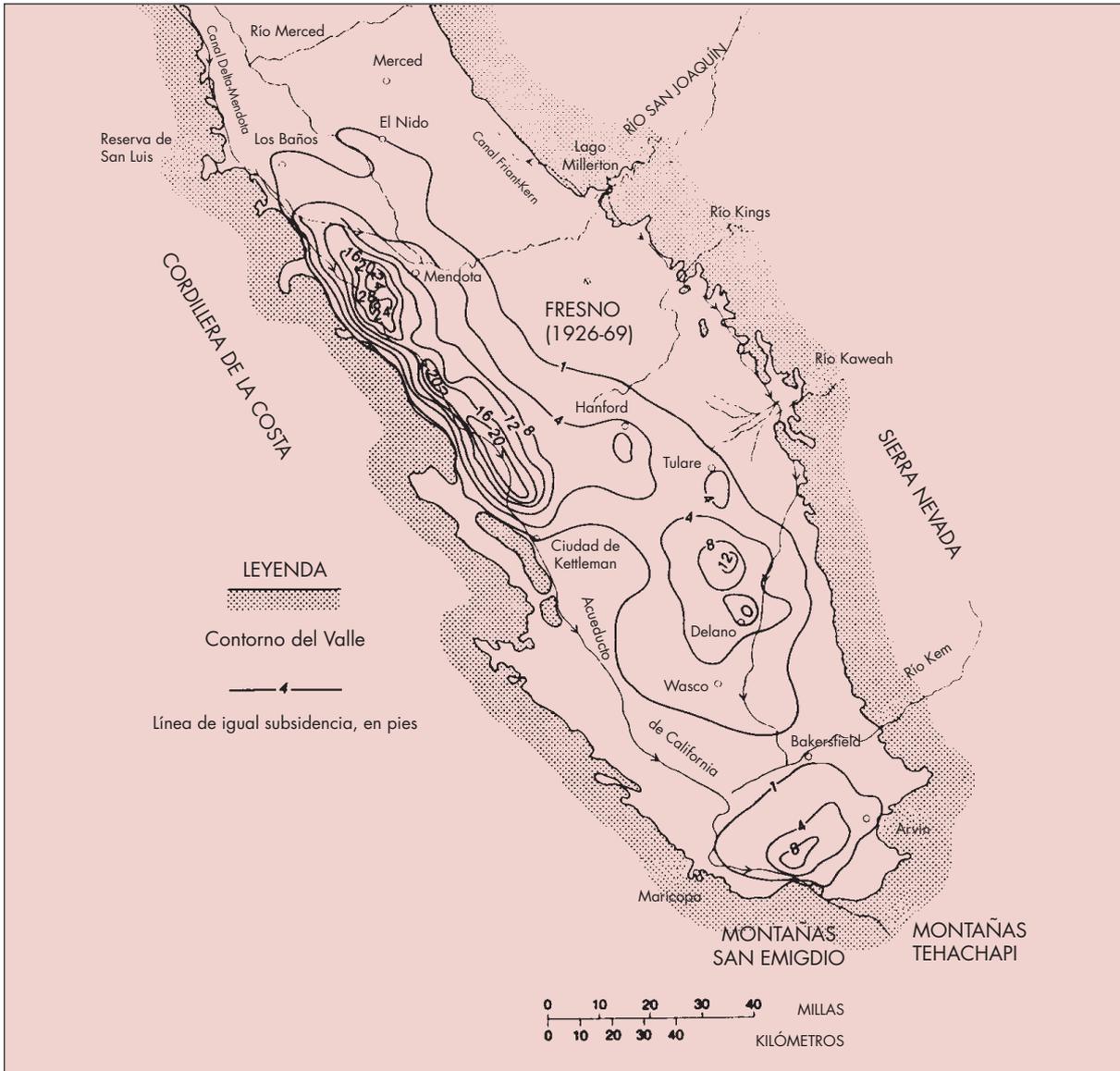
Los cauces de los mayores ríos entran por el este, desde Sierra Nevada, mientras que en los márgenes sur y oeste apenas hay arroyos disponibles para el riego. Antes de que se construyeran los canales las regiones sur y oeste eran regadas por miles de pozos profundos. El agua subterránea puede encontrarse en condiciones confinadas, semiconfinadas o libres. Hay tres grandes bolsas de agua o acuíferos. Sus recargas se producen por la infiltración desde arroyos, canales y acequias, el flujo que entra al valle desde los ríos que lo abastecen, la infiltración de la lluvia y la de los excedentes de riego. Sin embargo, la tasa de lluvia anual es tan baja que el agua que penetra en el suelo es muy poca y la deficiencia de humedad perenne.

1.2.2.2.3. Desarrollo del bombeo y trayectoria del nivel piezométrico

La extracción de agua subterránea en el Valle de S. Joaquín ha sido muy intensa, especialmente desde la II Guerra Mundial. Durante los años 50 más de un cuarto de todo el agua bombeada para riego en los EE.UU. se sacaba en el Valle de S. Joaquín (Logfren, 1977; Johnson, 1992). El bombeo se generalizó en torno a 1900 y se vio incrementado con un ritmo muy acelerado desde principios de 1940 hasta mediados de 1960. Las extracciones aumentaron desde 3.700 hm³ en 1942 hasta 12.300 hm³ en 1964 (tabla 1.2). Se estima que en el momento álgido del bombeo estaban en funcionamiento unos 40.000 pozos, con profundidades que variaban entre 40 y 900 m y descargando entre 0,8 m³/min y más de 7 m³/min.

Figura 1.8

Subsidencia debida a la extracción de agua del terreno en el Valle de San Joaquín. 1926-70 (Logfren, 1977)



En los primeros años 60 la altura de bombeo excedía con frecuencia los 150 m. Al suroeste de Fresno (ver figura 1.8) el nivel piezométrico en el terreno bajó unos 153 m entre 1905 y 1959 (Logfren, 1979). Johnson (1992) apunta descensos de 130 m en la parte oeste y el límite sur del Valle de S. Joaquín (tabla 1.2). Durante los años 50 y principios de los 60 los niveles de agua en el subsuelo cayeron con una velocidad sin precedentes. A finales de los años 50 el nivel piezométrico descendió bajo la base del estrato de arcilla introduciéndose en el acuífero en las zonas del valle con mayor tasa de bombeo, y siguió bajando hasta 1968.

1.2.2.2.4. Registros y zonas de subsidencia

La figura 1.8 muestra la magnitud y extensión en superficie de la subsidencia producida en el Valle de S. Joaquín desde 1926 hasta 1970. Se distinguen tres centros principales:

- a) Una larga y estrecha estructura al oeste de Fresno, conocida como el área de Los Baños-Ciudad de Kettleman, con una subsidencia máxima de aproximadamente 880 cm.
- b) La zona central entre Tulare y Wasco, con más de 360 cm de asiento máximo. Se han desarrollado dos cuencos de subsidencia, es decir, zonas semicirculares donde ha descendido la superficie del suelo. 3.700 km² se han visto afectados, de los que 3.200 km² han bajado más de 30 cm y 800 km² más de 150 cm. En el cuenco norte, mayor y más profundo, al sur de Pixley, se llegó a una tasa máxima de subsidencia de 20 cm/año entre 1959 y 1962. La ratio entre asiento de subsidencia y variación del nivel piezométrico, $s/(-h)$, tiene una media de 6 cm/m, con máximos de 12 cm/m (Ricceri y Butterfield, 1974).
- c) Una depresión al sur de Bakersfield, llamada Área de Arvin-Maricopa, con una subsidencia máxima de 270 cm.

Placzek (1989) apunta un asiento de 310 cm entre 1921 y 1960 con una ratio entre asiento y descenso piezométrico de 9,1 cm/m (tabla 1.2).

Aparentemente, la subsidencia comienza en los años 20 en los centros de consumo y se convierte en una preocupación generalizada a finales de los años 40. Hasta después de la II Guerra Mundial el volumen de subsidencia no tuvo valores altos. En 1970 el volumen total acumulado en el valle era de 19.000 hm³, habiéndose duplicado desde 1957. En los años 70, 111 km² de tierra agrícola habían descendido más de 30 cm. Las cubiertas de los pozos fallaron en un número alarmantemente grande y los asientos diferenciales de la superficie terrestre provocaron numerosos problemas. Los daños causados en pozos, canales y sistemas de drenaje representaron muchos millones de dólares.

1.2.2.2.5. Importaciones de agua superficial

La importación de agua superficial en las áreas de desarrollo comenzó en 1950 en la parte más al norte de la región de servicio del Canal Friant-Kern (ver figura 1.8) mediante el desvío de agua desde el río S. Joaquín. Las entregas del canal iban progresando hacia el sur tanto como avanzaba la construcción. En 1966 se había alcanzado el área de Arvin. En el lado oeste del valle las importaciones vía Canal del Delta-Mendota empezaron durante los primeros años 50 y se extendieron desde 1968 a otras áreas occidentales deficitarias a través del Acueducto de California. En 1970 el acueducto llegó a las montañas Tehachapi, en el sur del valle.

Como resultado del gran volumen de importaciones de agua superficial, tras cuarenta años de continuada extracción se redujo el bombeo y se logró invertir la tendencia descendente de los niveles de agua. A finales de 1972 cientos de pozos de riego quedaron fuera de uso. En 1973 las importaciones a través de canales habían reemplazado al bombeo en la mayor parte de las zonas de explotación. En la zona de Fresno el nivel piezométrico se recuperó unos 82 m entre 1968 y 1976 (tabla 1.2). En 1976 el agua en el terreno recuperó la cota que tenía previamente a los registros de subsidencia generalizada, es decir, en torno a finales de los años 40, y la tasa de asiento descendió desde un máximo de 50 cm/año hasta desaparecer en gran parte del valle (Logfren, 1977 y 1979; Johnson, 1992).

1.2.2.2.6. *Cambios hidrogeológicos y nuevas condiciones ante una segunda explotación*

No todos los efectos de la subsidencia han sido negativos. El fenómeno ha proporcionado un extraordinario campo de pruebas para estudiar las características de compresión y de almacenamiento de los sistemas acuíferos bajo un amplio rango de tensiones. En Pixley, cerca del centro de subsidencia del área Tulare-Wasco, se han registrado durante 20 años (1958-1978) las fluctuaciones del nivel de agua, los cambios en las tensiones efectivas, las deformaciones en profundidad y la subsidencia total de la superficie terrestre. Cada año comenzaba la compactación durante el período de rápida caída del nivel piezométrico en el acuífero, continuaba a lo largo de la estación de bombeo y cesaba con las primeras fases de recuperación piezométrica. La compactación medida a una profundidad de 232 m era el 75% de la subsidencia total, por lo que el 25% del acortamiento vertical se ha producido por debajo de los 232 m bajo la superficie.

Por otra parte, los depósitos están ahora mucho más preconsolidados que con las tensiones que tenían a mediados de los años 60, por lo que la cuenca puede ser utilizada cíclicamente para el almacenamiento de agua no sobrepasando los niveles más bajos sin temor a que se produzca una subsidencia importante en el futuro. La mayor parte de la compactación ocurre cuando la presión efectiva supera a la presión de preconsolidación. Por debajo de ella el terreno responde elásticamente, es decir, con una deformación recuperable, y la compactación es baja. Cuando es superada, la compresión es mucho mayor y principalmente no recuperable. La tasa de deformación por unidad de tensión es una o dos veces más baja, en orden de magnitud, en el rango elástico que en el anelástico.

Además, el coeficiente de almacenamiento noval, correspondiente a tensiones superiores a la de preconsolidación, es de 10 a 100 veces el coeficiente de almacenamiento elástico, es decir, con tensiones inferiores a la de preconsolidación. Logfren (1979) da unos valores de $3,3 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ (metros de agua por metro de descenso del nivel piezométrico y por metro de espesor del estrato) para el almacenamiento específico elástico, correspondiente a la compactación recuperable, y de $3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ para el almacenamiento específico noval, correspondiente a la compactación mayormente no recuperable. Por consiguiente, los niveles de agua bajarían mucho más rápidamente (de 10 a 20 veces) en un segundo ciclo de bombeo prolongado.

Por otro lado, la deformación ha hecho llegar a los pozos agua de compactación, lo que representa un mayor recurso de agua. Por lo tanto, los niveles han bajado más lentamente y las alturas de bombeo han sido menores que si se hubieran extraído los mismos volúmenes de agua desde un terreno menos compresible. Pero el agua de compactación extraída por primera vez de los poros del suelo ya no estará disponible en un segundo período de extracción. Durante 50 años de extracción (1926-1976) el volumen de subsidencia ha sido 1/3 del bombeo total, variando entre un 1% y más de un 60%. De ello se deduce que el agua de compactación de la primera extracción representa 1/3 del total del agua bombeada. Menos del 5% de la misma vuelve a los huecos del suelo cuando se recuperan los niveles de agua.

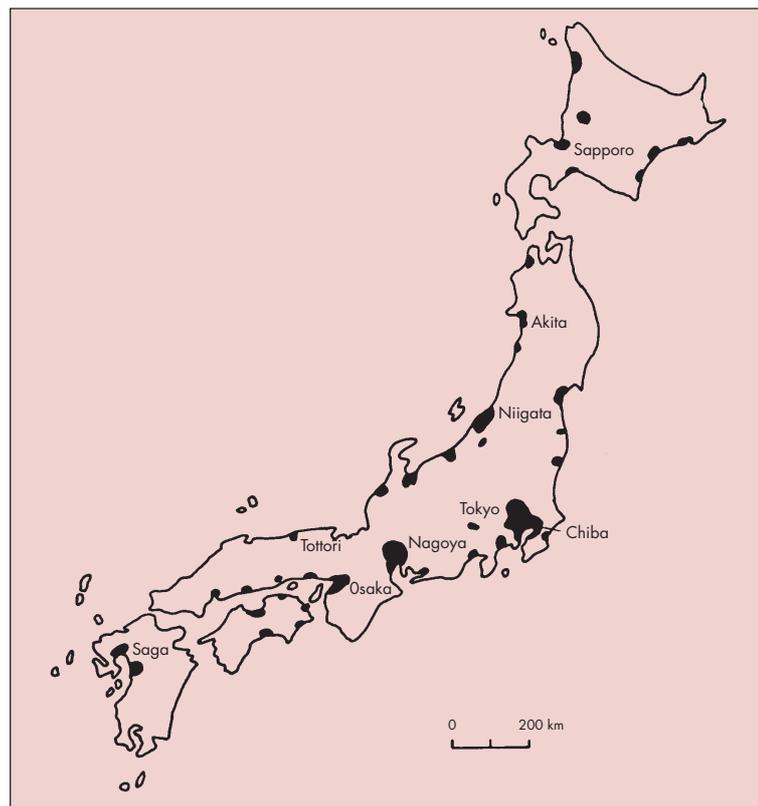
La demanda creciente de agua para riego, sobre todo en los años de precipitaciones escasas, puede amenazar con incrementar de nuevo el bombeo, con lo que otro ciclo de subsidencia afectaría a una gran superficie. Sin embargo, los importantes cambios hidrogeológicos experimentados en el suelo durante la extracción entre 1930 y 1970 hacen diferente la respuesta de la cuenca a una segunda fase de explotación. En un principio, el nivel del agua en el terreno bajaría mucho más rápidamente que con el bombeo inicial. La subsidencia, no obstante, sería mínima hasta que no se superase la presión de preconsolidación.

1.2.3. Subsidencia en Japón

Las mayores ciudades de Japón son asentamientos naturales que buscan una topografía suave en las llanuras junto al mar. La subsidencia ha desencadenado graves problemas medioambientales en zonas superpobladas (Corapcioglu, 1984). Los principales casos se resumen en la tabla 1.3. Los primeros estudios científicos sobre la subsidencia datan de 1900 en Tokio y de 1930 en Osaka. Los artículos presentados en el Primer Simposio Internacional de Subsidencia Terrestre, celebrado en Tokio en 1969, se basaron en datos estadísticos recopilados a finales de 1966.

La causa de la subsidencia en Japón es la extracción de agua del terreno. En un principio, en 1960, era bombeada para los usos industrial y municipal, excluyendo la destinada para el abastecimiento de la población y para la explotación de gas, pero después también fue extraída para el consumo humano, el agrícola y para calefacción en el período invernal (Yamamoto, 1977). Se estima que en 1989 en Japón se usaban $366.512 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua subterránea (Akagi, 1992).

Figura 1.9
Áreas con subsidencia en Japón. 1965 (Yamamoto, 1977)



El número de localizaciones que han experimentado la subsidencia en Japón creció sin parar desde principios de siglo hasta los años 80, llegando a completar 60 (ver figura 1.9) y hasta 7.380 km² en superficie. De ellos, 1.200 km² se encontraban por debajo del nivel del mar. Las áreas que en 1976 tenían una tasa de subsidencia superior a 2 cm/año ocupaban una superficie total de 1.946 km² en 1978. De ellos, 404 km² descendían más de 4 cm en un año (Akagi, 1992).

La subsidencia desencadenó daños en las estructuras y gran cantidad de problemas en los ríos, los puertos, las zonas agrícolas, etc.. Se tuvieron que tomar medidas en las áreas de altitud próxima al nivel del mar para protegerlas de las inundaciones, las altas mareas, y las grandes olas debidas a los terremotos.

En muchas de estas zonas se ha invertido la tendencia, recuperándose la presión intersticial del agua, incluso varios metros en un año, y disminuyendo considerablemente la tasa de subsidencia. Entre ellas se puede citar a Tokio, Chiba, Kanagawa (Yokohama y Kawasaki), Osaka y Niigata. El área con una tasa de subsidencia mayor o igual a 2 cm/año era de 616 km² en 1982 y de 396 km² en 1986, mientras que esta cifra era de 4 cm/año para 45 km² en 1982 y para 7 km² en 1986 (Akagi, 1992). En algunos lugares se ha detenido la subsidencia. Es más, en varios de ellos ha habido levantamientos de la superficie terrestre, con lo que se han creado nuevos problemas. El máximo rebote registrado en un año, entre 1974 y 1975, es de 3 cm en un cierto lugar de Kawasaki, donde en principio fue confundido con un movimiento sísmico.

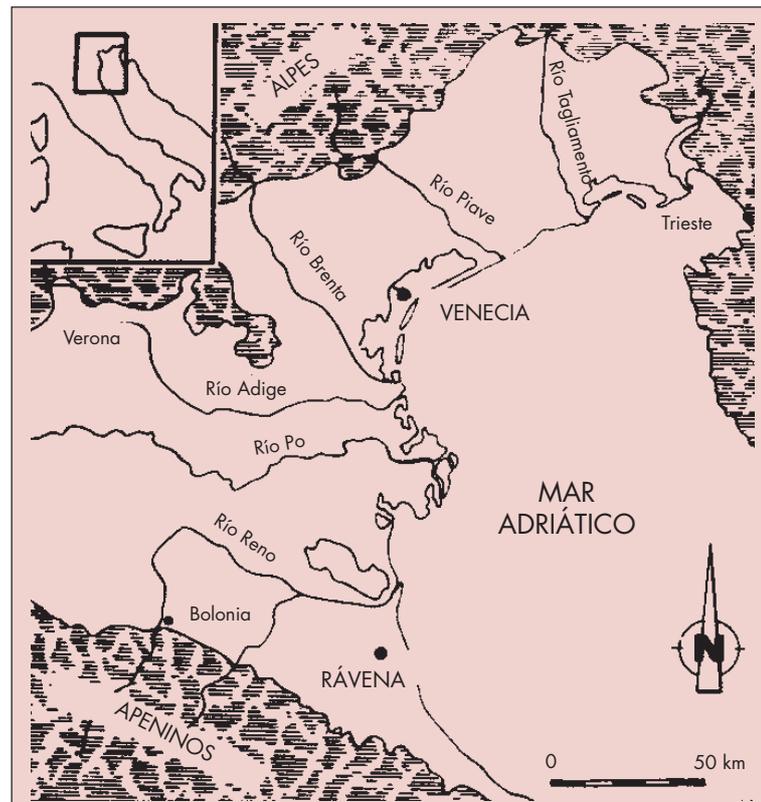
Este fenómeno se debe a las medidas legales de prohibición de la extracción de agua del terreno y a la búsqueda de otras fuentes de suministro. La Ley de Agua Industrial de 1957 se puso en vigor y fue aplicada desde 1961 en Tokio, Yokohama y otros lugares. Además, se establecieron por los gobiernos locales las Leyes Municipales de Agua del Terreno para la Regulación de los Edificios y la Prevención de Desastres Públicos. En torno a los años 70 se fue creando una conciencia general entre los ciudadanos de la necesidad de limitación del bombeo de agua del terreno (Vázquez, 2001).

1.2.4. Subsidencia en Italia

Los numerosos casos de subsidencia en Italia (tabla 1.4) se encuentran concentrados al norte, en el Valle del Po, por donde discurren los ríos más largos del país (ver figura 1.10). El fenómeno de la subsidencia comenzó a interesar en Italia en torno a 1960, cuando la rápida industrialización y la creciente demanda de agua y energía para usos industriales, agrícolas y civiles causaron la aparición de problemas localizados en algunas zonas (Vázquez, 2001).

En las zonas costeras la subsidencia ha entrado en conflicto con el uso turístico de las playas. En los terrenos agrícolas ha hecho avanzar hacia el interior del continente la cuña salina y aún en las partes más lejanas ha producido un salto de cota de la capa freática, modificando las características del suelo, destruyendo la capacidad de producir y conduciendo a los cultivos a una muerte segura.

Figura 1.10
Zona de Italia afectada por la subsidencia (Carbognin et al., 1979)



La elevación del nivel piezométrico ha invalidado parcialmente el sistema de canalización y gestión de las aguas del territorio véneto. En los suelos turbosos la falta de aguas dulces y el avance de las salinas lleva a una drástica reducción volumétrica, con el consiguiente hundimiento posterior del suelo. Los valles de pesca, que funcionan basados en el juego de desniveles del agua, se han visto inutilizados por la subsidencia, con graves consecuencias sobre la explotación natural del pescado.

Las nivelaciones periódicas desarrolladas en el norte de Italia desde principios del siglo XX hasta nuestros días han puesto de manifiesto la acción de tres factores, independientes entre sí, pero cuyos efectos sobre la superficie terrestre se suman (Ricceri y Favaretti, 1992; Lewis y Schrefler, 1998):

- a) El eustatismo, que contribuye a que vaya retirándose el límite de la tierra seca con las continuas elevaciones del nivel del mar, que ha subido una media comprendida entre 10 y 20 cm a lo largo del siglo XX (Gambolati et al., 1999).
- b) La subsidencia natural, que afecta a todo el Valle del Po, debida a las deformaciones tectónicas del sustrato rocoso y a una continua consolidación natural de los depósitos geológicamente más recientes (ver figura 1.10).
- c) La subsidencia provocada por el hombre mediante la extracción de grandes cantidades de agua y gas del terreno.

Los dos lugares de Italia donde el fenómeno de la subsidencia ha sido mejor estudiado, por su significación histórica, son Venecia y Rávena. Aunque la causa de la subsidencia, el marco hidrogeológico y el ambiente natural son similares en los dos casos, la tasa de hundimiento en Rávena es superior, debido al mayor consumo de agua y al mayor espesor y compresibilidad de los acuitardos (Carbognin et al., 1979).

1.2.4.1. Venecia

La subsidencia del área veneciana es la de mayor repercusión de todo Italia debido a la importancia histórico-artística de la ciudad y a su poca elevación sobre el nivel del mar, de un metro de media, lo que hace que el hundimiento pueda resultar fatal para su supervivencia (Corapcioglu, 1984). Aunque las cifras relacionadas con el asiento son pequeñas comparadas con otras zonas del mundo, la singularidad patrimonial y el riesgo creciente de inundaciones provocadas por las tormentas del Adriático Norte, hacen que crezca la importancia del fenómeno (Scott, 1979).

1.2.4.1.1. Marco hidrogeológico

Venecia contaba con 118 islas muy próximas unas de otras y consideradas en principio inútiles para la construcción, debido a la mínima consistencia del fango que conformaba el suelo. Pronto se descubrió la existencia bajo el fango del caranto, que consiste en capas alternadas de arena y arcilla compactada (tabla 1.4), que ofrecía una base sólida para edificar, con lo que comenzó el establecimiento de edificios sobre pilotes clavados firmemente en la arcilla. Sobre la cimentación profunda se colocó posteriormente una capa horizontal formada por grandes bloques de piedra de Istria, que se convirtió en el verdadero suelo o basamento de la práctica totalidad de los 20.000 edificios de Venecia. El origen metamórfico de esta piedra la hacen parecerse al mármol blanco, en color y en algunas otras propiedades, siendo la más importante de ellas su impermeabilidad.

1.2.4.1.2. Desarrollo del bombeo y trayectoria del nivel piezométrico

La extracción del agua a profundidades de 300 m comenzó en 1925, cuando se establecieron las primeras fábricas en Marghera. Los empresarios venecianos pensaron que la insularidad de Venecia no la hacían apta para responder a las exigencias del desarrollo industrial y eligieron la laguna para establecer los incipientes ciclos productivos y crear nuevos puestos de trabajo. Se crea así la zona industrial de Marghera (Vázquez, 2001).

En los años 50 se produjo un fuerte auge del bombeo debido al desarrollo industrial (tabla 1.4), que se continuó hasta 1972 (Carbognin et al., 1977; Scott, 1979; Lewis y Schrefler, 1998). Debido a ello todos los niveles piezométricos descendieron bajo la superficie. Durante el período entre 1940 y 1970 el nivel del agua en el terreno cayó en Marghera con una tasa de 0,5-0,6 m/año (Ricceri y Butterfield, 1974; Scott, 1979), llegándose al valor máximo de 0,7 m/año (Carbognin et al., 1977). En 1969 se fueron alcanzado los mínimos absolutos de la evolución piezométrica (tabla 1.4). En Marghera los

acuíferos bajaron 16 m bajo la superficie terrestre, y en el centro histórico 7 m. (Carbognin et al., 1977, 1978). Entre 1935 y 1972 otros autores (Ricceri y Butterfield, 1974; Placzek, 1989) dan valores de 19 y 10 m para la caída del nivel piezométrico en ambas zonas.

1.2.4.1.3. Registros de subsidencia

Ricceri y Butterfield (1974) estiman una velocidad media del asiento de la superficie terrestre en Venecia de 0,3 cm/año en el período 1900-1970 (tabla 1.4), con máximos en 1968-69 de 1,7 cm en el área industrial y 1,4 cm en el centro histórico (Carbognin et al., 1977; Scott, 1979; Placzek, 1989). El descenso de la superficie del suelo fue de 3,5 cm entre 1900 y 1935, 6,8 cm entre 1935 y 1952 y 12 cm entre 1952 y 1972 (Ricceri y Butterfield, 1974, Placzek, 1989; Lewis y Schrefler, 1998). Bouwer (1977) apunta una subsidencia máxima de 15 cm en el período 1930-73 (Carbognin et al., 1977, 1978; Corapcioglu, 1984).

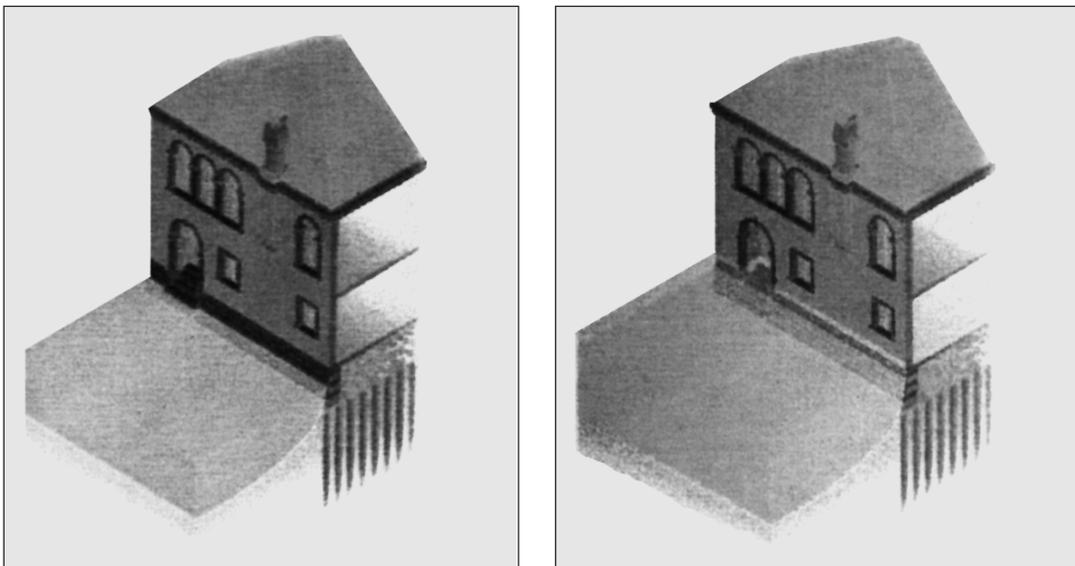
La extensión ocupada por la laguna véneta ha sufrido desde 1908 hasta 1980 una reducción altimétrica del suelo habitado con respecto al nivel del mar de 22,4 cm (Lewis y Schrefler, 1998). La elevación del nivel del mar se debe a la acción conjunta de la subsidencia natural, la provocada por el hombre y el eustatismo. La componente antrópica de la subsidencia representa un 47% de este valor.

1.2.4.1.4. Daños y consecuencias del fenómeno

En las zonas costeras la subsidencia ha agravado la precariedad del litoral. El fenómeno conocido por el término de “aguas altas” consiste en la subida temporal del nivel del mar por el efecto combinado de las mareas y de la componente meteorológica, causada por la combinación de bajas presiones con los vientos del Adriático. Hoy se producen niveles de aguas altas que en las primeras décadas del siglo no hubieran inundado la ciudad.

Figura 1.11

Elevación del nivel del agua en Venecia en relación con el basamento de la piedra de Istria



Las inundaciones se han visto reforzadas indirectamente por la subsidencia, tanto en amplitud como en frecuencia. Las zonas más antiguas del casco histórico, como la Plaza de S. Marcos y Rialto, se encuentran a una cota más baja que el resto de los edificios, con lo que son fácilmente alcanzables por mareas de 1 metro de altura. Si se tiene en cuenta que el nivel más alto de las mareas está 55 cm por encima del nivel cero, la elevación del nivel del mar durante el s. XX de 23 cm representa el 30% del margen de seguridad para las mareas ordinarias. En el pasado los muros de ladrillo eran protegidos de las humedades de capilaridad por los basamentos de piedra de Istria, pero la variación del nivel del mar ha expuesto a los edificios a la ascensión del salitre, provocando la degradación de verdaderas joyas del patrimonio arquitectónico. En el siglo XVII solamente una vez cada 5 años la zona superior del basamento era invadida por el agua. En la actualidad esto ocurre unas cuarenta veces al año en las zonas más bajas de la ciudad (ver figura 1.11). Si el nivel del mar subiera 30 cm, este hecho ocurriría en toda la extensión de Venecia y la defensa que constituye la piedra de Istria sería en vano.

1.2.4.1.5. *Estudio y control de la subsidencia. Medidas de recuperación del nivel piezométrico*

En 1969 el Consejo Nacional Italiano de Investigación instituyó un plan de trabajo en el estudio de la subsidencia veneciana. Se organizó una red de 112 piezómetros que proporcionaban una información precisa y continuada de los movimientos y el estado de la superficie piezométrica. Se estableció una extensa trama de nivelaciones que permitió reconstruir temporalmente los perfiles de altimetría. Después de la gran inundación de 1966, cuando la marea alcanzó una cota de 1,99 m, comenzaron a suspenderse las extracciones. Desde 1970 algunas áreas fueron abastecidas por un acueducto público. La actividad industrial de Marghera se vio reducida y fue prohibida la apertura de pozos en los alrededores de Venecia. En enero de 1975 fue puesto en funcionamiento un nuevo acueducto industrial, abastecido por el Río Sile. Desde 1969 hasta 1975 se observó una reducción del 60% en el número de pozos activos en Marghera. Los registros de extracción habían bajado hasta 0,2 m³/s en 1975, lo que se mantuvo hasta 1980, con lo que el nivel piezométrico experimentó una tendencia ascendente. La recuperación media en el área industrial fue de más de 8 m y en Venecia de más de 3 m (tabla 1.4). Las nivelaciones reflejaron la detención de la subsidencia e, incluso, un rebote de unos 2 cm en Venecia en 1975 (Carbognin et al., 1977; Lewis y Schrefler, 1998).

1.2.4.1.6. *Medidas de protección contra las inundaciones*

Una vez cerrados los pozos se considera que la causa antrópica de la subsidencia es prácticamente despreciable. En cualquier caso, como el módulo edométrico para carga noval puede oscilar entre el 10% y el 20% del módulo en descarga, el rebote es muy inferior al asiento anterior (Bouwer, 1977; Carbognin et al., 1977; Schrefler et al., 1977).

Para la protección contra las aguas altas se ha proyectado en Venecia un sistema integrado de obras que consiste en actuaciones de defensa local para mareas de hasta un metro. Las más importantes son la elevación de los muelles o “fondamenta”, los bordes de los canales (ver figura 1.12) y las plantas bajas de los edificios, la realización de una nueva

pavimentación (ver figura 1.13), la reconstrucción de cimientos y la restauración de puentes. Además se pretende la modernización y el redimensionamiento de las redes (agua corriente, gas, alcantarillado, teléfono, antiincendios, etc.), junto con el mantenimiento y la limpieza de los canales.

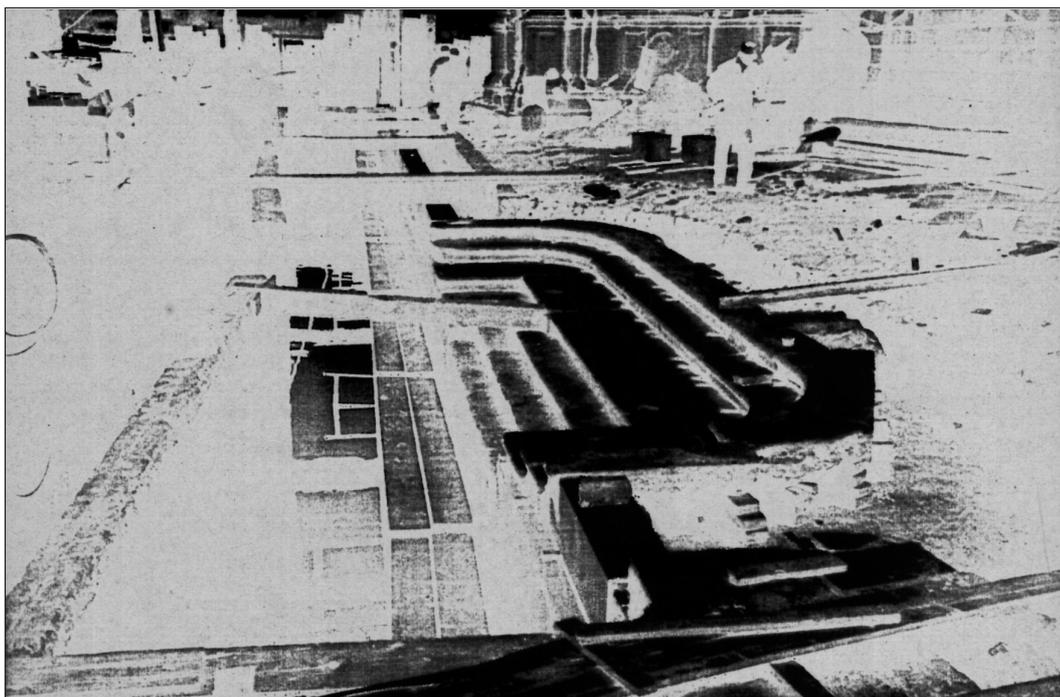
Figura 1.12

Fondamenta del Tolentini, junto al IUAV (Instituto Universitario de Arquitectura de Venecia)



Figura 1.13

Nueva pavimentación de una fondamenta, con reconstrucción de escalera de acceso al canal



1.3. CONCLUSIONES

El origen del fenómeno de la subsidencia ha consistido, en la mayoría de las ocasiones, en el descenso de la presión del agua en el terreno debido a un bombeo que supera a las aportaciones de lluvia, riego o filtración de corrientes superficiales y profundas. Este descenso produce un incremento en la presión efectiva y, a raíz de ello, un asiento.

Las tablas 1.1 a 1.4 son una colección de algunos de los más importantes casos de subsidencia causada por la extracción de agua que han ocurrido en el mundo a lo largo de la Historia (Vázquez, 2001).

Se han registrado bajadas del nivel piezométrico que llegan a 153 m en el Valle de San Joaquín, en California, 140 m en Arizona Central o 122 m en Pasadena, en el Área de Houston-Galveston de Texas. La velocidad con la que se ha desarrollado el descenso alcanza los 5,4 m/año en el acuífero Evangelina del Área de Houston-Galveston, de 3 a 4 m/año en Tokio o Bangkok, y 3 m/año en Ciudad de Méjico o el acuífero Chicot, también del Área de Houston-Galveston.

Se han medido asientos de más de 880 cm en el Valle de San Joaquín, 850 cm en Ciudad de Méjico y 800 cm en la Cuenca Chalco, ambos en la Cuenca de Méjico, 457 cm en las tierras bajas aluviales de Tokio, y 400 cm en el Valle de Santa Clara, en California. Las tasas máximas se acercan a los 50 cm/año en el Valle de San Joaquín y Niigata, 46 cm/año en Ciudad de Méjico, 40 cm/año en la Cuenca Chalco, 38 cm/año en las tierras bajas aluviales de Tokio y 30 cm/año en el Valle de Santa Clara.

Algunos de los movimientos se extienden a grandes profundidades. En Arizona Central el 37% de la compactación ocurrió bajo los 253 m más superficiales, en el Valle de San Joaquín el 25% correspondía a sedimentos por debajo de 232 m, y en el Área de Houston-Galveston el 45% bajo los 330 m. En Bangkok el 40% se tuvo en los 20 m superiores, de un 40 a un 55% desde los 20 a los 200 m, y de un 5 a un 15 % por debajo de 200 m. En la Llanura de Nobi el 30% del bombeo y del asiento se originaron por debajo de 100 m. En Niigata, aunque la mayor parte de la compactación se producía en los 120 m bajo la superficie, la compresión de los estratos seguía siendo muy alta a profundidades entre 380 y 610 m. En 1971, en Tokio el 65% de la deformación se midió en los depósitos del Pleistoceno inferior y del Plioceno.

El área afectada por la subsidencia también ha llegado a ser muy extensa. En el Valle de San Joaquín, en 1973, una superficie de 13.500 km² alcanzó un asiento mínimo de 30 cm. En la misma fecha, esta cifra era de 6.500 km² en Pasadena, en el Área de Houston-Galveston de Texas. En los años 80 la superficie que había experimentado subsidencia en Japón alcanzaba los 7.380 km². En 1976, el área descendente total de la Llanura de Nobi era de 1.140 km². En 1959 asentaban 2.000 km² en Niigata.

En varias partes de EE.UU. la subsidencia ha provocado la aparición de fisuras de gran longitud. En Arizona Central un asiento de más de 300 cm produjo grietas superiores

a 5-10 m de ancho y profundidad, y 13,8 km de longitud. En el cuenco norte de la zona Tulare-Wasco, del Valle de San Joaquín, donde el descenso del terreno se acercó a los 270 cm, se originó otra grieta de 0,8 km de longitud y 2,4 m de ancho, alcanzando profundidades de 16,8 m en forma de delgadas fisuras de 3 a 76 mm de ancho. Se estima que la subsidencia ha activado algunas fallas del Área de Houston-Galveston.

La subsidencia no se manifiesta de una manera homogénea. Los distintos valores de la caída del nivel piezométrico y del espesor y la resistencia de los estratos compresibles hacen que las magnitudes de los asentamientos también difieran. Los asentamientos diferenciales son la causa de multitud de fallos en cimentaciones y estructuras de edificios, además de roturas de pavimentos y conductos de instalaciones.

Los daños ocasionados por el fenómeno son innumerables y afectan a las construcciones, a las infraestructuras e instalaciones, a las carreteras y calles, y a los campos deportivos. Se han generado severos perjuicios en el diseño y mantenimiento de los canales, las presas, las redes de agua corriente y saneamiento, o los pozos. En Ciudad de Méjico el descenso del terreno ha hecho que aparezca el peligro de una posible inundación por las aguas del alcantarillado general. En la Cuenca Chalco la depresión creada en el suelo ha invertido el gradiente de alturas de la red de drenaje superficial. En zonas costeras la subsidencia ha originado inundaciones, como en la Ciudad de Houston, Bangkok o la Bahía de San Francisco (Vázquez, 2001).

Todos estos destrozos desembocan en el gasto de millones de dólares en reparaciones, reconstrucciones, elevaciones de sistemas de diques y presas, o realizaciones de redes profundas de saneamiento. Además, sus efectos han hundido el valor de tierras de cultivo, urbanizaciones y zonas de expansión residencial, industrial, comercial o turística. Hay lugares, como Venecia o Rávena, donde una tasa de asiento de menor cuantía tiene mayor interés por su importancia histórica o artística.

En base a la relevancia que ha adquirido el problema, se han instituido por parte de las administraciones organismos y comisiones para estudiarlo y hacer un seguimiento de los descensos del nivel piezométrico y los asentamientos a los que han dado lugar. Para impedir que el fenómeno se generalice se ha creado una legislación que ha cerrado los pozos existentes o ha prohibido la apertura de otros nuevos. Se han ejecutado importantes restricciones al bombeo, a veces a través de impuestos que gravaban las extracciones, y otras poniendo limitaciones a la profundidad y las dimensiones del conducto o a la potencia de la bomba de impulsión.

Medidas adicionales consisten en la importación de agua superficial, como en el Valle de San Joaquín, además del encauzamiento y control de los excesos de inundación o la recarga desde los cauces de los ríos y los estanques de suministro, como en el Valle de Santa Clara. En Niigata, Japón, a partir de 1973, el caudal de agua bombeada volvía a inyectarse artificialmente en los acuíferos una vez extraído el gas natural (Vázquez, 2001).

Con ello se ha conseguido reducir o eliminar el bombeo, recuperar el nivel piezométrico y disminuir la tasa de subsidencia. La superficie descendente también se ha

empequeñecido en extensión. En el Valle de San Joaquín los niveles de agua subieron unos 82 m entre 1968 y 1976 y la tasa de subsidencia llegó a desaparecer. En el Valle de Santa Clara en el mismo período el ascenso piezométrico fue de 32 m y la velocidad del asiento también se anuló, midiéndose expansiones netas del terreno de 0,5 y 1,1 cm. En Tokio el nivel piezométrico se recuperó hasta 30 m en un año. En Niigata la tasa de subida piezométrica alcanzó los 20 m/año y el levantamiento del suelo los 2,8 cm/año. El máximo rebote registrado en un año se produjo en Japón, en zonas como Tokio, Kawasaki y la Llanura de Nobi, y fue de 3 cm. En Venecia se ha llegado a medir un rebote de 2 cm.

En nuevos períodos de sequía eventual, los asientos son menores hasta que se excede a la presión de preconsolidación, pero la respuesta es rápida. Los depósitos se encuentran sobreconsolidados y la presión de preconsolidación puede alcanzar cientos de kPa. Por esta razón, en las primeras decenas de metros de descenso del nivel piezométrico, el asiento de los materiales de grano fino ocurre en régimen elástico y produce una subsidencia pequeña. Cuando se supera a la presión de preconsolidación, la compresión del terreno es mucho mayor y no se recupera. El almacenamiento específico para una compresibilidad nueva es de 10 a 100 veces mayor que el almacenamiento específico elástico, por lo que en un segundo ciclo de bombeo el nivel piezométrico baja mucho más velozmente.

La razón entre el asiento y el descenso de la altura piezométrica, $s/(-h)$, oscila entre 2 cm/m y 3,75 cm/m en lugares con sedimentos sobreconsolidados del Pleistoceno. La ratio es inferior donde la fracción de arcilla es pequeña, como en Venecia. Cuando los suelos aluviales aparecen en la parte superior del perfil geológico, $s/(-h)$ puede variar desde 3,75 hasta 8,5 cm/m. En depósitos profundos de suelos normalmente consolidados, puede alcanzar valores mayores de 30 cm/m, como en Ciudad de Méjico.

La medida del parámetro anterior es interesante para predecir futuros asientos, siempre que los nuevos descensos del nivel piezométrico sean superiores a los anteriores. Holzer (1981) ha encontrado en algunas zonas que sufren subsidencia un valor constante de esta relación hasta llegar a un cierto descenso del nivel piezométrico, entre 16 y 63 m, para luego aumentar hasta un nuevo valor constante. Este descenso del nivel piezométrico indica la cantidad en la que la presión de preconsolidación excedía con anterioridad a la presión efectiva. Antes de alcanzar la presión de preconsolidación, en arcillas fuertemente sobreconsolidadas se pueden presentar cifras tan bajas como 0,3 cm/m (Corapcioglu y Brutsaert, 1977). Valores del coeficiente de consolidación tan pequeños como $6,35 \times 10^{-6}$ cm²/s en el acuífero Chicot, y $1,59 \times 10^{-5}$ cm²/s en el acuífero Evangelina, se ajustan a las tasas de asiento medidas en los depósitos sobreconsolidados del Área de Houston-Galveston (Vázquez, 2001).

Otro índice importante es la razón entre el volumen de subsidencia y el volumen de agua extraída, que representa el porcentaje que supone el agua de compactación de la primera extracción respecto al total de agua bombeada. Varía entre un 11% en el Valle de Santa Clara, un 20% en el Área de Houston-Galveston, y 1/3 en el Valle de S. Joaquín, donde el promedio de esta relación es constante a lo largo de todo el período de subsidencia. Menos del 5% de esta agua vuelve a los poros del suelo al recuperarse el nivel piezométrico (Vázquez, 2001).