

# LA SUBSIDENCIA DELTAICA

## Una amenaza inminente a las poblaciones de la costa

.....

El delta del Ganges-Brahmaputra es una de las regiones deltaicas del mundo que se está hundiendo a medida que el peso de sus ciudades e industrias se combina con la excesiva extracción de recursos naturales de los depósitos suaves de sedimentos. © Planet Observer/Getty Images

Puede consultarse una versión HTML de este artículo conforme a la Sección 508 en <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.123-A204>.

\* Publicado originalmente en *Environmental Health Perspectives*, volumen 123, número 8, agosto 2015, páginas A204-A209.

**L**a elevación del nivel del mar derivada del calentamiento del clima amenaza con inundar las costas en todo el mundo.<sup>1</sup> Sin embargo, algunas de las costas más vulnerables del mundo –las planicies limítrofes de los deltas, sobre todo en el sureste de Asia– enfrentan una amenaza de hundimiento mucho más inmediata.<sup>2</sup> Este fenómeno, inducido principalmente por las actividades humanas a una escala local, más que global, y que se conoce como subsidencia del terreno, puede ocurrir mucho más rápidamente que la elevación del nivel del mar. Jakarta, la ciudad indonesia más grande, se está hundiendo a razón de 5–10 cm por año,<sup>3</sup> esto es, en una proporción mucho mayor que la tasa global de elevación del nivel del mar, que es de por lo menos 3.2 mm por año, según cálculos recientes.<sup>1</sup> Si la subsidencia en Jakarta mantiene este mismo ritmo, la ciudad se podría hundir hasta 6 m para fines de este siglo, según JanJaap Brinkman, un especialista en gestión del agua del Instituto de Investigación Deltas en Delft, Holanda.

Aproximadamente 500 millones de personas viven en regiones deltaicas amenazadas de subsidencia, y la preocupación por su bienestar va en aumento.<sup>4</sup> Por ejemplo, en 2007 hubo una inundación catástrofica en Jakarta: algunas partes de la ciudad estuvieron inundadas durante semanas; 200 000 personas fueron desplazadas, y unas 1 400 fueron hospitalizadas debido a enfermedades diarréicas transmitidas por el agua y a la fiebre del dengue, transmitida por los moscos que medran en el agua estancada.<sup>5</sup> Marc Bierkens, profesor de hidrología de la Universidad de Utrecht, Holanda, dice que Jakarta está asentada en una cuenca que se hunde, donde “las crecidas se acumulan y no tienen salida”.

Aparte del riesgo cada vez mayor de inundaciones y enfermedades asociadas con éstas, los expertos consultados para la redacción de este artículo señalan que la subsidencia también amenaza a la salud de otras maneras. Acelera la contaminación de los recursos de agua dulce con agua salada, haciéndolos inadecuados para beber y para la agricultura. La subsidencia tensa los gasoductos, los drenajes y otras infraestructuras que se pueden agrietar a medida que la tierra cede y se eleva, lo que incrementa el riesgo de explosiones y de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Por último, el estrés de la amenaza a las reservas de agua potable, a los hogares y a las subsistencias puede tener efectos adversos sobre la sensación de bienestar de las personas.

Se ha frenado la subsidencia en ciudades como Tokio<sup>6</sup> y Bangkok,<sup>7</sup> y las lecciones aprendidas allí están estimulando esfuerzos para enfrentar el problema en otros lugares; los investigadores están indagando las causas específicas de cada lugar en su búsqueda de soluciones focalizadas. Sin embargo, en muchos deltas el tiempo se está acabando, advierte Gilles Erkens, investigador principal del Instituto de Investigación Deltares y de la Universidad de Utrecht. "En muchos casos, sencillamente no contamos con diez años para esperar a tener más datos", dice.

### Procesos deltaicos

Los deltas del mundo se formaron principalmente por agradación, o la acumulación de sedimentos fluviales fértiles a lo largo de miles de años.<sup>8</sup> Como tales, comprenden importantes áreas productoras de alimentos que atraen a grandes poblaciones. Por ejemplo, el delta del Mekong, que actualmente se está hundiendo a un ritmo promedio de 1.6 cm por año,<sup>9</sup> es uno de los principales exportadores de arroz del mundo<sup>10</sup> y cuenta con más de 20 millones de habitantes.<sup>9</sup>

A diferencia de las costas continentales rocosas, las planicies deltaicas tienden a ser suaves y fácilmente comprimidas. A menudo están sostenidas por petróleo o gas subyacentes, o por aguas dulces subterráneas que fluyen a través de los poros de los depósitos de sedimentos. Conforme se extraen esos recursos, los sedimentos se comprimen y la tierra se contrae como una esponja seca.

Algunos sedimentos, en especial aquellos que son ricos en material orgánica, como la turba, también se oxidan cuando se secan. El oxígeno se liga al carbono en los suelos, generando dióxido de carbono, que se libera a la atmósfera. Al quedar desprovistos del carbono que se pierde como resultado de esta reacción, los suelos pierden masa y se compactan.<sup>11</sup>

Según James Syvitski, oceanógrafo y profesor de la Universidad de Colorado en Boulder, la elevación de un delta sobre el nivel del mar depende de cuatro factores interrelacionados: el volumen global del océano, la agradación, la compactación de los sedimentos y los movimientos verticales que resultan de la tectónica de placas y otros procesos geofísicos. Señala que el volumen total del océano, y por ende su elevación en relación con las superficies terrestres, se está incrementando, en parte como resultado del cambio climático inducido por el hombre. El agua más caliente se expande, y los mares se elevan mientras vastas capas de hielo cercanas a los polos se derriten.<sup>1</sup>

La agradación se ha visto severamente limitada por presas y diques que atrapan el limo y privan a los deltas de nuevos sedimentos. Además, la compactación de sedimentos está aumentando con la extracción de las aguas subterráneas y de los hidrocarburos, así como con la expansión de la infraestructura urbana. El peso de esta última compacta los suelos subyacentes, y sus techos no porosos y sus pavimentos impiden que las aguas superficiales se infiltrén

de nuevo en la tierra y recarguen las aguas subterráneas.

En 2009, Syvitski reportó que la creciente compactación y la disminución de la agradación habían puesto en peligro muchos de los deltas del mundo, más de la mitad de los cuales se encuentran en Asia. "Todas las tendencias apuntan a áreas cada vez mayores de deltas que se hunden bajo el nivel del mar", escribió. "Y sigue siendo alarmante la frecuencia con la que se inundan los deltas, con aguas provenientes de la tierra o del mar, y las tendencias parecen estar empeorando".<sup>4</sup>

La mayor amenaza, comenta Syvitski, es que un delta llegue a colapsarse, lo que significaría que probablemente nunca será restituido ni remotamente a su condición natural. El delta del río Indo en Pakistán ya se colapsó, informó Syvitski en el año 2013.<sup>2</sup> Este río, sobreexplotado para fines agrícolas, está seco en su desembocadura en el Mar Arábigo durante casi 140 días al año, y pronto podría estar seco todo el año. El delta se ha reducido a una décima parte de su tamaño original, y el agua de mar que se cuela ha contaminado las reservas adyacentes de agua dulce subterránea, ha sumergido pequeños poblados costeños y ha desplazado a cientos de miles de personas.

Por el contrario, otro delta de Asia que se está hundiendo –el delta del Ganges-Brahmaputra, con una población de aproximadamente 170 millones de habitantes– aún no se ha desplomado, pero está a punto de hacerlo. La llegada de sedimentos al delta del Ganges-Brahmaputra se ha visto fuertemente afectada por la construcción de presas y diques. La peor subsidencia ha ocurrido entre el rompecabezas de islas fluviales del suroeste de Bangladesh, que en conjunto miden decenas de miles de kilómetros cuadrados.<sup>12</sup>

Con la finalidad de contener el mar y crear más tierra para la agricultura, se construyeron diques



Foto: © Espen Rasmussen/Panos

**Diques de tierra y de concreto rodean zonas agrícolas bajas conocidas como polders a lo largo del delta del Ganges-Brahmaputra Delta. Estos diques protegen la tierra del interior, pero también bloquean la deposición de nuevos sedimentos durante la temporada de lluvias. Como consecuencia, los polders se hunden. Cuando el ciclón Aila azotó a Bangladesh en mayo de 2009, las crecidas llegaron a la altura de los diques, lo que convirtió algunas secciones de los polders en lagos. Estos residentes están acarreando lodo para ayudar a construir un dique tras el ciclón, lo cual trajo un beneficio: dejó inundada el área con una deposición de limo fresco que debía haber ocurrido hace mucho tiempo y que en algunas áreas alcanzó un espesor de 70 cm.**

de concreto y de tierra alrededor de lotes bajos conocidos como *polders* durante la década de 1960. Los diques bloquearon el reabastecimiento del delta con los sedimentos que el río arrastraba como resultado de las inundaciones anuales por los monzones, y desde entonces las islas han perdido 1–1.5 m de elevación.<sup>13</sup> Según Kimberly Rogers, investigadora asociada de la Universidad de Colorado en Boulder, ahora son mucho más vulnerables a las mareas tormentosas que pueden dañar o romper los muros alrededor de los *polders*, creando de manera eficaz lagos que pueden

durar años. En 2009, el ciclón Aila azotó el suroeste de Bangladesh, y la inundación resultante desplazó a más de 100 000 personas en las áreas más afectadas.<sup>14</sup> Sin embargo, la tormenta también inundó las islas de limo fresco, el cual alcanzó en algunos lugares una profundidad de 70 cm,<sup>15</sup> lo que refleja la capacidad del sistema de reabastecerse si se le permite hacerlo.

#### Factores causantes de la subsidencia

Los científicos están mejorando su comprensión de las causas de la

subsistencia en el delta del Ganges-Brahmaputra, sin embargo queda aún mucho por saber. La cobertura satelital de este delta era escasa hasta hace unos pocos años, y existe una escasez crónica de datos de seguimiento.

Esto también se aplica al Delta del Mekong en Vietnam, donde los científicos holandeses y vietnamitas están colaborando actualmente en un proyecto de investigación de cinco años que podría revelar oportunidades para frenar la subsidencia y limitar sus efectos. Este proyecto, llamado “Crecida y descenso”, se lanzó en marzo de 2015 con un financiamiento

de un millón de dólares, provenientes sobre todo de la Fundación de los Países Bajos para la Ciencia.

Los científicos del proyecto están recogiendo datos y tomando muestras de la geología de la subsuperficie del delta del Mekong. Planean crear un modelo hidrogeológico sofisticado capaz de predecir los índices de subsidencia y de intrusión de agua salada en diversas situaciones hipotéticas de crecimiento poblacional y económico. "Lo que en última instancia estamos tratando de hacer es desarrollar estrategias de manejo más sustentables para el delta del Mekong", dice la jefa del equipo, Esther Stouthamer, científica de la tierra y profesora adjunta de la Universidad de Utrecht.

Los mantos freáticos han sido sobreexplotados por los usuarios domésticos, industriales y agrícolas, por lo que su nivel está descendiendo drásticamente. En el pasado, los agricultores de arroz dependían de las redes de canales de agua dulce para la irrigación y para los usos domésticos. Estos canales eran la ruta a través de la cual se agregaban nuevos sedimentos a la tierra durante la temporada de lluvias. Pero después de que el gobierno comunista de Vietnam abrió la economía en 1986 y estimuló las exportaciones de arroz, los aldeanos utilizaron su creciente riqueza para perforar pozos privados, que han reducido al mínimo los recursos de las aguas subterráneas y trastocaron un sistema de siglos de antigüedad que favorecía la resedimentación. Más de un millón de pozos se han perforado desde entonces en el delta del Mekong, y con ello se ha acelerado la subsidencia.<sup>9</sup>

Mientras tanto, la agricultura del arroz ha cedido lugar a la industria del camarón, más lucrativa, que conlleva una necesidad insaciable de agua subterránea dulce. Laura Erban, hidrogeóloga de la Universidad de Stanford, explica que el camarón se cría en estanques salobres, pero su rendimiento disminuye cuando el

agua se vuelve demasiado salada. Por ello los agricultores arroceros usan las aguas de los mantos freáticos para diluir continuamente los estanques, que ahora se extienden, uno tras otro, a lo largo de costas despojadas de los manglares que alguna vez las protegieron.

La sobreexplotación es un problema sobre todo en la provincia de Cà Mau, en la punta sur del delta.<sup>9</sup> En esa provincia se han perforado más de 100 000 pozos; abundan las granjas camaroneras, y la población urbana aumentó de aproximadamente 66 millones en 1990 a 90 millones en 2013.<sup>16</sup> Actualmente la subsidencia en Cà Mau es en promedio de unos 3 cm por año, según un análisis realizado recientemente por Erban.<sup>9</sup>

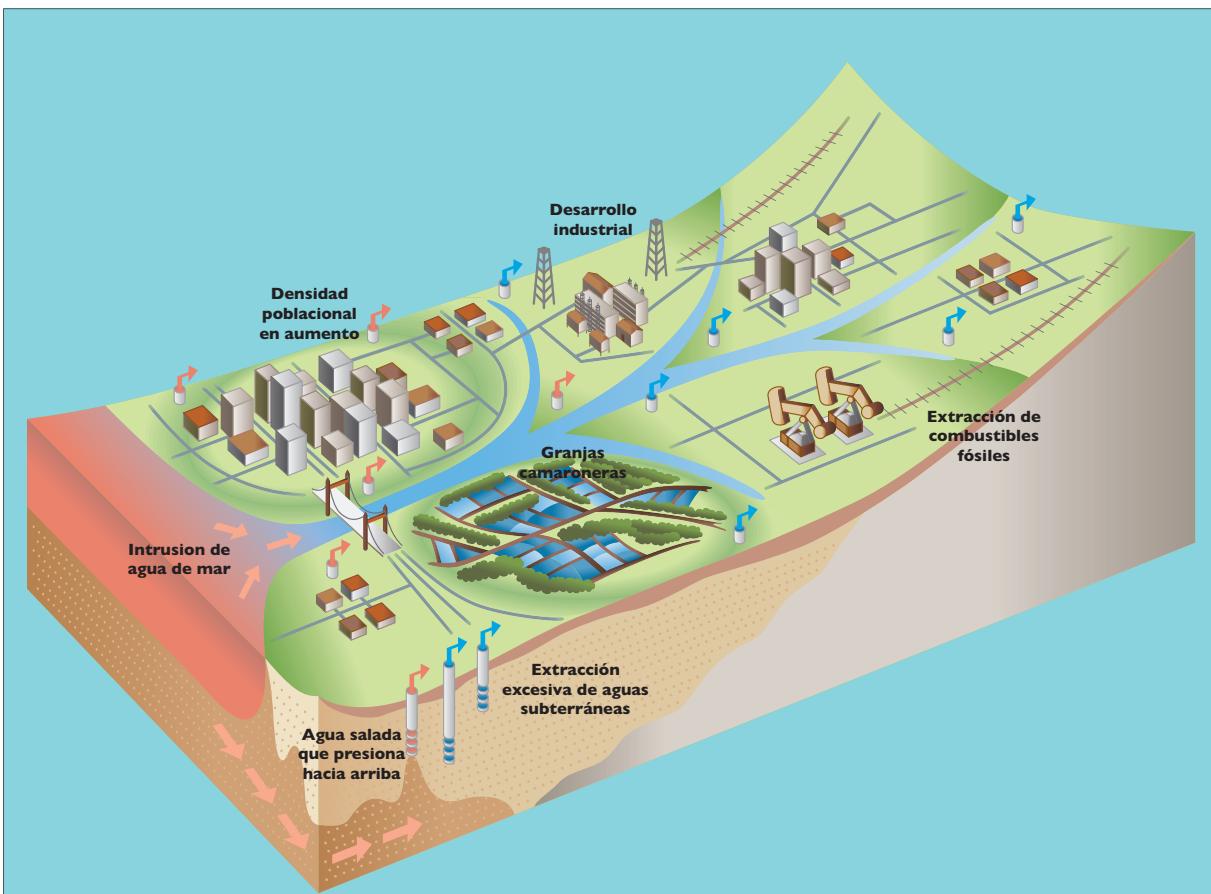
Mientras tanto, se está perforando a profundidades aun mayores para que las bombas lleguen hasta los mantos freáticos, y el agua que bombean sea más salada. Lo mismo ocurre en la densamente poblada costa que va de Cà Mau a Ciudad Ho Chi Minh, situada a unos 250 km al norte.<sup>9</sup> En la reunión para el arranque del proyecto Crecida y Descenso, el 11 de marzo de 2015, un funcionario del agua de la provincia de Sóc Trăng, situada entre Cà Mau y Ciudad Ho Chi Minh, informó que los niveles de salinidad en las aguas subterráneas en la provincia estaban subiendo a un ritmo constante y que habían alcanzado los 4.2 g/L en algunos pozos de los que se obtuvieron muestras en 2013. En general, se considera que el agua que contiene más de 2-3 g/L de sólidos disueltos en total es demasiado salada para beberse.<sup>17</sup>

Gualbert Oude Essink, hidrólogo del Instituto de Investigación Deltares y profesor adjunto de la Universidad de Utrecht, señala que cada año el agua salada está penetrando cada vez más al interior del delta del Mekong. Puesto que el agua salada es más pesada que el agua dulce, emigra descendiendo a través de los sedimentos a los mantos acuíferos

poco profundos, explica. Esto hace que las aguas subterráneas sean cada vez menos potables. Es más, añade, los iones de la sal también reaccionan químicamente con los sedimentos, haciendo que la tierra se vuelva más propensa a la oxidación, a la compactación y, por ende, a la subsidencia.

En los lugares donde se bombea mucho, el agua salada también puede contaminar los recursos de las aguas subterráneas dulces desde abajo. Oude Essink explica que el agua dulce típicamente reside sobre agua marina más antigua que puede ser succionada hacia arriba como consecuencia del bombeo excesivo. Normalmente ese proceso tarda varios años. Pero se puede requerir mucho más tiempo (décadas o más) para que desciendan los niveles de salinidad en los acuíferos de aguas dulces contaminadas una vez que cesa la extracción. Eso es porque, comparada con la presión que jala hacia arriba el agua salada, la gravedad que la hace descender es una fuerza mucho más débil, añade Oude Essink.

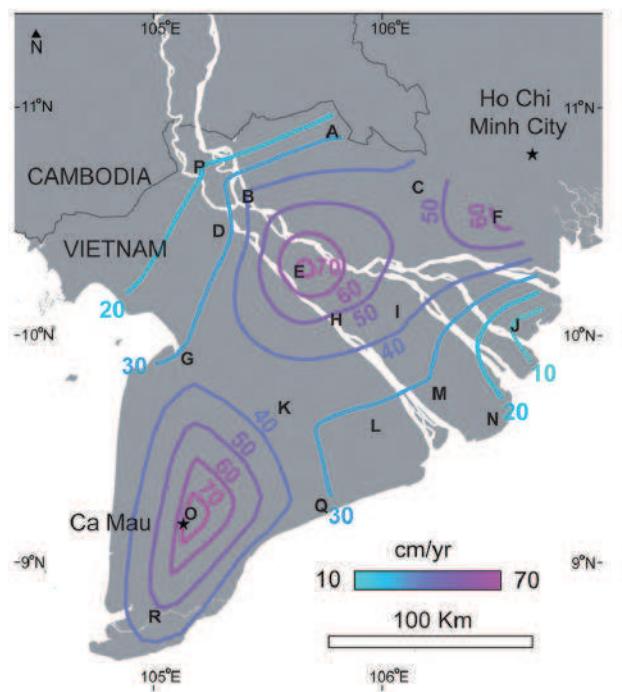
Un nuevo motivo de preocupación es que el exceso de bombeo también podría introducir arsénico en los acuíferos subterráneos profundos que de otra manera estarían libres del contaminante. Erban y sus colegas revisaron las mediciones de arsénico de casi 43 000 pozos profundos en el Delta del Mekong y encontraron que muchos de ellos se habían contaminado con el tiempo. Al parecer, el bombeo excesivo podría forzar al arsénico a introducirse en las aguas subterráneas profundas, amenazando la salud de quienes la beben. Erban especula que la subsidencia relacionada con el bombeo expresa de hecho el arsénico disuelto de las capas de arcilla conforme éstas se compactan. Estos hallazgos contradicen los supuestos anteriores de que las capas de arcilla intermedias protegen los acuíferos profundos de la contaminación con arsénico de las capas poco profundas.<sup>18</sup>



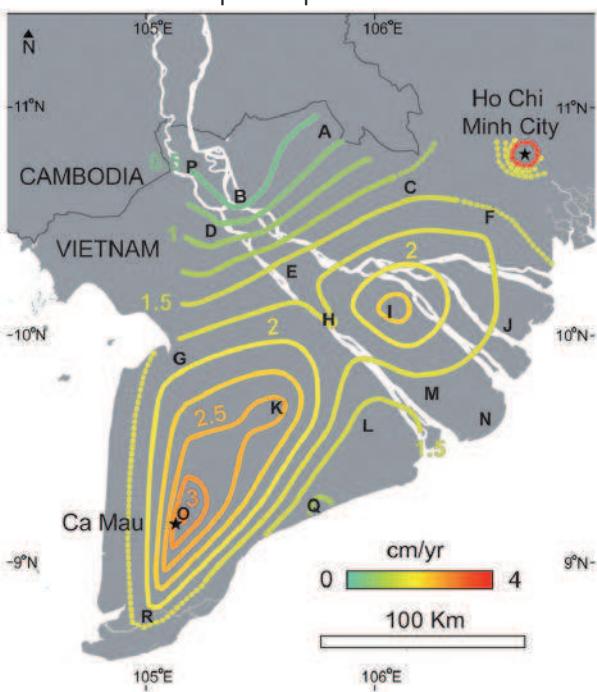
Varios factores relacionados entre sí contribuyen a la subsidencia del terreno en las regiones deltaicas. Las planicies de los deltas se formaron con la deposición de limo durante miles de años, la cual produjo tierras ricamente fértiles. Las poblaciones están aumentando a gran velocidad en estas zonas agrícolas, con muchas repercusiones graves para la tierra. La construcción de presas y diques bloquea la deposición natural de limo fresco, lo que impide que la tierra se nutra y creando cuencas en las que las crecidas se acumulan sin tener una salida. La construcción de presas y diques bloquea la deposición natural de limo fresco, lo que impide que la tierra se nutra y creando cuencas en las que se acumulan las crecidas sin tener una salida. La extracción de aguas subterráneas y de los combustibles fósiles que con frecuencia subyacen a los deltas permite que la tierra se colapse. El simple peso de la creciente infraestructura urbana e industrial comprime aun más la tierra, y las superficies impermeables, tales como los techos y pavimentos, impiden que se rellenen los mantos freáticos. La intrusión de agua salada, que ocurre de manera natural en la mayoría de las zonas costeras, se agrava a medida que la merma de los mantos freáticos reduce la presión del agua. Las poblaciones crecientes y las industrias que hacen un uso intensivo del agua, como las granjas camaronesas, ocasionan una fuerte demanda de recursos freáticos. Se hace necesario entonces perforar los pozos a mayor profundidad, y el agua que sube es más salada puesto que el bombeo excesivo succiona el agua de mar antigua hacia arriba.

Foto: © Daniel Gallant; adaptado de materiales proporcionados por el Instituto de Investigación Deltares

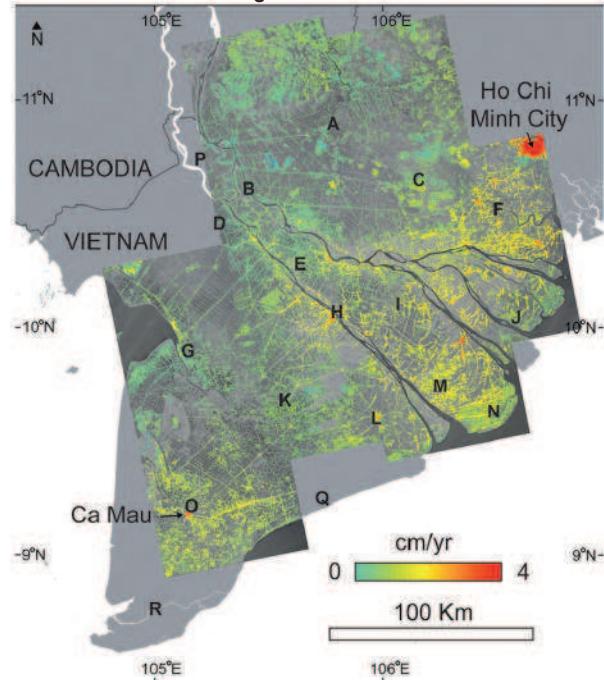
A. Tasa máxima de descenso del nivel de los acuíferos



B. Tasa de subsidencia por compactación



C. Tasa de subsidencia según los datos del InSAR

Foto: Source: Erban et al. (2014)<sup>9</sup>

**En un estudio de subsidencia realizado en el delta del río Mekong en los años 1995 a 2010, Laura Erban y sus colegas utilizaron los datos de seguimiento de los pozos para calcular las tasas anuales promedio de disminución del nivel de los acuíferos (A) y la subsidencia por compactación en las ubicaciones de los pozos (B). Estas estimaciones corresponden bastante con las tasas de subsidencia calculadas a partir de las imágenes satelitales (C). En general, se estima que el delta del Mekong se está hundiendo a razón de 1.6 cm por año.**

## Cómo hacer frente al problema

Japón fue uno de los primeros países en demostrar que cuando se dejan de utilizar las aguas subterráneas, se puede desacelerar la subsidencia. Se detectó subsidencia en Tokio a principios del siglo XX, cuando los funcionarios de esa ciudad se hallaban monitorizando un descenso del nivel del manto freático local debido al bombeo. Después de la Segunda Guerra Mundial, se dejó de bombear aguas subterráneas en la ciudad, que había quedado sumamente dañada, y el nivel del manto freático subió, y la subsidencia se desaceleró visiblemente.<sup>6</sup>

A medida que se recuperó la economía japonesa, se reanudó el uso de las aguas subterráneas, y para 1968 la subsidencia llegó en algunos lugares a los 24 cm por año. El gobierno me-

tropolitano de Tokio impuso regulaciones estrictas al consumo de aguas subterráneas, y para 2006, una vez más se había reducido la subsidencia a apenas un centímetro por año en aquellas áreas que antes habían sido las más afectadas.<sup>6</sup> Oude Essink señala que, si bien esta es una reducción drástica, aún así la subsidencia asciende a un metro por cada siglo.

Bangkok, Tailandia, tiene otra historia de éxito. Ubicada en el delta del río Chao Phraya, Bangkok se estaba comenzando a hundir hasta unos 12 cm por año en la década de 1980, cuando el consumo de aguas subterráneas era en promedio de 1.2 millones de m<sup>3</sup> por día.<sup>7</sup> En 1985, con el hundimiento de las estructuras, la presencia de inundaciones cada vez peores y el alza de los costos de bombear el agua de las tormentas al mar, el gobierno subió drásticamente los impuestos, según Oranuj Lorphensri,

directora de la Oficina de Control de las Aguas Subterráneas en Bangkok. Ella señala que el uso de las aguas subterráneas ha descendido desde entonces a 0.8 millones de m<sup>3</sup> por día, y la subsidencia se ha reducido a 1–2 cm por año. Para compensar el descenso del nivel de las aguas subterráneas, dice Lorphensri, Bangkok cambió a utilizar las aguas superficiales tratadas del cercano río Chao Phraya.

Jakarta, que al decir de Brinkman, el especialista del Instituto Deltares, bombea actualmente unos 180–250 millones de m<sup>3</sup> (incluyendo los usos autorizados y no autorizados de las aguas subterráneas) ahora enfrenta prospectos similares. Según Brinkman, la extracción de las aguas subterráneas profundas que se encuentran debajo de Jakarta ha acelerado la compactación de las arcillas suprayacentes. Esta tendencia es particularmente pronunciada en el

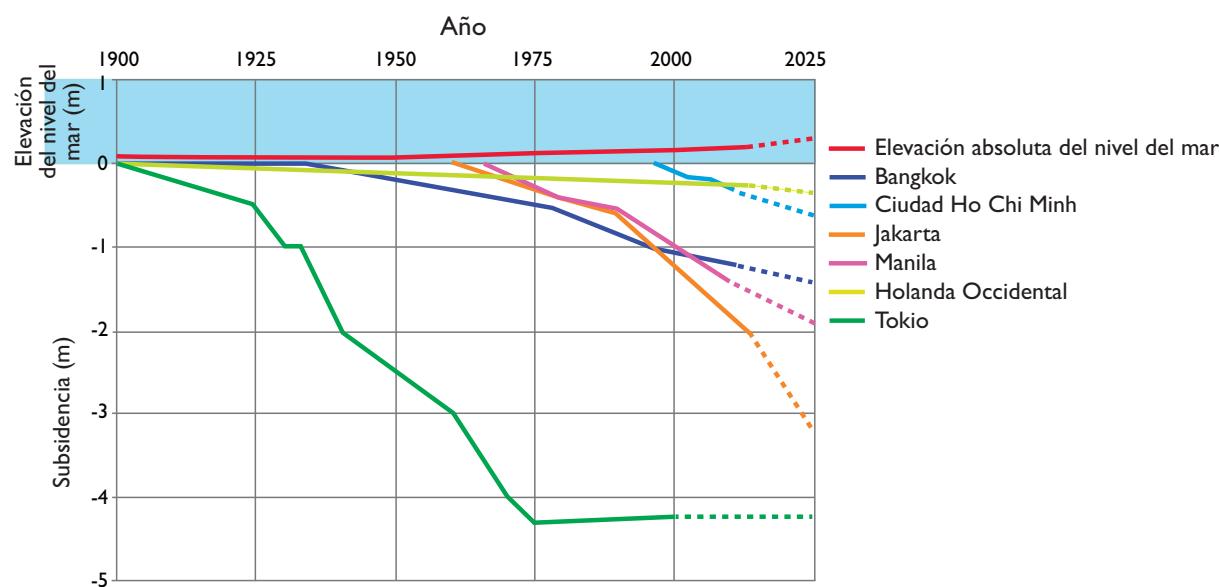


Foto: © Erkens et al. (2015)<sup>22</sup>

**Los datos del Instituto Deltares comparan las tasas de subsidencia históricas de las zonas costeras de todo el mundo con los cálculos del índice global absoluto de la elevación del nivel del mar. Estas tasas son promedios; la subsidencia puede variar considerablemente en una determinada ciudad, dependiendo de los niveles de los mantos freáticos y de las características de la subsuperficie. En algunas ciudades la subsidencia se está acelerando como resultado del crecimiento económico. Tokio, sin embargo, ha demostrado que las medidas locales de mitigación pueden frenar esta tendencia.**

noroeste de Jakarta, donde la subsidencia puede alcanzar los 20 cm por año.<sup>3</sup> Brinkman añade que las aguas subterráneas poco profundas con contaminación superficial pueden permanecer atrapadas bajo la ciudad durante semanas o meses en las épocas de secas, cuando no hay agua para descargar las tierras bajas en la parte norte del sistema.

Erkens señala que los edificios altos, hoteles e industrias de la ciudad prefieren utilizar aguas subterráneas profundas en vez de aguas superficiales tratadas porque saben que la calidad de esta última es mala. "Es el problema de la gallina y el huevo", dice; "las compañías que surten aguas superficiales tratadas se quejan de que tienen pocos usuarios y que no tienen suficiente dinero para hacer mejoras, pero tampoco pueden acrecentar su clientela porque la calidad del agua no es confiable."

Sin embargo, Brinkman hace hincapié en que Jakarta tiene pocas alternativas. Si los funcionarios de la ciudad no logran reducir el uso de las aguas subterráneas profundas en los próximos cinco años, dice, para 2030 la población del noroeste de Jakarta (actualmente unos 4 millones de personas, y el número sigue en aumento) tendrá que ser evacuada a tierras más altas, o bien, se tendrá que cerrar la Bahía de Jakarta mediante un gigantesco dique marino planeado por el gobierno.<sup>19</sup> "Esa es la realidad", apunta Brinkman.

Mientras tanto, los funcionarios en Vietnam tienen la esperanza de que la investigación señale otros remedios que no sean limitar el uso de las aguas subterráneas gratuitas, que son un motor para el crecimiento económico. En la reunión de arranque del proyecto Crecida y Descenso, algunos oficiales se mostraron escépticos en cuanto a que la explotación de las aguas subterráneas sea la causa de la subsidencia en el delta del Mekong. "La gente simplemente dice que 'las aguas subterráneas están ocasionan-

do esto', pero no tenemos datos para probarlo", dice Bui Tran Vuong, director general adjunto de la División de Recursos Hídricos, Planeación e Investigación de Vietnam del Sur.

Stouthamer insiste en que la evidencia proveniente de todo el mundo señala hacia el uso excesivo de aguas subterráneas como la causa principal. Sin embargo, añade que es probable que intervengan otros factores, tales como la compactación que resulta cuando la infraestructura urbana se construye sobre sedimentos de arcilla o de turba con un mal soporte. Cambiar los códigos de modo que se brinde un mejor apoyo a las infraestructuras desde abajo y se construya con materiales más ligeros podría contribuir a evitar la subsidencia, dice.

Otra opción posible es bombar agua de regreso a los mantos subterráneos a fin de contrarrestar la subsidencia. Esta propuesta, conocida como Gestión de Recarga de los Acuíferos (GRA),<sup>20,21</sup> puede ser objeto de controversias. Syvitski advierte que podría tener consecuencias impredecibles. "Incluso si se pudiera hacer eso, los caminos y los edificios se combiarían conforme se elevara la tierra". Oude Essink disiente, y afirma que los proyectos de GRA en todo el mundo demuestran que es un enfoque potencialmente valioso para reducir el descenso de los niveles de las aguas subterráneas y, por lo tanto, la subsidencia.

Probablemente sería problemático construir diques en los trechos enormes de las riberas de los deltas, como lo prueba la experiencia de Bangladesh con los *polders*. Los diques permiten que la tierra que protegen se hunda, dice Syvitski, y es necesario elevarlos de manera rutinaria a fin de mantenerse al ritmo de la elevación del mar. Estos ejemplos ilustran los retos de enfrentar un problema insidioso apenas perceptible para la población en tiempo real. Es difícil notar un descenso de unos cuantos

centímetros por año en la elevación de la tierra, hasta que sus consecuencias se materializan en un suceso catastrófico, como una inundación devastadora. Sin embargo, con el tiempo estos descensos se vuelven considerables.

En aquellos lugares en los que el nivel del mar se está elevando aproximadamente 32 cm por cada siglo,<sup>1</sup> la tierra que se hunde 10 cm por año se hundirá ese mismo intervalo en sólo tres años. Si bien se suele prestar más atención a la elevación en los niveles del mar, para una gran cantidad de personas en todo el mundo, la subsidencia es, por mucho, el problema más inmediato. Sin embargo, debido a que la subsidencia es un problema local, se requieren soluciones locales para mantenerlo a raya.

**Charles W. Schmidt, MS**, galardonado escritor científico que radica en Portland, ME, ha publicado en las revistas *Discover Magazine*, *Science* y *Nature Medicine*.

## Referencias

- IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker TF, et al., comps.). Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY: Cambridge University Press (2014). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Renaude FG, et al. Tipping from the Holocene to the Anthropocene: how threatened are major world deltas? *Curr Opin Environ Sustain* 2013, 5(6):644–654; doi:10.1016/j.cosust.2013.11.007
- Abidin HZ, et al. Environmental Impacts of Land Subsidence in Urban Areas of Indonesia [informe]. Presentado en: Semana de Trabajo de la FIG 2015: De la sabiduría de las eras antiguas a los desafíos del mundo moderno, Sofía, Bulgaria, 17–21 de mayo de 2015. [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: [https://www.fig.net/resources/proceedings/fig\\_proceedings/fig2015/papers/ts041/TS041\\_abidin\\_andreas\\_et\\_al\\_7568.pdf](https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2015/papers/ts041/TS041_abidin_andreas_et_al_7568.pdf)
- Syvitski JPM, et al. Sinking deltas due to human activities. *Nat Geosci* 2009, 2(10):681–686 (2009); doi:10.1038/ngeo629.
- HOPE Worldwide Indonesia. Jakarta Flood Disaster Relief—Progress Report [comunicado

- de prensa]. Jakarta, Indonesia:HOPE Worldwide Indonesia (7 March 2007). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.standardnewswire.com/news/9579733.html>
6. Sato XC, et al. Land subsidence and groundwater management in Tokyo. *Internat Rev Environ Strat* 2006; 6(2):403.
7. Phien-wej N, et al. Land subsidence in Bangkok, Thailand. *Engineer Geol* 2006; 82(4):187–201; doi:10.1016/j.enggeo.2005.10.004.
8. Stanley DJ, Warne AG. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise. *Science* 1994; 265(5169):228–231; doi:10.1126/science.265.5169.228.
9. Erban LE, et al. Groundwater extraction, land subsidence, and sea-level rise in the Mekong Delta, Vietnam. *Environ Res Lett* 9(8):084010 (2014); doi:10.1088/1748-9326/9/8/084010.
10. Workman D. Rice Exports by Country [página web]. World's Top Exports (2015). [consultada el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.worldstopexports.com/rice-exports-country/3311>
11. Gambolati G, et al. Peat land oxidation enhances subsidence in the Venice watershed. *EOS* 2005; 86(23):217–220; doi:10.1029/2005EO230001.
12. Higgins SA, et al. InSAR measurements of compaction and subsidence in the Ganges–Brahmaputra Delta, Bangladesh. *J Geophys Res* 2014; 119(8):1768–1781; doi:10.1002/2014JF003117.
13. Brown S, Nicholls RJ. Subsidence and human influences in mega deltas: the case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna. *Sci Total Environ* 2015; 527–528:362–374; doi:10.1016/j.scitotenv.2015.04.124.
14. Mehedi H. Climate-Induced Displacement: Case Study of Cyclone Aila in the Southwest Coastal Region of Bangladesh. Boyra, Provincia de Khulna, Bangladesh: Coastal Livelihood and Environmental Action Network (2010). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/62101355/Climate-Induced-Displacement- Case-Study-of-Cyclone-Aila-in-the-Southwest-Coastal- Region-of-Bangladesh#scribd>
15. Auerbach LV, et al. Flood risk of natural and embanked landscapes on the Ganges–Brahmaputra tidal delta plain. *Nat Clim Change* 2015; 5(2):153–157; doi:10.1038/nclimate2472.
16. Vietnam Population 2013 [página web]. World Population Statistics (2015). [consultada el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.worldpopulationstatistics.com/vietnam-population-2013/>
17. Barlow PM. Ground Water in Freshwater–Saltwater Environments of the Atlantic Coast. USGS Circular 1262. Reston, VA: U.S. Servicio Geológico de Estados Unidos, Departamento del Interior de Estados Unidos (actualizado el 11 de enero de 2015). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262/>
18. Erban LE, et al. Release of arsenic to deep groundwater in the Mekong Delta, Vietnam, linked to pumping-induced land subsidence. *Proc Natl Acad Sci USA* 2013; 110(34):13751–13756; doi:10.1073/pnas.1300503110.
19. Stedman L. Plan progress for the Great Jakarta Sea Wall. *Water21 Magazine* (febrero de 2014). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <http://www.iwapublishing.com/water21/february-2014/plan-progress- great-jakarta-sea-wall>
20. Dillon P. Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology J* 2005; 13(1):313–316; doi:10.1007/s10040-004-0413-6.
21. Sanchez F, et al. SWIBANGLA: Managing Salt Water Intrusion Impacts in Bangladesh. Delft, Holanda: Deltares (2015). [consultado el 23 de junio de 2015]. Disponible en: <https://publicwiki.deltares.nl/display/FRESHSALT/SWIBANGLA+Managing+saltwater+intrusion+impacts+in+Bangladesh>
22. Erkens G, et al. Sinking Coastal Cities [resumen]. Para presentarse en el Noveno Simposio Internacional de Subsistencia del Terreno; 2015 nov 15–19; Nagoya, Japón.