

# La explotación de las aguas subterráneas en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê (São Paulo, Brasil): crónica de una crisis anunciada

R.C. Hirata<sup>(1)</sup>, L.C. Ferrari<sup>(1)</sup>, L.M.R. Ferreira<sup>(2)</sup> y M. Pede<sup>(3)</sup>

(1) Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.  
Rua do Lago 562. Cidade Universitária. CEP 05508-900. São Paulo, SP. Brasil  
E-mail: rhirata@usp.br - lcFerrari@uol.br

(2) Instituto Geológico - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo.  
Av. Miguel Stéfano 3900. CEP 04301-903 São Paulo, SP. Brasil  
E-mail: lumartin@igeologico.sp.gov.br

(3) Consultor privado

## RESUMEN

La cuenca hidrográfica del Alto Tietê es una unidad hidrológica que comprende casi la totalidad de la región metropolitana de São Paulo, principal centro económico del País, donde viven más de 17,5 millones de personas (18% del Producto Interno Neto, US\$ 147 billones). En este área de 5.680 km<sup>2</sup>, la mayor parte de la población es abastecida por agua proveniente de fuentes superficiales (2.018 Mm<sup>3</sup>/a; 64 m<sup>3</sup>/s). Los recursos hídricos subterráneos desempeñan un papel importante en el abastecimiento complementario al sector privado, a través de más de 7.000 pozos en operación, de un universo de más de 10.000 pozos perforados, con caudales superiores a 249 Mm<sup>3</sup>/a (7,9 m<sup>3</sup>/s). El precio que las empresas públicas están cobrado por el agua permite que un pozo de 200 m de profundidad sea amortizado en apenas 6 meses. Esta situación ha generado un incremento de 450 nuevas captaciones al año. En caso de que persista este escenario, dentro de los próximos 15 años se espera que el volumen de agua explotada por los pozos supere los caudales de recarga de los acuíferos, inclusive la ocasionada por fugas de la red pública de agua y alcantarillado, que es de aproximadamente 498 Mm<sup>3</sup>/a (15,8 m<sup>3</sup>/s). No existe hasta el momento un programa que discipline la explotación de los acuíferos en la cuenca, lo que ha ocasionado problemas de interferencias entre pozos y una sensible disminución de los niveles hidráulicos. Esta falta de control ocasionará una pérdida del recurso, obligando al usuario de las aguas subterráneas a sustituir sus pozos por el agua distribuida por las empresas concesionarias. Esto podrá causar serios problemas a la red pública, considerando que ya trabaja en su límite. Tal problema de migración de un servicio a otro, también podrá generar contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras clave: acuífero, Brasil, cuenca hidrográfica del Alto Tietê, São Paulo, sobreexplotación

## ***Groundwater exploitation in the upper Tietê Basin (São Paulo, Brazil): chronicle for a foreseen crisis***

### ABSTRACT

*The Upper Tietê Watershed is a hydrologic unit that encompasses almost totally the Metropolitan Region of São Paulo (Brazil), the main economic area of the country (18% of GNP, US\$ 147 billion). In this area of 5.680 km<sup>2</sup>, live 17.5 million inhabitants, whose water supply comes from surface sources. Groundwater plays an important role on the private complementary supply through more than 7 thousand active wells, out of 10 thousand drilled ones, with extraction higher than 249 Mm<sup>3</sup>/a (7,9 m<sup>3</sup>/s). If one considers the water prices charged by the public companies, the costs of a 200 m deep well are amortized in 6 months. This situation has incremented the perforation of 450 new wells per year. The persistence of this scenery for the oncoming 15 years will make the well exploitations larger than the aquifer recharge, even when taking into account the losses of the public mains water and sewer, currently around 498 Mm<sup>3</sup>/a (15,8 m<sup>3</sup>/s). Up to this moment does not exist a regulation program to discipline the aquifer exploitation in the watershed, and this situation has caused drawdown interference among the existing wells, as well as a significant reduction on the hydraulic heads. This lack of control, not to mention the possible contamination of the aquifers, will obligate the water-well consumer to replace the groundwater by the one distributed by the concessionaire companies. This will cause serious problems of water demand, once the public supply system is already working in its limit.*

Key words: aquifer, Brasil, overexploitation, São Paulo, Upper Tietê Basin

## Introducción

La cuenca hidrográfica del Alto Tietê (CAT) es la más importante y compleja unidad hidrográfica del Estado de São Paulo (Fig. 1). Presenta un área de 5680 km<sup>2</sup> en la cual se localiza casi la totalidad de la Región Metropolitana de São Paulo, donde viven 17,5 millones de personas. Las actividades económicas en esta área, constituidas por industrias y empresas de servicios, representan 19% del total de la riqueza del País, totalizando US\$ 147 billones en el año de 1997.

No obstante, el abastecimiento público de agua en la CAT se realiza casi exclusivamente por manantiales superficiales, totalizando 2.018 Mm<sup>3</sup>/a (64 m<sup>3</sup>/s); los recursos hídricos subterráneos contribuyen de forma decisiva para complementar el suplemento de agua en la región. Un gran número de industrias, con dominios residenciales y empresas aisladas utilizan los acuíferos como fuente alternativa o primaria de agua.

Se estima que aproximadamente 249 Mm<sup>3</sup>/a (7,9 m<sup>3</sup>/s) son extraídos de los sistemas acuíferos de la cuenca, a través de 7.000 pozos en operación, de un universo de más de 10.000 pozos perforados. Es notorio el incremento en la construcción de nuevas captaciones, estimado en 480 pozos al año con caudales adicionales de 17 Mm<sup>3</sup>/a (0,5 m<sup>3</sup>/s).

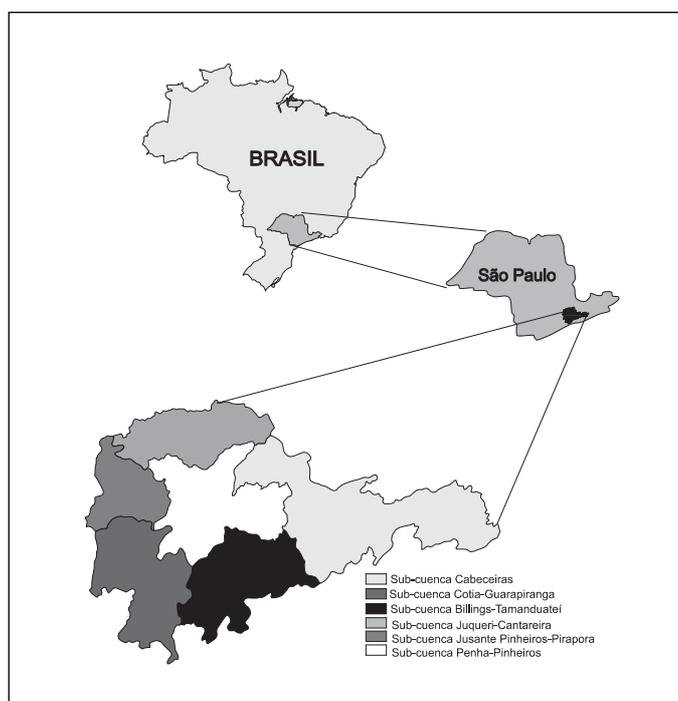


Fig. 1. La Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê y sus seis sub-cuencas  
Fig. 1. The Upper Tietê Basin and its sub-basins

La importancia del recurso se hace mayor cuando se analizan las restricciones existentes en la oferta del recurso en la cuenca, incluyendo los recurrentes problemas de falta de agua en la red pública de distribución. Adicionalmente, se sabe que la casi totalidad de usuarios está conectada al sistema público, pero debido a las tarifas establecidas por las concesionarias, sobretodo para el gran usuario, muchos perforan pozos con el objetivo de reducir los gastos de operación. Esto es particularmente evidente cuando se analiza el perfil del usuario de agua subterránea, centralizado en industrias y condominios de medio y alto nivel.

En contraste con la creciente demanda, no existe hasta el momento un control efectivo del uso de este recurso. No hay, por ejemplo, un inventario de usuarios. Hasta junio de 1999, el DAEE (Departamento de Aguas y Energía Eléctrica), entidad que administra los recursos hídricos del Estado de São Paulo, había licenciado y/o otorgado apenas 640 pozos, del universo de más de 10.000 captaciones existentes en la cuenca.

La explotación sin control de acuíferos puede traer como consecuencia serios problemas, inclusive la pérdida del recurso, por sobreexplotación y reducción del almacenamiento acuífero, o por el flujo inducido de aguas contaminadas desde regiones más superficiales hacia niveles más profundos, que generalmente estarían más protegidos.

Con este escenario, el presente trabajo pretende, a partir de los datos obtenidos en las empresas de perforación de pozos que actúan en la CAT, establecer el escenario actual de explotación de las aguas subterráneas y las tendencias de uso, así como los problemas consecuentes de esta explotación.

## Sistemas acuíferos de la cuenca hidrográfica del Alto Tietê

La cuenca hidrográfica del Alto Tietê (CAT) es una unidad hidrológica que engloba la cuenca Sedimentaria de São Paulo (1.452 km<sup>2</sup>) y las rocas precámbricas del basamento cristalino (4.238 km<sup>2</sup>) que la circundan. Este contexto geológico define: el Sistema Acuífero Cristalino y el Sistema Acuífero Sedimentario (Fig. 2).

El Sistema Acuífero Cristalino (SAC) tiene límites coincidentes aproximadamente con las divisorias de drenaje superficial, ubicadas entre las cotas 800 a 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm). El sistema es de carácter libre a semi-libre y fuertemente heterogéneo y anisotrópico.

EL SAC presenta características productivas diferenciadas según el tipo de litología de los acuíferos

(Tabla 1). Es posible distinguir dos unidades, una asociada a las rocas graníticas y filitas (Acuífero de Rocas Graníticas) y otra asociada a las rocas metamórficas (Acuífero de Rocas Metamórficas) (Hirata y Ferreira 2001). El valor medio de transmisividad para todo el sistema es de  $4,5 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s (3,5 m<sup>2</sup>/día) (DAEE, 1975).

Las características hidráulicas de la sección intemperizada del SAC fueron estudiadas por Rebouças (1992), quien muestra que la conductividad hidráulica es función del nivel del perfil de alteración de la roca. Esta varía de muy baja ( $1 \times 10^{-7}$  a  $1 \times 10^{-6}$  m/s), en el tercio superior del perfil de alteración, a muy alta ( $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-3}$  m/s) en la zona de transición, entre la roca relativamente alterada y la roca sana.

El Sistema Acuífero Sedimentario (SAS), a pesar de cubrir sólo el 25% del área de la cuenca hidrográfica, es el más intensamente explotado. Las altitudes medias de las colinas son de 760 msnm, con máximos de 840 msnm y mínimos de 710 msnm. Este sistema acuífero es de carácter libre a semi-confinado, de porosidad primaria y bastante heterogéneo. La

transmisividad media de este sistema acuífero es de  $5,8 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s (50 m<sup>2</sup>/día) (DAEE, 1975).

En el SAS fue posible identificar dos nuevas unidades: la primera asociada a la Formación São Paulo, con capacidad específica (Q/s) media de 0,48 m<sup>3</sup>/h/m y la segunda asociada a la Formación Resende, más productiva, con Q/s media de 0,91 m<sup>3</sup>/h/m (tabla 1). Las formaciones neocenoicas, Tremembé y Itaquaquecetuba, no definen unidades acuíferas, debido a su pequeña expresión en el área, lo mismo ocurre para los depósitos asociados con sedimentación cuaternaria, debido al poco espesor.

Es cierto que dentro de una misma unidad acuífera existe una gran variación de productividad. En este estudio fue posible identificar los municipios donde se encuentran las mayores productividades acuíferas. Estas localidades, cuyos pozos explotan el SAC, son: Cajamar (caudal específico del pozo, Q/s 2,79 m<sup>3</sup>/h/m, medio), Santana del Parnaíba (Q/s 2,20 m<sup>3</sup>/h/m), Santo André (Q/s 1,45 m<sup>3</sup>/h/m) y Pirapora do Bom Jesus (Q/s 1,10 m<sup>3</sup>/h/m). En cuanto los municipios que

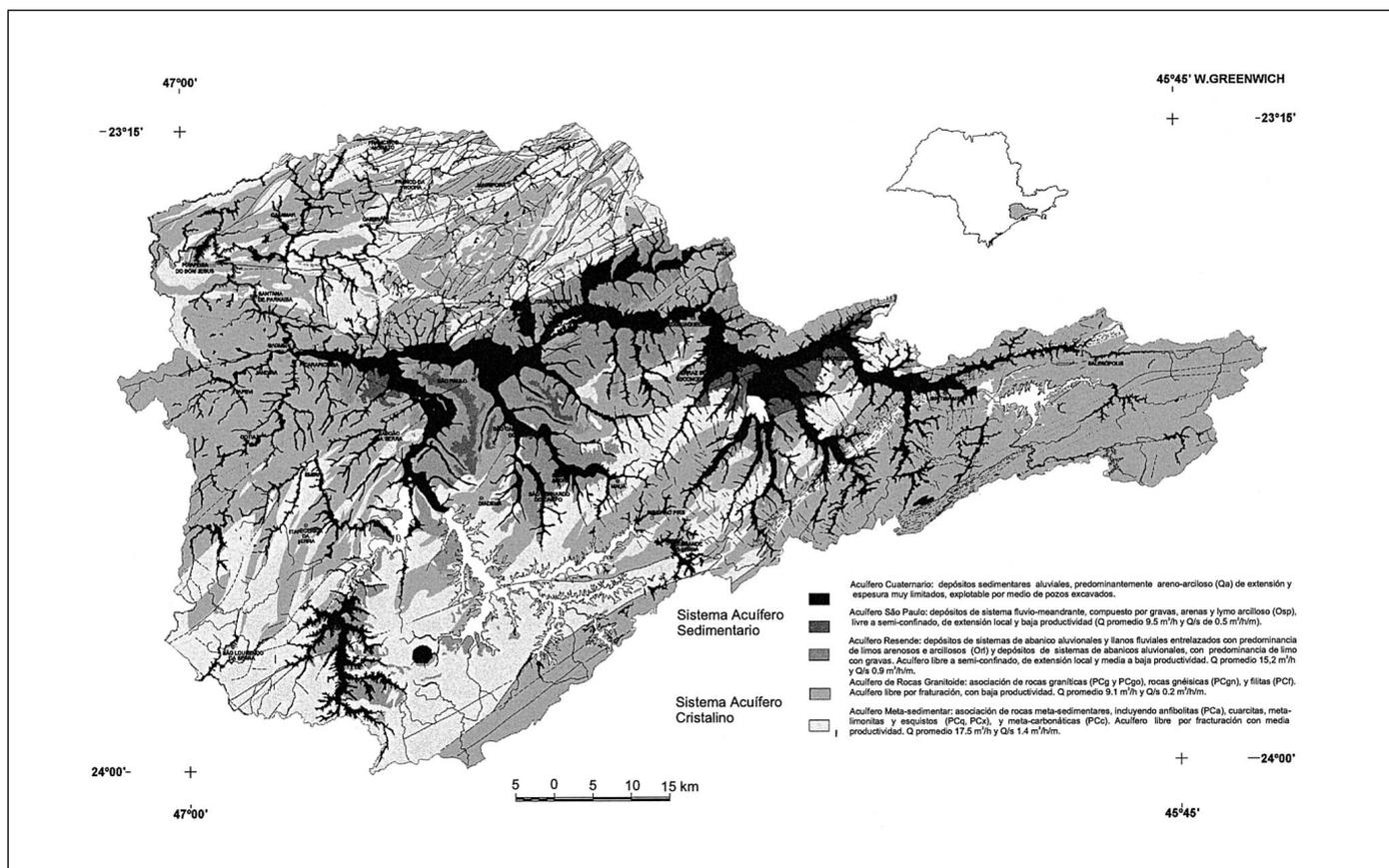


Fig. 2. Distribución de los sistemas acuíferos en la Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê (Hirata y Nunes da Silva, 1999)  
 Fig. 2. Distribution of aquifer systems in the Upper Tietê Basin (Hirata y Nunes da Silva, 1999)

| Sistema Acuífero | Acuíferos propuestos  | Número de pozos estudiados | Profundidad media de los pozos (m) | Caudal medio (m <sup>3</sup> /h) | Capacidad específica Q/s (m <sup>3</sup> /h/m) |         |                   |
|------------------|---|----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|---------|-------------------|
|                  |   |                            |                                    |                                  | media  | mediana | Desviac. estándar |
| Sedimentario     | São Paulo (Osp)   | 17                         | 129                                | 9,51                             | 0,48   | 0,49    | 1,20              |
|                  | Resende (Orl, Orf)  | 111                        | 165,5                              | 15,24                            | 0,91   | 0,31    | 0,79              |
| Cristalino       | Rocas Graníticas (P <sub>ε</sub> f, P <sub>ε</sub> g, P <sub>ε</sub> go, P <sub>ε</sub> gn)       | 90                         | 198,5                              | 9,07                             | 0,20   | 0,09    | 0,30              |
|                  | Rocas Metasedimentarias (P <sub>ε</sub> la, P <sub>ε</sub> q, P <sub>ε</sub> x, P <sub>ε</sub> c) | 73                         | 176,4                              | 17,48                            | 1,35   | 0,29    | 4,63              |

|                   |   |
|-------------------|---|
| Osp               | Predominantemente capas de arena y cascajo.   |
| Orl               | Predominancia de lodolitas arenosas a arcillosas, con gravas y fragmentos de cuarzo.  |
| Orf               | Predominancia de lodolitas gravosas con lodolitas arenosas subordinadas.  |
| P <sub>ε</sub> f  | Predominancia de filitas ocurriendo subordinadamente esquistos.   |
| P <sub>ε</sub> g  | Rocas graníticas predominantemente macizas de granulación variada.  |
| P <sub>ε</sub> go | Rocas graníticas orientadas y/o foliadas, de granulación variada, incluyendo porciones gneísicas, migmatíticas y blastomiloníticas asociadas.               |
| P <sub>ε</sub> gn | Rocas predominantemente gneísicas, incluyendo, porciones locales de rocas graníticas orientadas, esquistos feldespáticos y milonitas diversas subordinadas. |
| P <sub>ε</sub> la | Anfibolitas.  |
| P <sub>ε</sub> q  | Predominancia de cuarcitas, con ocurrencia subordinada de meta-limolitas y esquistos.   |
| P <sub>ε</sub> x  | Predominancia de mica-esquistos, con cuarcitas y meta-limolitas subordinadas, localmente feldespáticas.   |
| P <sub>ε</sub> c  | Predominancia de meta-calizas.  |

Tabla 1. Producción individual de los pozos para diferentes unidades acuíferas en la Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê (Hirata y Ferreira, 2001)

Table 1. Individual production of wells for different aquifer units in the Upper Tietê Basin (Hirata y Ferreira, 2001)

explotan el SAS son los de São Paulo [zonas norte (Q/s 3,04 m<sup>3</sup>/h/m), este y centro (Q/s 1,15 m<sup>3</sup>/h/m)] y de Guarulhos (Q/s 1,05 m<sup>3</sup>/h/m). En el SAS las mayores productividades están asociadas a las áreas de mayor espesor saturado y predominancia de la Formación Resende con relación a la Formación São Paulo. En el caso del SAC, la mayor productividad esta relacionada con la ocurrencia del Acuífero de Rocas Metamórficas, debido a su doble porosidad.

El modelo de circulación regional aceptado muestra que el agua de lluvia recarga los acuíferos en toda su extensión no impermeabilizada. Otra importante recarga ocurre por las fugas de la red pública de abastecimiento de agua y de alcantarillado. Una vez que ingresan en el acuífero, las aguas fluyen en dirección a los drenajes superficiales, su área de descarga. El río Tietê en la ciudad de Barueri (710 ms.n.m.), representa el punto de menor potencial hidráulico del acuífero, y es hacia allí donde finalmente fluyen todas las aguas drenadas de los dos sistemas acuíferos. Con el régimen de bombeo actual en la CAT, son varias las regiones donde los nuevos niveles acuíferos se encuentran bajo los 710 ms.n.m., modificando el trazo original de las líneas de flujo.

### Potencialidad de uso del recurso hídrico subterráneo

El volumen máximo de agua a ser extraído de un acuífero está íntimamente asociado con su recarga y

con el costo de producción del agua, incluyendo su extracción, tratamiento y distribución. Sin embargo existen estudios que proponen que la explotación de un acuífero induce recargas mayores que las naturales (Custodio y Llamas 1981, Fetter 1988). En este trabajo el valor estático de la infiltración efectiva será utilizado como una referencia, debido a las propias limitaciones en el conocimiento de la hidrogeología de la CAT (tabla 2).

La explotación recomendable será, por tanto, una fracción del volumen que se infiltra y se convierte en recarga, limitada a un costo dado. Extracciones superiores a la propia recarga podrán causar problemas a largo plazo, incluyendo hasta la pérdida del recurso. Incluso cuando los caudales totales extraídos son inferiores a la recarga, habrá limitaciones asociadas con la densidad de pozos existentes en el área. Cualquier extracción de un pozo crea un cono de abatimiento. Pozos muy próximos producirán una superposición de sus conos individuales creando descensos pronunciados, muchas veces no sustentables por el acuífero. Por tanto, una apropiada explotación del acuífero debe considerar tanto la recarga como los volúmenes de agua extraídos por el nuevo pozo, de tal modo que sea compatible con las obras existentes a su alrededor.

Existe una gran dificultad para estimar la recarga en áreas altamente urbanizadas, ya que no se dispone de muchos datos de campo (Foster et al., 1999). Así, los datos existentes de la CAT permiten apenas

evaluar las reservas y el régimen de explotación de forma indicativa. Se requieren estudios más detallados para precisar los resultados. En la Tabla 2 se reproducen los valores de recarga en las sub-cuencas, considerando la recarga en áreas no urbanizadas, áreas urbanizadas, fugas de la red de agua potable y de alcantarillado y vertidos directos por sistemas de saneamiento *in situ*.

Sabesp-Cepas (1994) estimaron un volumen total de agua subterránea (reserva secular o permanente) de 6357 Mm<sup>3</sup> en el dominio del Sistema Acuífero Cristalino y de 8785 Mm<sup>3</sup> en el dominio del Sistema Acuífero Sedimentario, totalizando 15.142 Mm<sup>3</sup> para la CAT. Se entiende por reserva secular o permanente el total de agua almacenada en el acuífero, aunque solamente una fracción sea aprovechable. Este cálculo fue definido a partir de la multiplicación del área de las unidades por el rendimiento específico (Sy) y el espesor acuífero saturado.

Las reservas reguladoras o dinámicas corresponden a la totalidad de la recarga del sistema acuífero, siendo una porción del agua infiltrada en el suelo. En

condiciones naturales este caudal es igual al cedido por los acuíferos a los ríos, alimentando sus caudales de base. A este volumen puede también sumarse el agua infiltrada por las pérdidas de las redes de distribución de agua y de alcantarillado.

En una situación de no-ocupación, se calculó para la CAT una recarga media de 355 mm/año (0,355 Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año). Cuando se admite que la gran parte del SAS está ocupada y parcialmente impermeabilizada, la recarga natural puede reducirse a 67 mm/año (0,067 Mm<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año), un valor medio entre los obtenidos por Iritani (1993), que estudió áreas de baja densidad de ocupación, y por Menegasse-Velásquez (1996), que analizó áreas densamente pobladas. No obstante, la urbanización induce una recarga no-natural, que suma 536 Mm<sup>3</sup>/año (17,0 m<sup>3</sup>/s), representando 19,7% (pérdidas físicas) de la distribución total de agua en la CAT (64 m<sup>3</sup>/s), más 5% de la red de alcantarillado y 30% de la infiltración total de los sistemas de saneamiento *in situ* (fosas sépticas y negras). Los cálculos de infiltración por sistemas sépticos fueron basados en la población sin red de alcantarillado en

| Sistema acuífero   | Área (km <sup>2</sup> ) | Espesor medio (m) | Caudal específico medio (Sy) | Coefficiente de almacenamiento medio (S) | Tasa media de recarga natural (mm/año)                 | Reserva secular (Mm <sup>3</sup> /a)               |
|--------------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|--|--|--|
| Cristalino (SAC)   | 4.238                   | 50                | 0,03 (*1)                    | -  | 355 (*2) en área abierta                               | 6.357  |
| Sedimentario (SAS) | 1.452                   | 100               | 0,06 (*3)                    | 0,001 (*3)                               | 355 (*2) en área abierta<br>67 (*4) en área urbanizada | semi-confinada 73 (85)<br>+<br>porción libre 8.712 |
| Totales            | 5.690                   | -                 | -                            | -  | -  | 15.142   |

| Sub-cuenca             | Área Total (km <sup>2</sup> ) | Área Urbana (km <sup>2</sup> ) | Recarga zona no-urbanizada (Mm <sup>3</sup> /a) (*6) | Recarga zona urbanizada (Mm <sup>3</sup> /a) (*4) | Recarga por fugas (Mm <sup>3</sup> /a) (*7) | Recarga total (Mm <sup>3</sup> /a) | Recarga total (mm/a) |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|---|---|------------------------------------|----------------------|
| Cabeceiras             | 1694                          | 350,8                          | 476,84   | 23,50   | 66,88                                       | 567,22                             | 335                  |
| Cotia-Guarapiranga     | 964                           | 124,3                          | 298,20   | 8,33  | 23,35                                       | 329,88                             | 342                  |
| Penha-Pinheiros        | 1019                          | 1019                           | 0  | 68,27   | 313,19                                      | 381,46                             | 374                  |
| Jusante Penha-Pirapora | 479                           | 218,1                          | 92,62  | 14,61   | 49,15                                       | 156,38                             | 326                  |
| Juqueri-Cantareira     | 713                           | 91,7                           | 220,56   | 6,14  | 11,50                                       | 238,21                             | 334                  |
| Billings               | 1025                          | 260,4                          | 217,43   | 17,45   | 71,43                                       | 360,31                             | 352                  |
| Totales                | 5895                          | 2064                           | 1359,65  | 138,31  | 535,51                                      | 2033,46                            | 345                  |

(\*1) DAEE (1975).  
 (\*2) sin ocupación.  
 (\*3) Sabesp-Cepas (1994).  
 (\*4) Media entre valores (67mm/a) de Iritani (1993) y Menegasse-Velasquez (1996).  
 (\*5) Porción semi-confinada del acuífero (50% de la área).  
 (\*6) Recarga natural de 355 mm/año, sin ocupación.  
 (\*7) Fuga de la red pública (agua 19,7% + alcantarillado 5% de 64 m<sup>3</sup>/s o 343 mm/a) y recarga natural en áreas ocupadas (67 mm/a).

Tabla 2. Valores de reservas permanente y reguladora de los sistemas acuíferos de la Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê  
 Table 2. Groundwater recharge and total reserve of the Upper Tietê Basin aquifers

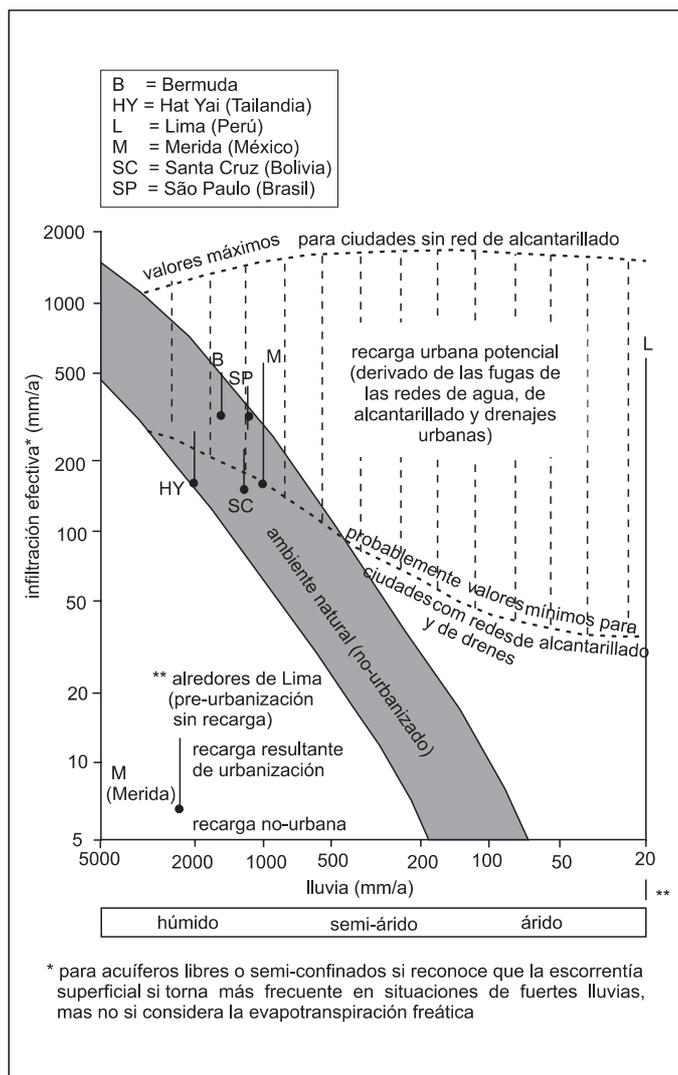


Fig. 3. Aumento de la recarga potencial en acuíferos libres debido a la urbanización. L: Lima, M: Merida, SC: Santa Cruz, HY: Hat Yai, SP: São Paulo (modificado de Foster *et al.*, 1999)

Fig. 3. Potential increase in deep infiltration to unconfined aquifers due to urbanization. L: Lima, M: Merida, SC: Santa Cruz, HY: Hat Yai, SP: São Paulo (modified from Foster *et al.*, 1999)

cada una de las subcuencas. Estos valores de recarga totales (345 mm/a) son compatibles con los obtenidos en estudios realizados en otras localidades de América Latina y Asia (Foster *et al.*, 1999). Según estos autores, la recarga total media proveniente de la urbanización varía entre 300 y 700 mm/a (Fig. 3).

Actualmente, considerando la impermeabilización parcial del terreno y la recarga inducida por las redes de agua y alcantarillado, se estima que la recarga efectiva o reservas reguladoras para las subcuencas de la CAT son de 2.033 Mm<sup>3</sup>/año (64,5 m<sup>3</sup>/s) (tabla 2).

### La explotación de los acuíferos en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê

La inexistencia de datos de campo confiables y actualizados de la explotación de las aguas subterráneas que abarquen toda la cuenca, llevó a la realización de un levantamiento de los pozos perforados por las ocho mayores empresas, de un total de 40 que actúan en la región. Este inventario se limitó a la verificación de la localización aproximada de la obra (identificando el barrio o el municipio, cuando no estaban ubicados en São Paulo), año de construcción, caudal de prueba, nivel estático y uso del agua. Se levantaron datos de 3086 pozos perforados después de 1975. Hasta esta fecha, el Departamento de Aguas y Energía Eléctrica (DAEE) mantenía un inventario de pozos, que totalizaba 3200 pozos; el 90% del total de captaciones existentes (DAEE, 1975).

Debe resaltarse que el procedimiento adoptado para estimar el número de pozos tubulares, sus caudales y distribución en el tiempo y en el espacio, presenta limitaciones que deben ser mencionadas. No fue posible identificar la totalidad de obras y algunas estimaciones muestran que en el período de 1975 al 2000, probablemente hayan sido perforados 6.000 a 7.000 nuevos pozos. A pesar de que el inventario de este estudio haya contabilizado 3.086 obras, que es un número expresivo, las empresas seleccionadas no tenían una actuación homogénea en toda la cuenca; normalmente perforaban más en una o en otra subcuenca o en una época del año, más que en otras. Esto podría modificar la tendencia de los resultados tanto temporalmente como espacialmente. De la misma forma, algunas empresas acabaron dedicándose a atender más una actividad económica que otra, causando incorrecciones en las evaluaciones presentadas.

A pesar de estas posibles imprecisiones, se cree que el volumen de datos obtenidos y su consistencia en varios análisis permiten trazar las grandes tendencias de uso del recurso. La confiabilidad de estos resultados estará asociada al cuidado prestado en la interpretación a la luz de estas limitaciones.

La identificación de las empresas perforadoras se realizó reuniendo informaciones de la Junta Comercial de São Paulo, de las Páginas Amarillas OESP y de los contactos con distribuidores de materiales de construcción para pozos tubulares de São Paulo. Del total de 40 empresas, 55% trabajan exclusivamente con pozos de pequeño diámetro (4 la 8"), profundidades raramente superiores a 60 m y con caudales inferiores a 1 m<sup>3</sup>/h, perforados en sedimentos o en rocas del cristalino intemperizado, conocidos como mini-pozos.

La perforación de mini-pozos se está tornando bastante común en los últimos cinco años, sobretodo para el pequeño usuario privado. El total de pozos existentes en operación debe ascender a algunos miles, con un ritmo de perforación de 200/año, totalizando un caudal no superior a 0,4 m<sup>3</sup>/s (13 Mm<sup>3</sup>/a) en régimen de explotación de 10 h/día.

Es bastante difícil evaluar la proporción de pozos tubulares aún en funcionamiento, ya que su vida útil es variable, siendo función de las características físico-químicas del agua, tasa de explotación, manutención del pozo y tipo de material constructivo. Los pozos del cristalino, debido a los pequeños revestimiento y filtros, poseen mayor longevidad es necesario que los pozos en sedimento, construidos con filtros y tubos de metal, que pueden alcanzar edades de 20-30 años. Actualmente el revestimiento en plástico (geomecánico) ha garantizado mayor durabilidad a las obras. Otros factores para el abandono de pozos son la baja producción, los descensos acentuados del nivel de explotación (nivel dinámico), asociada a la gran extracción y a las fuertes interferencias entre pozos.

Considerando los caudales individuales por pozos, según el tipo de usuario, es posible estimar los volúmenes extraídos de los acuíferos. Hay una fuerte predominancia en perforaciones en la Cuenca Sedimentaria de São Paulo, comparativamente con la explotación en los acuíferos del Sistema Cristalino.

La ponderación de los caudales de los pozos permite estimar que en el año 2000 la explotación de aguas subterráneas ascendía a 249 Mm<sup>3</sup>/a (7,9 m<sup>3</sup>/s) y, si persisten estas tendencias de perforación, en los años de 2004 y 2010 serán de 344 Mm<sup>3</sup>/a (10,9 m<sup>3</sup>/s) y 520 Mm<sup>3</sup>/a (16,5 m<sup>3</sup>/s), respectivamente (Fig. 4, tabla 3).

En las subcuencas Penha-Pinheiros y Cabeceiras se concentran la mayoría de los pozos de la CAT (tabla 3). A partir de las tendencias observadas en los últimos años, se estimó el crecimiento de las perforaciones y caudales por subcuenca. Se nota que las subcuencas de Pinheiros-Pirapora y Penha-Pinheiros presentan las mayores tasas de crecimiento y la sub-

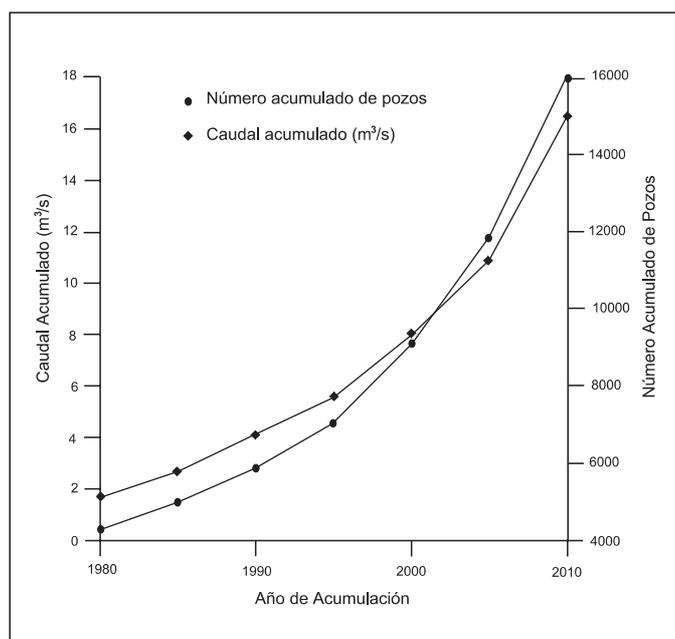


Fig. 4. Estimación de la evolución de las perforaciones de pozos tubulares y de los caudales extraídos en la cuenca hidrográfica del Alto Tietê (curva de caudal ajustada para el año de 2000, considerando que los pozos perforados antes de 1975 no están en operación)

Fig. 4. Evolution of the well drilling and groundwater exploitation in the Upper Tietê Basin (curves adjusted for 2000, considering that wells drilled before are not in operation)

| Subcuenca            | Número acumulado de perforaciones después de 1975 |      |       | Crecimientos del número acumulado de perforaciones entre 2000 y 2010 (%) | Caudal acumulado m <sup>3</sup> /s* (Mm <sup>3</sup> /a) |       |       | Tasa de crecimiento del caudal explotado entre 2000 y 2010 (%) |
|----------------------|---|------|-------|--|--|-------|-------|--|
|                      | 2000  | 2004 | 2010  |  | 2000**   | 2004  | 2010  |  |
| Billings-Tamanduateí | 1030  | 1240 | 1570  | 37   | 1,5  | 1,9   | 2,5   | 67   |
| Cabeceiras           | 1332  | 1740 | 2490  | 89   | 1,9  | 2,5   | 3,4   | 79   |
| Cotia-Guarapiranga   | 580   | 750  | 1180  | 105  | 0,5  | 0,8   | 1,3   | 160  |
| Juqueri-Cantareira   | 520   | 660  | 1050  | 129  | 0,8  | 1,0   | 1,5   | 87   |
| Penha-Pinheiros      | 1932  | 2730 | 4720  | 162  | 2,2  | 3,3   | 5,3   | 141  |
| Pinheiros-Pirapora   | 726   | 1075 | 1975  | 202  | 1,0  | 1,4   | 2,5   | 150  |
| Total                | 6120  | 8195 | 12985 | 112  | 7,9  | 10,9  | 16,5  | 108  |
|                      |   |      |       |  | (249)  | (520) | (344) |  |

\* se considera que los pozos anteriores a 1975 están prácticamente desactivados  
 \*\* cálculo conservador a partir de 6000 pozos en operación en esta fecha

Tabla 3. Número de pozos perforados en la cuenca, caudales extraídos y tendencia de incremento en los próximos años  
 Table 3. Increase in new well perforations, aquifer abstraction rates and trend of increase in the next years

cuenca Billings-Tamanduateí, el menor crecimiento de perforaciones.

El perfil del usuario del recurso hídrico subterráneo también está cambiando. En el quinquenio 86-90 las perforaciones de pozos para industria representaban el 45%. Hoy alcanzan un poco más de 25%, siendo superadas por el uso residencial (35%) y de servicios (30%) (Fig. 5). En número de pozos, las industrias aún representan el 35% de los pozos en la CAT, contra el uso residencial (25%) y de servicios (24%). Esta tendencia es la respuesta a la popularización de pozos entre los condominios residenciales y la mudanza en el perfil económico de la cuenca, de francamente industrial en los años 80, a prestación de servicios en los años posteriores.

Es interesante notar también que debido a la mudanza en este perfil, los volúmenes extraídos para el abastecimiento de condominios y residencias están lentamente substituyendo a las industrias. El mismo motivo ha causado un pequeño desfase entre los volúmenes extraídos de los acuíferos y el número de pozos perforados. Por ejemplo, en los últimos cinco años el número de pozos creció 51% y los caudales, en el mismo período, crecieron apenas 38%. La divergencia entre las tasas de crecimiento puede aumentar con el tiempo (Fig. 4).

### Los problemas asociados con la explotación descontrolada de los acuíferos

No existe aún un inventario sistemático de los problemas de descenso de niveles acuíferos en la CAT. Campos (1988), comparando los niveles de agua de

los pozos perforados en las décadas de 1970 y 1980, concluyó que los abatimientos continuos de los niveles freáticos podrían caracterizar procesos de sobreexplotación. En la zona este de la ciudad de São Paulo se observaron pérdidas de hasta 50% del espesor saturado del acuífero y por consiguiente de sus reservas y disponibilidades hídricas.

A partir de la evolución de los niveles estáticos de los pozos estudiados en diferentes localidades en la CAT, fue posible identificar regiones donde probablemente estén ocurriendo descensos de los niveles potenciométricos (Fig. 6). Puede notarse una correlación entre estas zonas de mayor descenso con aquellas de mayor perforación de pozos. De la misma forma se identificó el nivel de afección de la recarga en la subcuenca por extracción de los pozos (tabla 4).

El escenario definido para la CAT, en relación con la extracción de agua subterránea, hace pensar que la perforación de nuevos pozos y los volúmenes extraídos continuarán aumentando a un ritmo de 480 pozos por año. Persistiendo el no-control del organismo administrador del recurso, habrá un agravamiento de los problemas ya identificados en algunas regiones de la CAT, tales como la reducción de los niveles potenciométricos, la interferencia entre pozos próximos y la disminución del rendimiento individual de las captaciones, asociada a esta interferencia. Estos problemas ya se han reflejado en el costo de obtención del agua subterránea, por el mayor consumo de energía eléctrica, necesidad de profundización de las perforaciones de pozos y cambios de bombas.

Otro aspecto perjudicial de este proceso de explotación sin control es el acabar privilegiando los grupos generalmente más capitalizados y que pueden

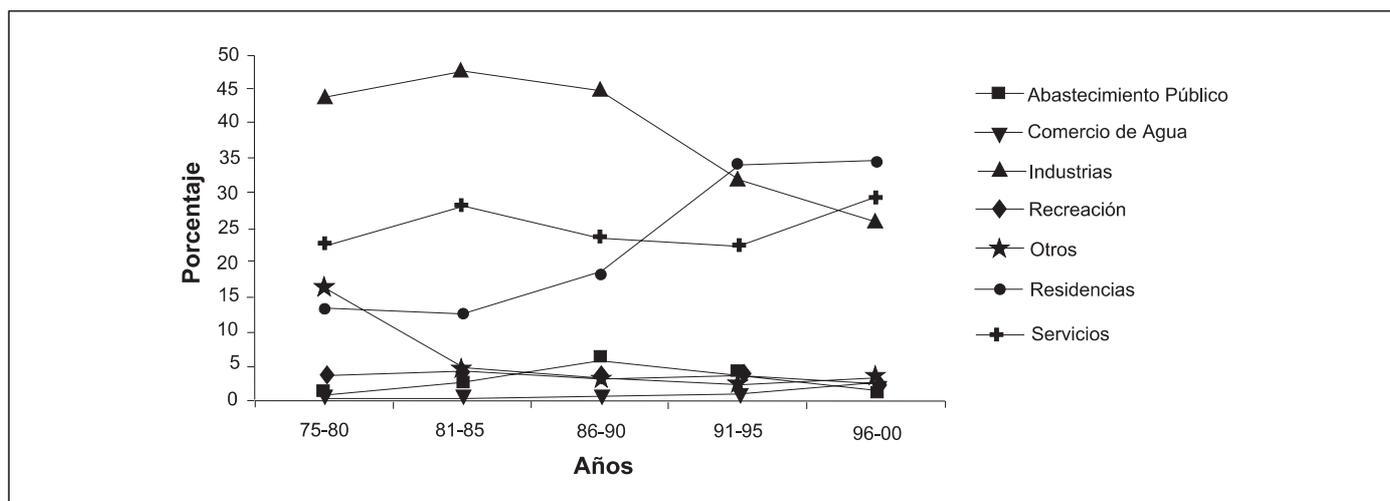


Fig. 5. Distribución porcentual del número de perforaciones por tipo de uso  
 Fig. 5. Distribution of boreholes by type of use

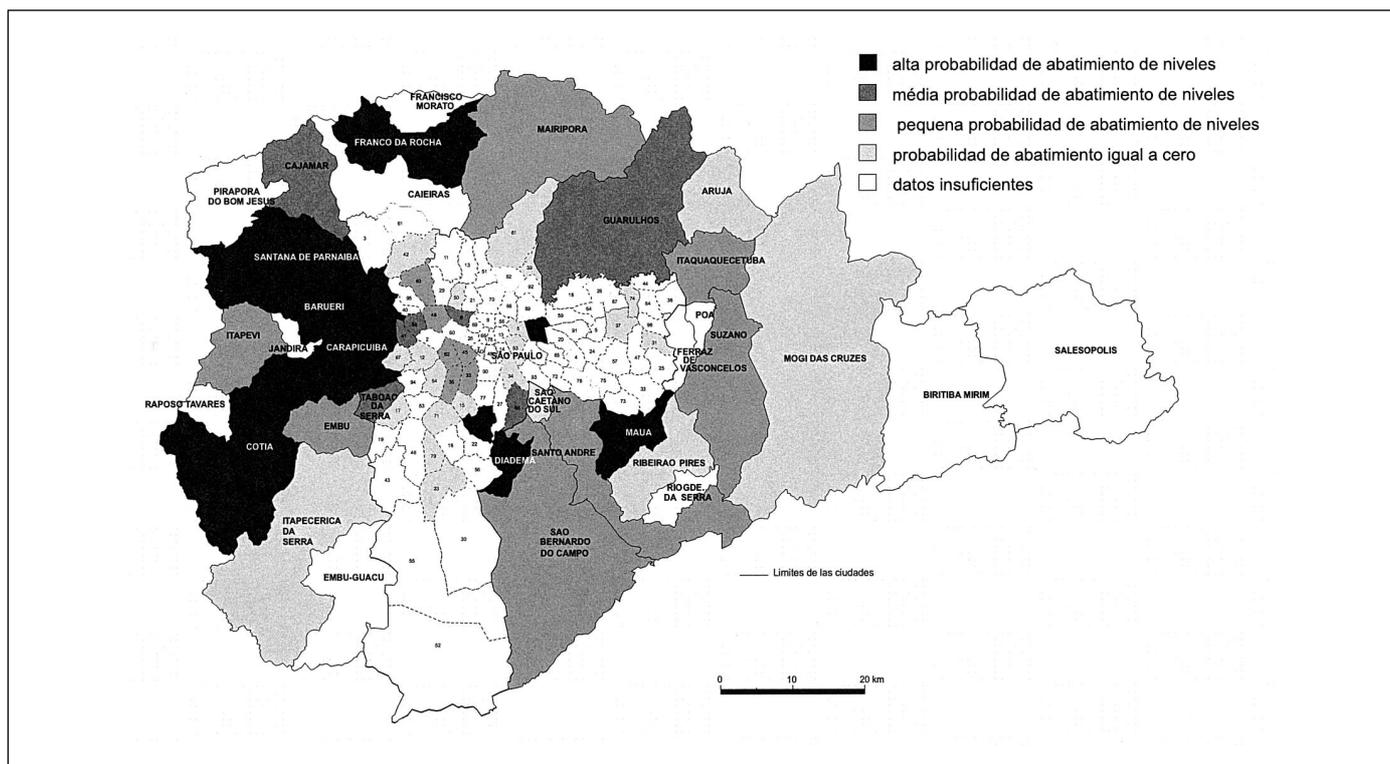


Fig. 6. Regiones donde se esperan mayores descensos en los niveles acuíferos debido a la explotación de los sistemas acuíferos del área de estudio. Tendencia de los últimos cinco años

Fig. 6. Drawdown problems associated to overextraction in the study area. The tendency for the next five years

| Subcuenca              | Recarga total (Mm <sup>3</sup> /a) | Explotación por pozos tubulares (Mm <sup>3</sup> /a) | Proporción de la recarga comprometida (%) |
|------------------------|------------------------------------|--|---|
| Cabeceiras             | 567,22                             | 59,92  | 10,6                                      |
| Cotia-Guarapiranga     | 329,88                             | 15,77  | 4,8                                       |
| Penha-Pinheiros        | 381,46                             | 69,38  | 18,2                                      |
| Jusante Penha-Pirapora | 156,38                             | 31,54  | 20,2                                      |
| Juqueri-Cantareira     | 238,21                             | 25,23  | 10,6                                      |
| Billings-Tamanduateí   | 360,31                             | 47,30  | 13,1                                      |
| Totales                | 2033,46                            | 249,13   | 12,3                                      |

Tabla 4. Proporción comprometida de la recarga de los acuíferos con la extracción, basado en la explotación del año de 2000  
Table 4. Comparison between the recharge and groundwater abstraction in 2000

construir pozos de mayor profundidad, en detrimento de otros que muchas veces son más dependientes del recurso, como hospitales, escuelas, etc. Cabrá a la sociedad, a través de su representación en el Comité de Cuenca, controlar este proceso, en favor de los intereses de la mayoría. A pesar de que esto esté ocurriendo, se debe notar también que debido al pequeño espesor de los sistemas acuíferos de la CAT, reducciones del nivel potenciométrico superiores a 180 metros prácticamente hacen inviable la explotación económica.

En la CAT la casi totalidad de los usuarios de agua subterránea está también conectada a la red pública de agua. De esta forma, la perforación de nuevos pozos está siendo controlada básicamente por el precio del agua distribuida por la concesionaria del recurso. Con las tarifas practicadas actualmente, un pozo de 200 metros de profundidad puede ser amortiguado entre 6 y 12 meses (sin considerar los costos de mantenimiento de la captación), haciendo que esta opción sea bastante atractiva. La sobreexplotación va a provocar el abandono de varios pozos tubulares,

por la imposibilidad de explotación, debido a los niveles muy bajos o por los elevados costos asociados al bombeo. Cuando esto ocurra habrá una reducción paulatina en las extracciones hasta que probablemente se alcance un equilibrio entre la oferta y la demanda, con pequeño favorecimiento a la primera. El servicio público de agua soportará el aumento de la demanda, cuando esta mudanza sea gradual y el área afectada posea excedente de agua en su red pública. De otro modo, podrán generarse serios problemas de abastecimiento.

### Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Geól. Doris Liliana Dotalvaro por la traducción del texto al castellano y a la Prof. Mônica Porto, coordinadora del Plan de Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica del Alto Tietê, por permitir la publicación de los datos.

### Referencias

- Campos, J.E. 1988. Índicios de rebaixamento dos níveis de água subterrânea na Bacia Sedimentar de São Paulo. *5º Congresso Brasileiro de Águas Subterráneas*. São Paulo, 74-83.
- Custodio, E. y Llamas, R. 1981. *Hidrogeología subterránea*. Editora Omega. Barcelona, 2 Vol.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1975. *Estudo de Águas Subterráneas, Região Administrativa 1 – Grande São Paulo*. São Paulo. SOMA. 3 vol.
- Fetter, C.W. 1988. *Applied hydrogeology*. Macmillan Publishing Co., Don Mills (Ontario). 592 pp.
- Foster, S., Morris, B. y Chilton, J. 1999. Groundwater in urban development – a review of linkages and concerns. In: Ellis J.B. (Ed.) *Impacts of urban growth on surface water and groundwater quality*. IAHS Publ. 259:3-12.
- Hirata, R.C.A. y Ferreira, L.M.R. 2001. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade a poluição. *Revista Brasileira de Geociências*. 31(1): 43-50.
- Hirata, R.C.A. y Nunes da Silva, A. 1999. Mapa hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. In: Macedo, A. (coord). *Banco de Dados Espaciais da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê*. LIG-IGc/USP, São Paulo. <http://geolig.igc.usp.br>.
- Iritani, M.A. 1993. *Potencial Hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 108 pp.
- Menegasse-Velásquez, L.N. 1996. *Efeitos da Urbanização Sobre o Sistema Hidrológico: Aspectos da Recarga no Aquífero Freático e no Escoamento Superficial*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 124 pp.
- Rebouças, A.C. 1992. Condições de Uso e Proteção das Águas Subterráneas. In: ABAS, ABGE, SBG/SP. *Simpósio sobre os Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo*. Atas. 77-88.
- Sabesp y Cepas. 1994. *Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo*. Diagnóstico Final. Convênio SABESP/CEPAS-IG/USP. São Paulo. 115 pp.

Recibido: Junio 2002

Aceptado: Septiembre 2002