

# Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani

M. C. Lucas<sup>(1)</sup>, R. C. Guanabara<sup>(2)</sup> e E. Wendland<sup>(3)</sup>

- (1) Doutorando da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS)  
Av. Trabalhador SãoCarlense n° 400, 13566-590, São Carlos (SP)  
muriloclucas@gmail.com
- (2) Mestre pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS)  
Av. Trabalhador SãoCarlense n° 400, 13566-590, São Carlos (SP)  
rafael\_chaves@ymail.com
- (3) Professor Titular da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS)  
Av. Trabalhador SãoCarlense n° 400, 13566-590, São Carlos (SP)  
ew@sc.usp.br

## RESUMO

As maiores taxas de recarga subterrânea do Sistema Aquífero Guarani (SAG) ocorrem nas áreas de afloramento das Formações Botucatu e Pirambóia. Nessas áreas, a entrada de água (como a infiltração das precipitações) é controlada, principalmente, pelas características climáticas e pelas propriedades e uso do solo da região. O principal objetivo deste trabalho foi estimar as taxas anuais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, situada em área de afloramento do SAG, durante o período 2004–2011. A variação do nível freático no aquífero livre foi medida em 11 poços, distribuídos em diferentes culturas agrícolas na bacia do Ribeirão do Onça. Técnicas de tratamento de imagens multiespectrais foram usadas para mapear o uso do solo na bacia. A recarga em cada piezômetro foi estimada por um método de escala local (*Water Table Fluctuation*, WTF). A espacialização da recarga para a bacia foi feita de acordo com as áreas das culturas agrícolas. A recarga para a bacia foi estimada entre 80 mm e 359 mm, correspondente a 7% e 20% da precipitação anual de aproximadamente 1175 mm e de 1808 mm, respectivamente. Foram observadas menores estimativas de recarga nas áreas com cultura de citros e eucaliptos, em relação às áreas com pastagem e cana-de-açúcar. A avaliação contínua da recarga nas áreas de afloramento é essencial para a futura utilização do SAG.

Palavras-chave: águas subterrâneas, recarga, Sistema Aquífero Guarani, uso do solo

## ***Estimating groundwater recharge in the outcrop area of the Guarani Aquifer System***

### ABSTRACT

*The Guarani aquifer system (GAS) is one of the most important groundwater reservoirs in South America. Its main groundwater recharge occurs in the outcrop areas of the Botucatu and Pirambóia formations. In these areas groundwater input, such as the infiltration of precipitation, is controlled mainly by climatic characteristics, soil properties and land use in the area. We provide here an estimation of the annual recharge into the Ribeirão da Onça basin, located in an outcrop area of the GAS, resulting from data collected during monitoring from September 2004 until August 2011. Fluctuations in the water table were measured at 11 piezometers, sited in different crops areas. Processing techniques for multispectral images were used to map land use. Recharge was estimated by a local-scale method (water-table fluctuation, WTF). Recharge estimates for areas with citrus and eucalyptus proved to be lower than for areas under grassland and sugar cane. Annual recharge rates estimated for the entire watershed ranged from 80 mm to 359 mm for annual precipitations of 1,175.5 mm and 1,807.7 mm. The assessment of recharge in outcrop areas is essential for a suitable future exploitation of the GAS.*

*Key words: groundwater, Guarani Aquifer System, land use, recharge*

VERSIÓN ABREVIADA

**Introducción y metodología**

Estudios para estimar la recarga subterrânea son esenciales para determinar volúmenes adecuados de extracción de aguas subterrâneas en el Sistema Acuífero Guaraní (SAG). El SAG es uno de los acuíferos transfronterizos más importantes del mundo, con un área estimada de 1,1 millones de km<sup>2</sup> (Hirata et al., 2011). Se ubica al sureste de Sudamérica y cubre áreas de Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay. Este sistema acuífero llama la atención debido a su extensión y volumen de agua dulce almacenada (Wendland y Rabelo, 2009). La explotación del SAG ha aumentado debido a la creciente demanda de agua para abastecimiento público, actividades agrícolas e industriales (Gómez et al., 2011) y fuentes de agua geotermales (Foster et al., 2009).

El SAG está compuesto de rocas sedimentarias del Mesozoico, la Formación Pirambóia (en la parte basal del acuífero) y la Formación Botucatu (en la parte superficial del acuífero) (Sracek y Hirata, 2002). Este acuífero es esencialmente confinado o semiconfinado, donde apenas el 10% de su área corresponde a afloramientos de las Formaciones Botucatu y Pirambóia. Esas áreas de afloramientos son prioritarias para la gestión del SAG (OEA/GEF, 2009), porque es donde el agua de lluvia alcanza la superficie del suelo, infiltra, atraviesa la zona no saturada del suelo y recarga directamente el acuífero (IPT, 2011).

La cuenca de Ribeirão da Onça (Figura 1) está situada en un área de afloramiento del SAG (Wendland et al., 2007). Algunos estudios han sido realizados en esa cuenca con el objetivo de entender los procesos y cuantificar la recarga subterrânea de la región (Contin Neto, 1987; Wendland et al., 2007; Gomes, 2008). Sin embargo, es necesario refinar continuamente la cuantificación de las tasas de recarga y de los datos colectados en campo. El principal objetivo de este trabajo fue estimar las tasas anuales de recarga en la cuenca hidrográfica de Ribeirão da Onça durante el periodo 2004 al 2011.

La cuenca de Ribeirão da Onça es de uso agrícola, no existiendo áreas consideradas pavimentadas y ninguna área industrial. El uso actual del suelo (Figura 2) está compuesto por pastos, caña de azúcar, naranjas, eucaliptus, áreas de inundación y por cultivos de alta rotación como soya y maní (o cacahuate). La cobertura original de la cuenca fue la formación boscosa conocida como Cerrado.

El monitoreamiento de la variación del nivel freático fue realizado quincenalmente con un medidor de nivel manual, en 11 piezómetros (pozos de monitoreamiento) distribuidos espacialmente dentro y próximos a la cuenca de Ribeirão da Onça (Figura 3). Esos piezómetros fueron escogidos porque están localizados en diferentes tipos de cultivos agrícolas y no se secaron durante el periodo de estudio. Los piezómetros son identificados con los números 05, 08, 09, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 (Tabla 1).

Los datos de precipitaciones diarios fueron colectados en la Estación Climatológica del Centro de Recursos Hídricos y Ecología Aplicada (CRHEA) de la Universidad de São Paulo, ubicada en las coordenadas geográficas 22°10'13,7"S y 47°53'55"W (datum WGS 84). Para obtener los valores de precipitaciones en el CRHEA se utilizó un pluviómetro tipo ville de Paris.

Para estimar la recarga fue utilizado el método Water Table Fluctuation (Healy y Cook, 2002; Scanlon et al., 2002), con la serie de mediciones manuales del nivel freático de los 11 piezómetros. El método Water Table Fluctuation (WTF) está basado en la hipótesis de que la recarga del acuífero libre es completamente atribuida a la elevación de su nivel freático,  $\Delta H$ , (correspondiente a la variación del almacenamiento de agua,  $\Delta S^{gw}$ ). Considerando un intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , la recarga,  $R$ , es expresada como (Healy y Cook, 2002; Scanlon et al., 2002):

$$\Delta S^{gw} = R = S_y \cdot \frac{dH}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

donde  $S_y$  es el rendimiento específico del acuífero. La Ecuación (1) asume que toda el agua que alcanza el nivel freático es inmediatamente almacenada.  $\Delta H$  es definido como la diferencia entre el máximo de la curva de ascensión y el punto más bajo de la curva de recesión precedente, la cual es extrapolada hasta el instante máximo (Scanlon et al., 2002) (Figura 4). La incerteza del resultado final está asociada a la precisión en la determinación de  $S_y$ .

Fueron utilizados los valores medios de  $S_y$  determinados por Gomes (2008), quien realizó campañas de colecta de muestras de suelos indeformadas en diferentes puntos (Figura 5) y a diferentes profundidades de la cuenca. Los valores de rendimiento específico varían entre 8,5% a 15,9% (Tabla 2), según la distribución espacial de los puntos de colecta (PCAs).

Para la aplicación del método WTF se consideró que cada elevación individual del nivel de agua subterrânea representó una porción de recarga directa. El método consistió en la identificación de los periodos continuos de recesión, de acuerdo con los eventos de precipitaciones observados en el periodo y las alteraciones en la inclinación de la curva de recesión. Después de esa identificación, fue realizado un ajuste para cada periodo de recesión, usando una función de tipo ley de potencia:

$$N = a \cdot (X)^b \quad (2)$$

donde  $N$  es el nivel de agua subterrânea,  $a$  y  $b$  son los parámetros calculados a partir del mejor ajuste, y  $X$  es el número de días después del primer día de monitoreamiento del nivel freático en el piezómetro. Para cada curva de recesión de los piezómetros fue realizado un ajuste diferente, usando la función de tipo ley de potencia, obteniendo diferentes valores para los parámetros  $a$  y  $b$  (no constantes). El ajuste se consideró satisfactorio cuando el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) fue mayor que 0,80.

Para estimar la recarga media ponderada se usó como peso de ponderación el área correspondiente a cada tipo de cultivo agrícola donde están localizados los piezómetros. El área de cada cultivo fue calculada usando imágenes temáticas generadas a partir de una clasificación no supervisada (multitemporal) desde imágenes satelitales Landsat de la cuenca (Manzione et al., 2011). Las imágenes temáticas, posteriormente transformadas en mapas de uso y ocupación del suelo, fueron analizadas, y de ser necesario, corregidas con observaciones realizadas en las visitas de campo, quincenalmente desde el año 2004.

La recarga media de cada grupo fue calculada usando la media aritmética de los piezómetros pertenecientes a un mismo grupo. El resultado del producto entre la recarga media de cada grupo y sus respectivas áreas de influencia fue usado como valor de recarga media ponderada para la cuenca.

## Resultados y discusión

El periodo de mayor ocurrencia de lluvias fue observado entre los meses de octubre a marzo (Tabla 3). En los años 2008 y 2010 se presentaron los menores valores de precipitaciones durante el periodo 2004-2011. La precipitación media anual en el periodo de estudio fue 1496 mm.

El análisis de recarga subterrânea en la cuenca Ribeirão da Onça se realizó considerando los años hidrológicos durante el periodo 2004-2011, comenzando al inicio del periodo húmedo en septiembre y terminando en el periodo seco durante agosto del año siguiente (Figura 6). Utilizar el año Juliano puede ocasionar estimaciones incoherentes de recarga subterrânea en la escala temporal para la cual fue aplicado el método WTF.

La figura 7 muestra las precipitaciones y la variación del nivel freático observado en el pozo 19. Los resultados muestran que en el año hidrológico 2005-2006 ocurrieron las menores elevaciones del nivel freático, principalmente en los piezómetros más profundos, como los piezómetros 08 y 19 (Tabla 4). Por otro lado, en el año hidrológico 2010-2011 se observaron los mayores valores de  $\Delta H$ , por tanto, es el año en que se presentaron los mayores valores de recarga.

La Tabla 5 muestra la recarga media y las áreas de influencia durante los años hidrológicos de menor y mayor precipitaciones, 2005-2006 y 2010-2011, respectivamente. Las tasas anuales de recarga durante el periodo de estudio varían entre 7% (80 mm) y 20% (359 mm), respectivamente. La evaluación de recarga por tipo de cultivo agrícola muestra que las menores tasas anuales de recarga ocurren en áreas de eucaliptus. En las áreas con pastos se estimaron las mayores tasas de recarga (Figura 8).

La continua evaluación de recarga mediante el monitoreamiento del nivel freático en las áreas de afloramiento del SAG es esencial para el uso futuro de esa importante fuente de agua subterrânea. Nuevas metodologías para estimar y espacializar la recarga deberán ser utilizadas para comparar y validar los resultados del presente trabajo.

## Introdução

Estudos sobre estimativas de recarga subterrânea são essenciais para a determinação de volumes adequados de extração das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Guarani (SAG). O SAG é um dos aquíferos transfronteiriços mais importantes do mundo, com uma área estimada em 1,1 milhões de km<sup>2</sup> (Hirata et al., 2011). Está localizado ao sul em relação ao centro da América do Sul e abrange áreas do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Esse sistema aquífero chama a atenção por causa de sua extensão e de seu volume de água doce armazenado (Wendland e Rabelo, 2009). A exploração do SAG tem aumentado, em decorrência da crescente demanda por água para abastecimento público, atividades agrícolas e industriais (Gómez et al., 2011) e para estâncias de águas geotermiais (Foster et al., 2009).

O SAG é composto por rochas sedimentares da Era Mesozóica, a Formação Pirambóia (na parte basal do aquífero) e a Formação Botucatu (na parte superficial do aquífero) (Sracek e Hirata, 2002). Esse aquífero é essencialmente confinado ou semi-confinado, sendo apenas 10% de sua área correspondente aos afloramentos das Formações Botucatu e Pirambóia. Essas áreas de afloramento são prioritárias para gestão do SAG (OEA/GEF, 2009), porque é onde a água da chuva atinge a superfície do solo, se infiltra, atravessa a zona não-saturada e recarrega diretamente o aquífero (IPT, 2011).

A bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça está situada em área de afloramento do SAG (Wendland et al., 2007). Alguns estudos têm sido realizados nessa bacia com o objetivo de entender os processos e quantificar a recarga subterrânea na região (Contin Neto, 1987; Wendland et al., 2007; Gomes, 2008). Porém, é necessário o contínuo refinamento da quantificação

das taxas de recarga e dos dados coletados em campo. Estimativas acuradas de recarga são sempre difíceis porque há muitos fatores locais responsáveis pelas suas variações temporais e espaciais (Healy, 2010). Esses fatores incluem: a quantidade e a intensidade da precipitação, a taxa de evapotranspiração, a geologia, a topografia e o uso do solo (Dripps, 2006).

O principal objetivo deste trabalho foi estimar as taxas anuais de recarga na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, durante o período de 2004 a 2011. Para estimar a recarga, foi empregado o método *Water Table Fluctuation* (WTF), o qual é baseado no monitoramento da variação do nível freático em poços (Healy e Cook, 2002). A espacialização da recarga foi feita usando como peso de ponderação as áreas das diferentes culturas agrícolas em que estão inseridos os poços de monitoramento.

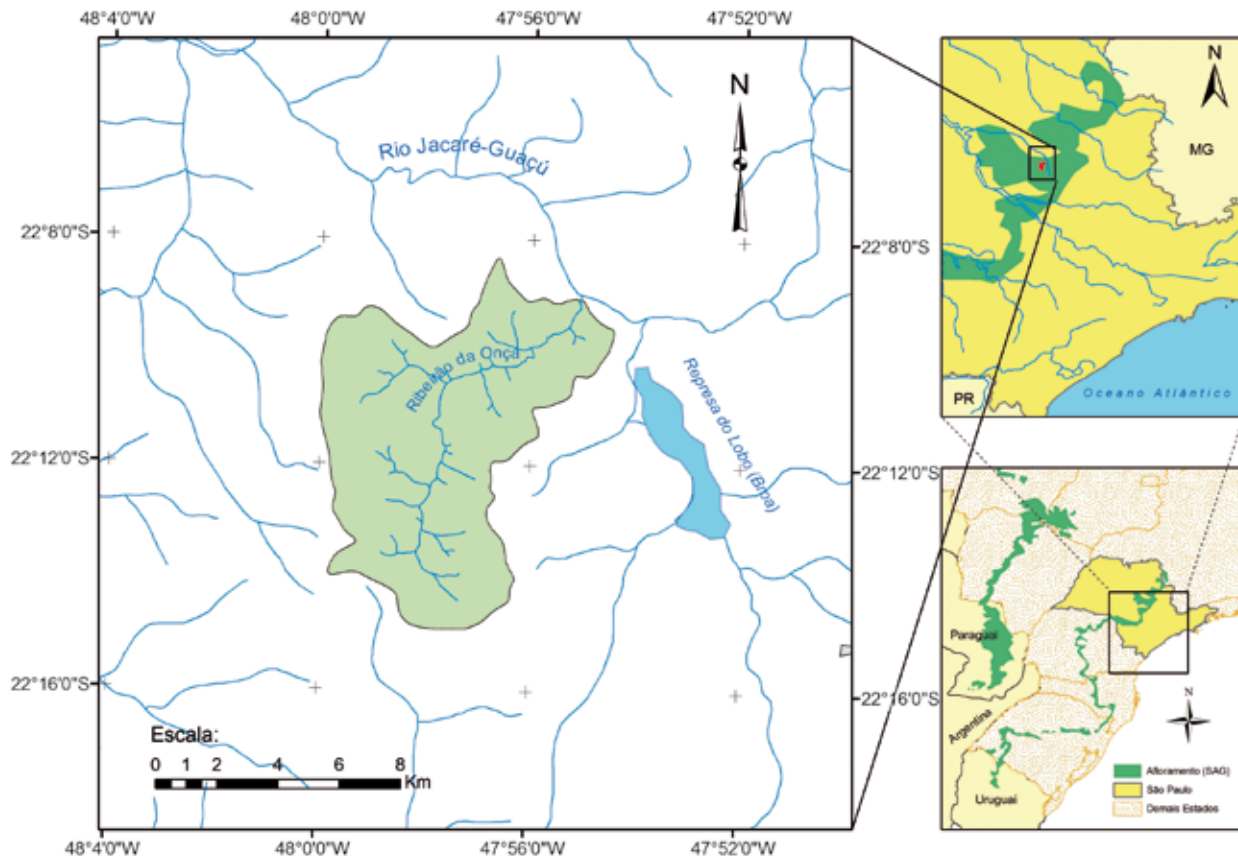
### Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça (com área de 65 km<sup>2</sup>), localizada no município de

Brotas, ao centro-leste do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste (Figura 1). Trata-se de uma bacia predominantemente rural com estradas de acesso em leito natural. O Ribeirão da Onça é um dos formadores do rio Jacaré-Guaçu, afluente do rio Tietê pela margem direita.

A altitude na bacia varia entre 640 e 840 metros, o relevo é predominantemente plano, com declividade média de 7,6 m.km<sup>-1</sup> e a extensão do curso d'água principal é igual a 16 km. A classificação climática de Köppen para a região indica que a bacia possui clima subtropical úmido com chuvas de verão, apresentando variação para clima tropical úmido com inverno seco.

O Ribeirão da Onça desenvolve-se na maior parte de seu percurso sobre o pacote de arenitos Botucatu e sobre o complexo Botucatu-basalto (*sills*) na região do exutório da bacia. Ambas as formações pertencem ao Grupo São Bento da Era Mesozóica. A bacia é coberta por sedimentos não-consolidados do período Quaternário, encontrado em grande parte do interior do Estado de São Paulo. Dessa maneira, pode-se definir a existência de um aquífero superior com uma



**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça.  
**Figure 1.** Location of the Ribeirão da Onça basin.



**Figura 2.** Usos do solo na bacia do Ribeirão da Onça: (a) pastagem; (b) eucaliptos; (c) citros; (d) cana-de-açúcar.  
**Figure 2.** Land use in the Ribeirão da Onça basin: (a) grass; (b) eucalyptus; (c) citrus; (d) sugar cane.

espessura de até duas dezenas de metros, o qual corresponde às reservas renováveis (reguladoras), e outro aquífero mais profundo (inferior), constituído pela Formação Botucatu, representando o SAG propriamente dito (Contin Neto, 1987).

A bacia do Ribeirão da Onça é de uso pecuário, não sendo observadas áreas consideradas pavimentadas e nenhuma área industrial. O uso atual do solo (Figura 2) é composto por pastos, cana-de-açúcar, laranjas, eucaliptos, áreas de várzea e por culturas de alta rotatividade como a soja e o amendoim. A cobertura vegetal original dessa bacia foi o Cerrado.

## Metodologia

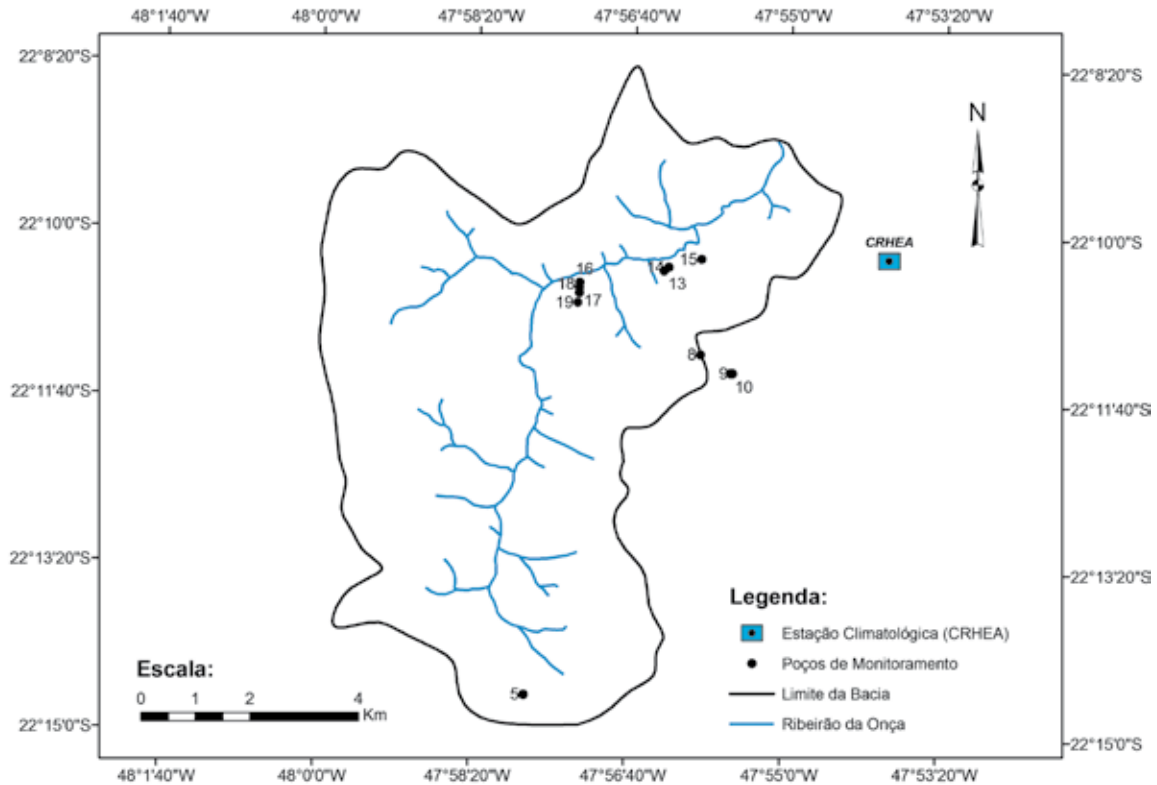
### **Monitoramento do Nível Freático e da Precipitação**

O monitoramento da variação do nível freático foi realizado, quinzenalmente, com um medidor de

nível manual, em onze piezômetros (poços de monitoramento) distribuídos espacialmente dentro e próximos da bacia do Ribeirão da Onça (Figura 3). Esses piezômetros foram escolhidos porque estão localizados em diferentes tipos de culturas agrícolas e não secaram durante o período de estudo. Os piezômetros são identificados com os números: 05, 08, 09, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 (Tabela 1). A precipitação anual indicada na tabela corresponde ao ano hidrológico, que vai de outubro a setembro do ano seguinte.

Os piezômetros 13, 14 e 15 estão em área de citros (laranja e limão), a qual sofre os efeitos da irrigação por sistema de gotejamento. A água usada para irrigação é proveniente do Ribeirão da Onça e não há dados precisos sobre o funcionamento do sistema de bombeamento. Nas áreas onde se encontram os piezômetros 15 e 08 houve alterações no uso do solo durante o período de estudo (Tabela 1).





**Figura 3.** Localização dos poços de monitoramento na bacia e da estação climatológica.  
**Figure 3.** Sites of monitoring piezometers and the weather station in the basin.

Piezômetros	Ano hidrológico	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
	Precipitação (mm)	1491,9	1175,5	1656,9	1353,3	1463,8	1520,9	1807,7
	Prof. Média (m)	Cultura agrícola	Cultura agrícola	Cultura agrícola	Cultura agrícola	Cultura agrícola	Cultura agrícola	Cultura agrícola
05	6,60	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
08	21,58	Citros	Solo Pousio	Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar
09	20,29	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos
10	19,27	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos	Eucaliptos
13	9,76	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros
14	6,59	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros
15	7,80	Cana-de-açúcar	Cana-de-açúcar	Citros	Citros	Citros	Citros	Citros
16	5,02	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
17	10,91	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
18	13,61	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem
19	14,23	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem	Pastagem

Prof. Média = Profundidade do nível freático.

**Tabela 1.** Piezômetros monitorados, tipo de culturas agrícola e precipitação anual.  
**Table 1.** Piezometers monitored, crop types and annual precipitation.

Os dados diários de precipitação foram coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da USP, localizada nas coordenadas geográficas 22°10'13,7"S e 47°53'55"W (*datum* WGS 84). Para obtenção dos valores de precipitação no CRHEA, utilizou-se um pluviômetro tipo *ville de Paris*.

### Recarga Subterrânea

Para estimar a recarga foi empregado o método *Water Table Fluctuation* (Healy e Cook, 2002; Scanlon et al., 2002), com a série de medições manuais de nível freático dos 11 piezômetros. O método *Water Table Fluctuation* (WTF) é baseado na hipótese de que a recarga do aquífero livre é inteiramente atribuída à elevação do seu nível freático,  $\Delta H$ , (correspondente à variação do armazenamento de água,  $\Delta S^{gw}$ ). Considerando-se um intervalo de tempo,  $\Delta t$ , a recarga,  $R$ , é expressa como (Healy e Cook, 2002; Scanlon et al., 2002):

$$\Delta S^{gw} = R = S_y \cdot \frac{dH}{dt} = S_y \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

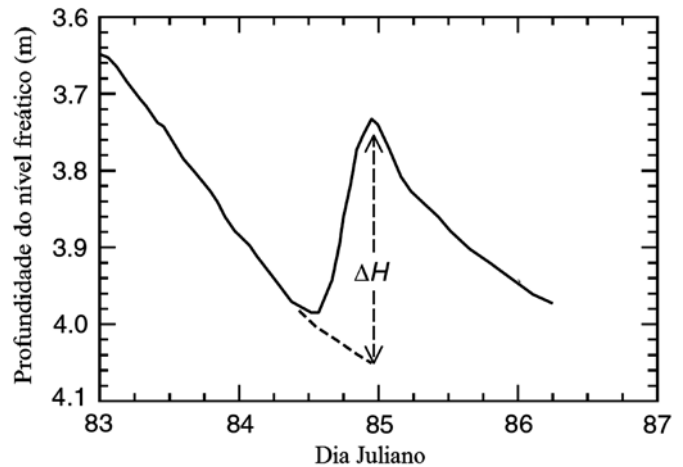
em que,  $S_y$  é o rendimento específico do aquífero. A Equação (1) assume que toda a quantidade de água que atinge o nível freático, imediatamente, entra no armazenamento e todas as outras componentes do balanço hídrico subterrâneo (na zona saturada), aplicado em uma bacia hidrográfica, são nulas durante o período de recarga subterrânea. Essa equação do balanço hídrico pode ser escrita como (Healy, 2010):

$$R = Q^{bf} + ET^{gw} + (Q_{off}^{gw} - Q_{on}^{gw}) + \Delta S^{gw} \quad (2)$$

As componentes de entrada de água estão sob forma de recarga,  $R$ , e de escoamento subterrâneo entre diferentes aquíferos,  $Q_{on}^{gw}$ ; as componentes de saída estão sob a forma de escoamento de base,  $Q^{bf}$ , de escoamento subterrâneo para fora do aquífero,  $Q_{off}^{gw}$  e de evapotranspiração,  $ET^{gw}$ .

No entanto, há um tempo de defasagem entre a chegada da água até o nível freático (durante o evento de recarga) e a sua distribuição para as outras componentes da Equação (2). Dessa maneira, se o método WTF for aplicado durante esse tempo de defasagem, toda a quantidade de água que está entrando sob a forma de recarga poderá ser contabilizada.

A aplicação da Equação (1) para cada elevação individual do nível freático irá fornecer uma estimativa de recarga total. Essa recarga é chamada de total porque não leva em consideração as saídas de água do aquífero durante o intervalo de tempo de aplicação do WTF. Para determinar a recarga,  $\Delta H$  é definido como a



**Figura 4.** Hidrógrafa hipotética de um poço de monitoramento de água subterrânea.  $\Delta H$  é a diferença entre o traçado da extrapolação da curva de recessão antecedente até o instante do pico (linha pontilhada). Fonte: Adaptado de Healy (2010).

**Figure 4.** Hypothetical groundwater hydrograph, in which  $\Delta H$  is the difference between the peak of the rise and the lowest point of the extrapolated antecedent recession curve (dotted line). Adapted from Healy (2010).

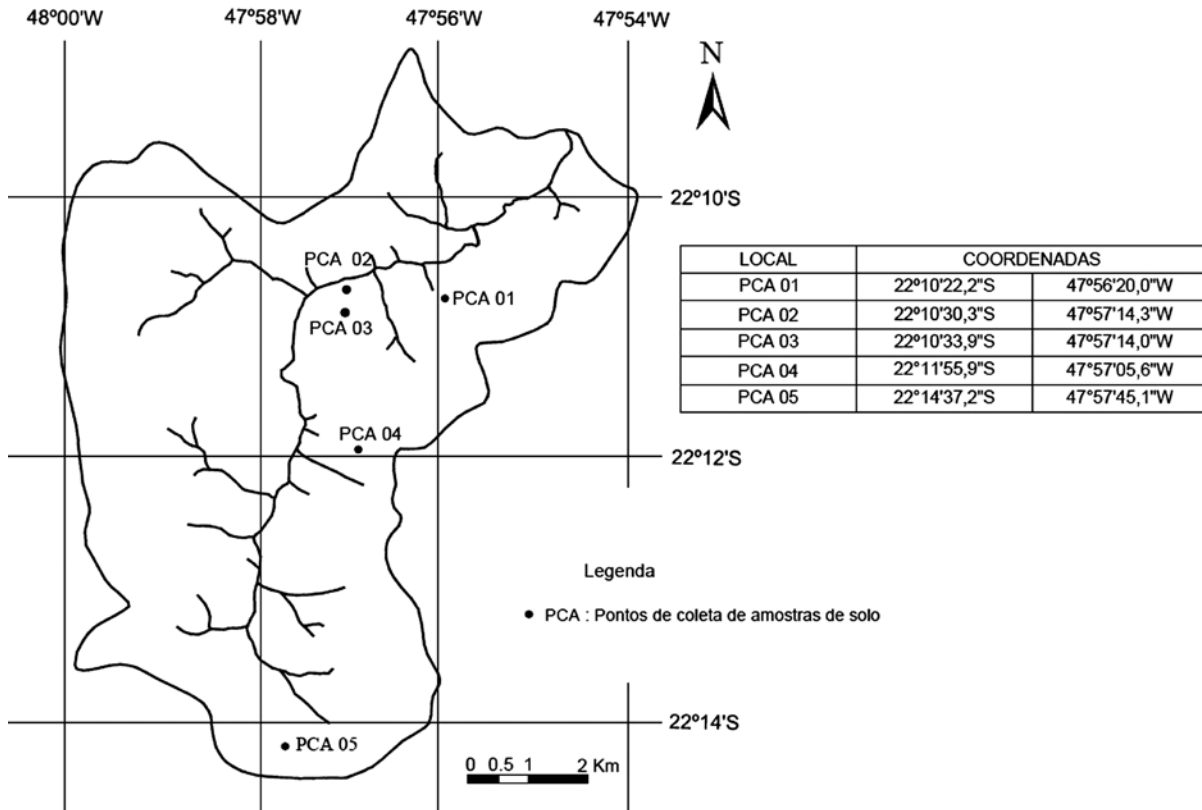
diferença entre o pico da curva de ascensão e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, a qual é extrapolada até o instante do pico (Scanlon et al., 2002) (Figura 4). A incerteza do resultado final está associada à precisão na determinação de  $S_y$ .

Foram utilizados os valores médios de  $S_y$  determinados por Gomes (2008), o qual realizou campanhas de coleta de amostras indeformadas de solo em diferentes pontos (Figura 5) e em diferentes profundidades dessa bacia. O ensaio para determinação do rendimento específico foi baseado no teor de umidade do solo, através do Funil de Haines. O parâmetro  $S_y$  foi considerado igual à porosidade efetiva do solo. Os valores de rendimento específico variam entre 8,5% e 15,9% (Tabela 2), de acordo com a distribuição espacial dos pontos de coleta (PCAs).

Para a aplicação do método WTF, foi considerado que cada elevação individual do nível de água subterrânea (presente na hidrógrafa de cada piezômetro) representou uma parcela da recarga direta. O método consistiu na identificação dos períodos contínuos de recessão do nível freático, de acordo com os eventos de precipitação observados no período e as alterações na inclinação da curva de recessão. Após essa identificação, foi realizado um ajuste para cada período de recessão, usando uma função do tipo lei de potência:

$$N = a \cdot (X)^b \quad (3)$$

em que,  $N$  é o nível de água subterrânea extrapolado,  $a$  e  $b$  são os parâmetros calculados a partir do melhor



**Figura 5.** Pontos de coleta de amostras indeformadas de solo na bacia. Fonte: Gomes (2008).  
**Figure 5.** Sampling points of undisturbed soils in the basin. From Gomes (2008).

Pontos de coleta de amostras de solo (PCAs)									
PCA 01		PCA 02		PCA 03		PCA 04		PCA 05	
Prof. (m)	S <sub>y</sub>	Prof. (m)	S <sub>y</sub>	Prof. (m)	S <sub>y</sub>	Prof. (m)	S <sub>y</sub>	Prof. (m)	S <sub>y</sub>
13,00	8,7%	3,00	15,4%	6,10	12,4%	14,80	9,6%	4,40	16,8%
14,00	7,8%	4,00	15,2%	7,10	12,4%	16,00	10,4%	5,40	15,7%
15,80	9,0%	4,50	14,7%	8,40	8,9%	16,90	11,1%	6,00	15,1%
-	-	-	-	9,30	10,4%	18,10	12,7%	-	-
-	-	-	-	-	-	19,10	9,0%	-	-
Média:	8,5%	Média:	15,1%	Média:	11,3%	Média:	10,6%	Média:	15,9%
Desvio:	0,6%	Desvio:	0,4%	Desvio:	1,7%	Desvio:	1,4%	Desvio:	0,9%

Desvio = desvio-padrão.

**Tabela 2.** Valores de rendimento específico do solo. Fonte: Gomes (2008).  
**Table 2.** Specific-yield values of the soil. From Gomes (2008).

ajuste, X é o número de dias após o primeiro dia de monitoramento do nível freático no piezômetro. Para cada curva de recessão dos piezômetros foi feito um ajuste diferente, usando a função do tipo lei de potência, obtendo-se diferentes valores dos parâmetros *a* e *b* (não constantes). O ajuste foi considerado satisfatório quando o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) foi maior que 0,80.

### Espacialização da Recarga

Após a estimativa da recarga para cada um dos 11 piezômetros, foi realizada a estimativa média ponderada da recarga para a área da bacia do Ribeirão da Onça. Esse procedimento é, na realidade, a transformação de uma informação pontual para um escala espacial (*upsaling*).



Homobono e Wendland (2011) utilizaram um método estatístico para realizar agrupamentos dos piezômetros que possuem o mesmo comportamento, em termos de variação do nível freático. Nesse método foram empregados algoritmos *k-means* em que as medidas de similaridade entre os grupos de piezômetros são definidas pela Distância Euclidiana. Como resultado, foi observado que o coeficiente de evapotranspiração, o qual está diretamente associado ao tipo de cultura agrícola da região, possui grande influência na variação do nível d'água nos piezômetros.

Para estimar a recarga média ponderada foi usada como peso de ponderação, a área correspondente a cada tipo de cultura agrícola onde estão localizados os piezômetros. O valor dessas áreas de cada cultura agrícola foi calculado usando imagens temáticas geradas a partir de uma classificação não-supervisionada (multitemporal) de imagens de satélite Landsat da bacia (Manziona *et al.*, 2011). As imagens temáticas, posteriormente transformadas em mapas de uso e ocupação do solo, foram analisadas e, quando necessário, corrigidas por meio das anotações feitas nas visitas de campo a cada 15 dias, deste o ano de 2004.

A recarga média de cada grupo foi calculada usando a média aritmética dos piezômetros pertencentes a um mesmo grupo de acordo com o tipo de cultura agrícola. O resultado do produto entre a recarga média de cada grupo e as suas respectivas áreas de in-

fluência foi usado como valor de recarga média ponderada para a bacia.

## Resultados e discussões

### Pluviometria

O período de maior ocorrência de chuvas foi observado entre os meses de outubro a março (Tabela 3). Esse é o chamado período úmido ou chuvoso, porque ocorrem mais de 70% das precipitações anuais. O período seco ou de estiagem abrange os meses de abril até setembro, em que há ocorrência de pouca chuva.

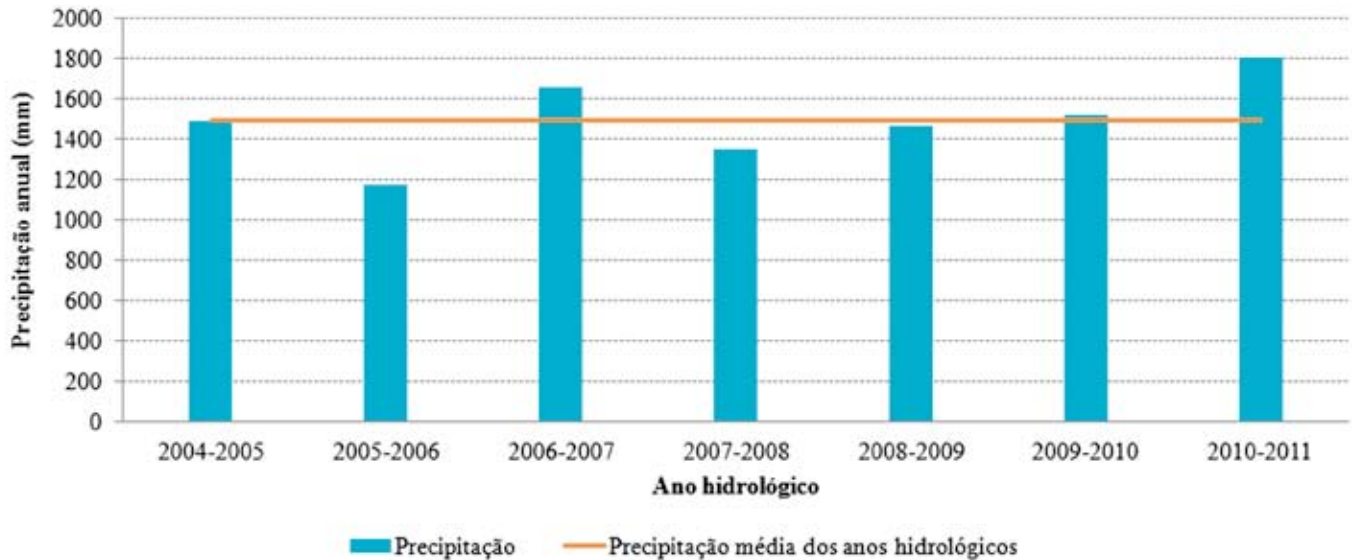
Nos anos de 2008 e 2010 ocorreram os menores valores de precipitação durante o período 2004–2011. A média histórica anual de chuva na região é considerada alta (Tabela 3) e só não é maior que a quantidade de chuvas ocorridas nos anos de 2004, 2009 e 2011. A precipitação média anual, considerando o ano hidrológico, no período de estudo deste trabalho é igual a 1496 mm.

A análise da recarga subterrânea na bacia do Ribeirão da Onça foi realizada considerando os anos hidrológicos desde 2004 até 2011. O ano hidrológico compreende o início do período úmido (em outubro) e o término do período seco (em setembro do ano seguinte) (Figura 6). Há uma diferença entre utilizar as precipitações considerando o ano Juliano (janeiro–

Mês	Precipitação (mm)								
	Média histórica mensal (1972–2011)	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Janeiro	291,6	302,1	542,3	180,7	381,3	270,4	318,2	267,0	543,8
Fevereiro	205,1	263,8	69,0	263,0	244,9	157,0	232,8	145,3	214,9
Março	166,9	74,2	155,2	162,5	93,2	222,4	148,0	172,1	306
Abril	83,7	57,3	13,1	24,4	95,6	98,6	54,0	82,6	163,6
Mai	62,7	134,9	87,9	15,7	62,0	44,1	13,6	24,1	4,8
Junho	40,8	43,6	41,5	18,3	13,7	43,9	28,8	29,4	48,3
Julho	34,3	56,2	4,3	27,3	161,4	0,0	64,7	30,7	0,3
Agosto	34,9	170,8	16,1	15,7	0,0	28,5	122,0	0,0	10,3
Setembro	74,8	37,5	85,0	57,4	0,7	38,5	105,2	54,8	45,9
Outubro	125,3	127,3	84,8	115,1	129,8	100,5	149,2	91,6	150,4
Novembro	164,9	167,7	100,7	127,3	194,2	98,8	229,4	143,4	113,1
Dezembro	242,0	182,5	225,0	361,7	125,9	177,2	336,3	234,8	290,0
<b>Total anual</b>	<b>1526,9</b>	<b>1617,9</b>	<b>1424,9</b>	<b>1369,1</b>	<b>1502,7</b>	<b>1279,9</b>	<b>1802,2</b>	<b>1275,8</b>	<b>1890,6</b>

**Tabela 3.** Totais mensais de precipitação durante o período de estudo (2004–2011).

**Table 3.** Total monthly rainfall during the study period 2004 to 2011.



**Figura 6.** Total de precipitação durante os anos hidrológicos (Outubro–Setembro) no período de estudo (2004–2011).  
**Figure 6.** Total annual precipitation (October to September) during the study period 2004 to 2011.

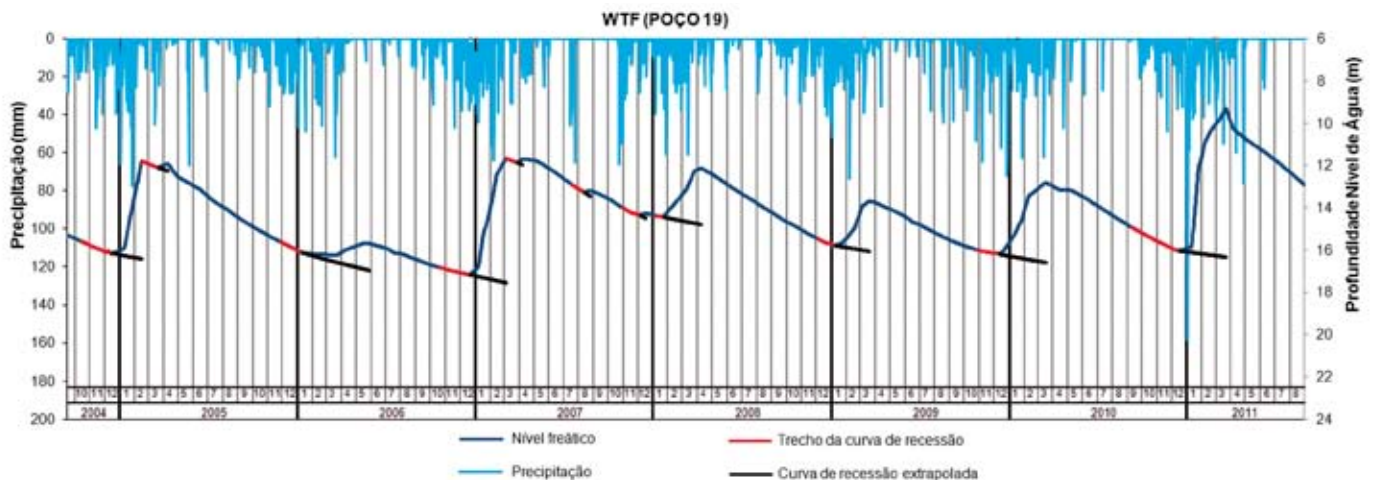
dezembro) e o ano hidrológico. A não utilização do ano hidrológico pode ocasionar estimativas incoerentes de recarga subterrânea para escala temporal em que o método WTF foi aplicado neste trabalho.

### Avaliação da Recarga

A aplicação do método WTF (Equação 1) gerou resultados de recarga para cada um dos 11 piezômetros selecionados. A figura 7 apresenta a precipitação e a variação de nível freático observada no poço 19. A linha contínua azul escura representa a variação do nível freático; a linha vermelha representa os valores de nível freático usados para a extrapolação da cur-

va de recessão; a linha contínua preta corresponde à extrapolação da curva de recessão; a precipitação é representada pelo histograma azul claro na parte superior do gráfico; o eixo vertical da direita representa a profundidade do nível freático, medido a partir da boca do piezômetro; e os meses são indicados com números de 1 (janeiro) a 12 (dezembro).

Os resultados mostraram que no ano hidrológico 2005–2006 ocorreram as menores elevações de nível freático, principalmente nos piezômetros mais profundos, como os piezômetros 08 e 19 (Tabela 4). Por outro lado, no ano hidrológico 2010–2011 foram observados os maiores valores de  $\Delta H$ , conseqüentemente, é o ano em que ocorreram os maiores valores de recarga.



**Figura 7.** Variação de nível e precipitação no piezômetro 19, cultura de pastagem, no período de 10/2004 a 08/2011. As linhas extrapoladas correspondem à aplicação do método WTF.

**Figure 7.** Fluctuations in the water table and precipitation at piezometer 19 (grass crop), from Sept. 2004 to Aug. 2011. The extrapolated line corresponds to the WTF method.

Piezômetros	Ano hidrológico		2005–2006		2010–2011	
	Precipitação (mm)		1175,5		1807,7	
	S <sub>y</sub> (%)	ΔH (mm)	Recarga (mm)	ΔH (mm)	Recarga (mm)	
05	15,9	1122	178	3280	521	
08	8,5	1150	98	6868	584	
09	8,5	0	0	2866	244	
10	10,6	0	0	2244	238	
13	8,5	1288	109	5110	434	
14	8,5	1569	133	4691	399	
15	8,5	699	59	4509	383	
16	15,1	655	99	2975	449	
17	11,3	1371	155	5445	615	
18	11,3	1544	174	6472	731	
19	11,3	1271	144	7046	796	

**Tabela 4.** Estimativa da recarga para cada piezômetro nos anos hidrológicos 2005–2006 e 2010–2011.

**Table 4.** Estimated recharge at each piezometer for the hydrological years 2005–2006 and 2010–2011.

Isso pode ser explicado a partir das taxas de precipitação que nos anos 2005-2006 e 2010-2011 foram iguais a 1175,5 mm e 1807,7 mm, respectivamente.

Conforme a metodologia proposta, a recarga média e as áreas de influência das culturas agrícolas foram calculadas para cada grupo de piezômetros. A tabela 5 mostra a recarga média e as áreas de influência durante os anos hidrológicos de menor e maior precipitação, 2005-2006 e 2010-2011, respectivamente.

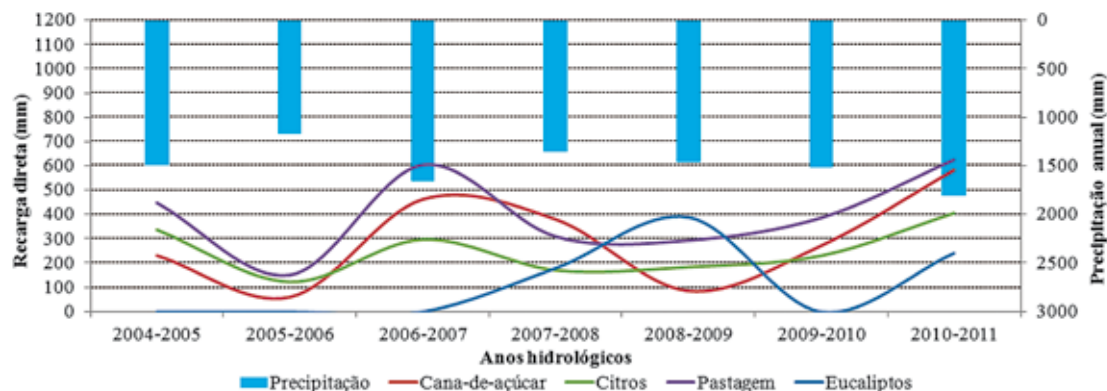
O comportamento do nível freático dos poços 09 e 10 foi determinante para a espacialização dos valores de recarga na bacia do Ribeirão da Onça. Isso ocorreu porque a cultura de eucaliptos é predominante na bacia durante todo o período de estudo. A área média ocupada pelos eucaliptos (2004-2011) corresponde a aproximadamente 32% da área da bacia.

As taxas anuais de recarga durante o período de estudo variam entre 7% (80 mm) e 20% (359 mm) da precipitação do ano mais seco (2005-2006) e do ano mais chuvoso (2010–2011), respectivamente. Contin Neto (1987) em um dos primeiros trabalhos sobre a aplicação do balanço hídrico na bacia do Ribeirão da Onça, encontrou estimativas de recarga entre 9 e 16% da precipitação. Estudos mais recentes de recarga nessa bacia, usando o método WTF, mostraram estimativas de recarga iguais a 29% da precipitação (Wendland *et al.*, 2007) e entre 14 e 38% da precipitação (Gomes, 2008). Apesar de obter resultados de recarga dentro da faixa esperada para o período analisado, as estimativas absolutas deste trabalho usando o WTF são menores em relação às estimativas encontradas por Gomes (2008). Tal fato ocorreu porque Gomes (2008) adotou como critério de agrupamento dos poços a es-

Piezômetros	Cultura agrícola	Área	Recarga
		de influência (km <sup>2</sup> )	média (mm)
<b>Ano hidrológico 2005-2006</b>			
10	Eucaliptos	22,4	0
09			
13	Citros	10,9	121
14			
15	Cana-de-açúcar	4,3	59
16			
17			
18	Pastagem	4,8	150
19			
05			
08	Solo pousio	14,6	98
<b>Ano hidrológico 2010-2011</b>			
10	Eucaliptos	23,4	241
09			
08	Cana-de-açúcar	4,4	584
13			
14	Citros	11,2	405
15			
16			
17			
18	Pastagem	4,6	623
19			
05			

**Tabela 5.** Áreas de influência e recarga média para cada grupo de piezômetros.

**Table 5.** Areas of influence and mean recharge for each group of piezometers.



**Figura 8.** Taxas de recarga na bacia do Ribeirão da Onça, de acordo com o tipo de cultura agrícola.

**Figure 8.** Recharge rates in the Ribeirão da Onça basin according to crop types.

pessura da camada não saturada do solo. A distância média dos piezômetros em relação ao curso d'água principal foi usada para calcular as áreas de influência dos piezômetros na bacia. Além disso, esse autor não utilizou os poços 09 e 10, localizados na cultura de eucaliptos.

A avaliação da recarga por tipo de cultura agrícola mostra que as menores taxas anuais de recarga ocorrem em áreas de eucaliptos. Nas áreas com pastagem foram estimadas as maiores taxas de recarga (Figura 8).

## Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi estimar as taxas anuais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, durante o período de 2004 até 2011.

A recarga para toda a bacia, estimada pelo método WTF e espacializada segundo o tipo de cultura agrícola, apresentou valores entre 80 mm e 359 mm, correspondente a 7% e 20% da precipitação de 1175 mm e de 1808 mm, respectivamente. Áreas onde há culturas de eucaliptos e citros apresentaram as menores taxas de recarga. Estes resultados sugerem que caso as áreas com eucaliptos continuem aumentando na bacia, pode ocorrer uma diminuição considerável na taxa de recarga. A função do tipo lei de potência, usada na extrapolação da curva de recessão do nível freático dos piezômetros, mostrou-se eficiente. A precipitação média anual dos anos hidrológicos para o período de estudo foi igual a 1496 mm e o período chuvoso compreende os meses de outubro a abril e o período seco compreende os meses de maio a setembro.

Os estudos que vêm sendo desenvolvidos na bacia do Ribeirão da Onça têm contribuído para aprimorar a compreensão dos processos de recarga do SAG. A

continua avaliação da recarga por meio do monitoramento do nível freático nas áreas de afloramento do SAG é essencial para a futura utilização desse importante manancial hídrico subterrâneo. São necessários valores de rendimento específico de solo em profundidades mais próximas às regiões de variação do nível freático. Novas metodologias de estimativa e de espacialização da recarga devem ser empregadas para comparação com a faixa de estimativas de recarga encontrada neste trabalho.

## Referências bibliográficas

- Barreto, C. 2005. *Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de monitoramento hidrogeológico*. Dissertação (Mestrado). EESC-USP. São Carlos-SP. 249pp.
- Contin Neto, D. 1987. *Balanço hídrico em Bacia Hidrográfica situada em Região de Recarga do Aquífero Guarani*. Tese (Doutorado). EESC-USP. São Carlos-SP. 130pp.
- Dripps, W.R., Hunt, R.J. e Anderson, M.P. 2006. Estimating Recharge Rates with Analytic Element Models and Parameter Estimation. *Groundwater*, 44 (1), 47-55.
- Foster, S., Hirata, R., Vidal, A., Schmidt, G. e Garduno, H. 2009. *The Guarani Aquifer Initiative e Towards Realistic Groundwater Management in a Transboundary Context*. Case Profile Collection 9. GWMATE and The World Bank, Washington. 28pp.
- Gomes, L.H. 2008. *Determinação da Recarga Profunda na Bacia – Piloto do Ribeirão da Onça em Zona de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de Balanço Hídrico em Zona Saturada*. Dissertação (Mestrado). EESC-USP. São Carlos-SP. 167pp.
- Gómez, A.A., Rodríguez, L.B. e Vives, L.S. 2010. The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. *Hydrogeology Journal*, 18 (7), 1667-1684.
- Healy, R.W. 2010. *Estimating groundwater recharge*. RU: Cambridge University Press. 245pp.

- Healy, R.W. e Cook, P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 91-109.
- Hirata, R., Gesicki, A., Sracek, O, Bertolo, R., Giannini, P. C. e Aravena, R. 2011. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31 (4), 444-456.
- Homobono, T. e Wendland, E. 2011. Influência de características do solo na variação do nível d água em região de recarga do Aquífero Guarani. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16 (1), 55-65.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2011. *Sistema Aquífero Guarani: Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo*. Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, 5. 102 pp.
- OAS/GEF – Organisation of American States/Global Environment Facility. 2009. *Programa Estratégico de Ação do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Aquífero Guarani*. Relatório publicado, Edição bilingue. 424 pp.
- Scanlon, B.R., Healy, RW. e Cook, P.G. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10 (10), 18-39.
- Sracek, O. e Hirata, R. 2002. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 10 (6), 643-655.
- Wendland, E. e Rabelo, J.L. 2009. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the Guarani Aquifer System, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 17 (7), 1733-1748.
- Wendland, E.; Barreto, C. e Gomes, L.H. 2007. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. *Journal of Hydrology*, 342 (3-4), 261-269.

Recibido: diciembre 2011

Revisado: enero 2012

Aceptado: abril 2012

Publicado: julio 2012

