

RECARGA ARTIFICIAL DO LENÇOL FREÁTICO COMO CONTROLE DOS IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA

Antonio Humberto Porto Gomes¹; Janete de Oliveira Trolles² & Elson Antônio do Nascimento³

Resumo - A transformação dos terrenos naturais, em função da sua utilização para agricultura e, principalmente, para dar lugar à construções, aumenta a parcela do escoamento superficial das águas de chuva que antes infiltrava no solo. Essa alteração do ciclo hidrológico, mais preocupante nos centros urbanos, afeta os cursos d'água superficiais e subterrâneos. Nos superficiais, as águas poluídas e o aumento do seu volume, com conseqüente transbordamento dos cursos d'água, são notados pela população e amplamente divulgados pelos meios de comunicação. Por outro lado, os problemas que ocorrem com o escoamento subterrâneo não têm a mesma repercussão. Baseado neste enfoque, este artigo descreve o impacto da urbanização na recarga do solo, mostrando as suas principais conseqüências e as formas de controle. Além disso, é apresentada a aplicabilidade dessas estruturas de recarga, sua concepção, seu dimensionamento, construção e sua manutenção, como forma de atingir o objetivo esperado sem poluir o lençol subterrâneo.

Abstract –The changes occurred in natural lands due to agriculture practices and to the urbanization of the cities cause to increase the superficial flow. This alteration on the hidrological cycle, higher in urban centers, hit the superficial streams and the groundwater. In superficial streams, the water pollution and increase of its volume are identified by the population, who reports it through all ways or media. On the other hand, the problems that occur with groundwater don't have the same perception by the population. Based on this focus, this article describes the urbanization impacts on soil recharge, showing its main consequences and the ways to control it. Besides that, an application of these recharge structures are presented, related to its conception, calculus, construction and maintenance, in order to hit the desired goal without polluting the groundwater.

Palavras-Chave – infiltração; inundação; freático.

¹ Professor de departamento de engenharia civil/uff- rua Passo da Pátria, prédio novo/sala 465, tel 55-21-2629-5442, e-mail- elsonn@vm.uff.br; janete@uff.br

² Departamento de engenharia civil/uff- rua Passo da Pátria, prédio novo/sala 465, tel 55-21-2629-5442, e-mail- janete@uff.br

³ Mestrando do programa de pós-graduação em engenharia civil/uff; Engenheiro da Fundação Rio-Águas; tel. 55-21-3860-0258, e-mail- ahgomes@pcrj.rj.gov.br

INTRODUÇÃO

O aumento da população no Brasil nas últimas décadas e, conseqüentemente a migração da população do campo rumo as cidades, vem ocasionando a transformação de grandes áreas contíguas em áreas impermeabilizadas. Essas dão lugar a construções residenciais e comerciais, indústrias, vias, praças e estradas. Todas essas intervenções, em função das necessidades desses aglomerados de pessoas, muitas vezes são desordenadas e sem nenhum rigor técnico, ou mesmo quando planejadas, não consideram a impermeabilização do solo.

A impermeabilização contribui para diminuir o tempo de concentração do escoamento superficial das águas de chuva no solo, fazendo com que elas cheguem mais rápidas nos cursos d'água, diminuindo a contribuição para o lençol freático e aumentando o volume nos cursos d'água.

A luz dessa problemática, fica evidente a necessidade de controlar e mitigar essa transformação a partir da recarga artificial do lençol subterrâneo. A busca de um crescimento urbano sustentável é possível a partir de medidas compensatórias para mitigar a perda de água, que antes infiltrava no solo.

IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO

Segundo Tucci ; Clarke [1], as alterações sobre o uso e manejo do solo podem ser classificadas pelo tipo de mudança da superfície, o uso da superfície e a forma de alteração da superfície, conforme apresentado pela tabela 1.

Em qualquer tipo de alteração da superfície da bacia haverá modificação do ciclo hidrológico, com impactos sobre o escoamento superficial e subterrâneo.

Em relação a urbanização, que é o tipo de ação do solo objeto do presente estudo, o impacto na bacia ocasionado pela impermeabilização é realizado, principalmente, nos seguintes casos: vias pavimentadas; calçadas; telhados; cemitérios; pátios para estacionamentos e praças. Dessa forma, a água que antes infiltrava no solo ou era interceptada pela vegetação ou depressões, passa a escoar pelas superfícies impermeáveis, aumentando o escoamento superficial, ASCE[2].

Por outro lado, a parcela de água que na pré-urbanização contribuía para o subsolo diminui, trazendo como conseqüência uma menor recarga do lençol freático e acréscimo da concentração de poluentes no solo.

Sendo assim, os efeitos da urbanização podem ser percebidos no aumento de cheias dos cursos d'água e na diminuição da oferta e da qualidade da água disponível nos poços freáticos.

Tabela 1 - Classificação sobre a mudança e o uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none">• desmatamento• reflorestamento• impermeabilização
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none">• urbanização• reflorestamento para exploração sistemática• desmatamento : extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas permanentes
Método de alteração	<ul style="list-style-type: none">• queimada• manual• equipamentos

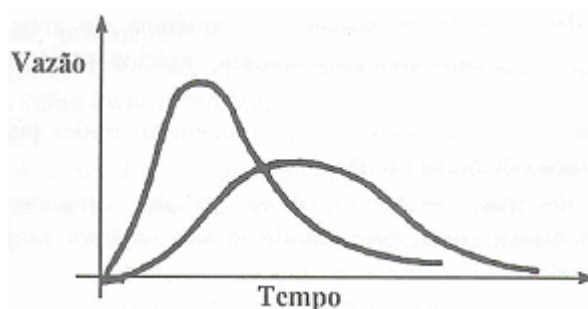
Fonte:Tucci ; Clarke [1]

Zoneamento Urbano

Grande parte dos aglomerados urbanos é realizada sem o menor rigor técnico, a partir de loteamentos irregulares ou mesmo ocupações sem traçado definido, muitas delas em áreas sem nenhuma condição física, ambiental e legal de receber infra-estrutura. A impermeabilização resultante é alta e as condições de saneamento são precárias, além disso, sua correção é difícil e onerosa.

Por outro lado, a cidade formal, onde os loteamentos e as construções recebem aprovação de seus projetos após se enquadrarem aos códigos de obras das respectivas prefeituras, também geram grandes impactos sobre a drenagem superficial e subterrânea. A maioria dos códigos de obras, nas áreas centrais da cidade e nas áreas de expansão urbana, fazem restrições apenas à taxa de ocupação do terreno, que é o percentual de área construída em relação à área total do terreno, não limitando áreas impermeáveis. Além disso, em muitos casos, a taxa de ocupação refere-se apenas aos pavimentos tipo, denominados de “lâminas”, excluindo os subsolos e os primeiros pavimentos, geralmente de uso comum, denominados de “embasamento”.

A ocupação gradativa das áreas urbanas, agravada pela prática de construções dotadas de subsolos com um ou mais pavimentos que edificam todo terreno, aumenta o escoamento superficial, diminui a recarga do solo e modifica completamente o seu escoamento subterrâneo.



Fonte: Tucci e Genns[3]

Figura 1 – Hidrograma hipotético

Como forma de mitigar os impactos da urbanização, garantindo as condições naturais do terreno, é necessário tomar partido de novos conceitos, conhecidos com controle na fonte (“source control”) em oposição às soluções de saída (“end –off- the –pipe”) e tratamento da maior parte do escoamento superficial, Braga[4].

Inseridos no conceito de controle na fonte, temos os reservatórios de detenção /retenção e estruturas para recarga artificial de água no solo.

RECARGA DO LENÇOL FREÁTICO

A recarga artificial do lençol freático é a indução da infiltração no solo a partir de estruturas que otimizam a suas capacidades de armazenamento e de transmitir água.

Segundo Baptista[5] et al., armazenamento e transmissividade são funções de um aquífero. A primeira depende da porosidade e do volume da camada aquífera, enquanto a segunda depende da transmissividade entre as áreas de recarga e descarga.

A água no subsolo ocupa os espaços vazios encontrados nos poros ou vazios das rochas.

Quanto à formação desses vazios, temos que a porosidade das rochas podem ser primária e secundária.

A porosidade é primária quando os poros são formados na época da formação das rochas, enquanto a porosidade secundária acontece após a formação das rochas.

A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total de um solo ou rocha.

$$n=V_v/V_T \quad (1)$$

onde n = porosidade; V_v = volume de vazios e V_T =volume total.

As principais vantagens da recarga artificial são:

- a) Devolver ao aquífero a água impedida de infiltrar no solo pela sua impermeabilização , o que ocasionará queda do escoamento superficial , evitando enchentes. Além disso , o nível dos poços freáticos poderá ser recuperado;
- b) Melhorar a qualidade da água subterrânea, partindo do princípio que a recarga aumenta o nível do lençol subterrâneo e evita o avanço da cunha salina em regiões litorâneas. Além disso, diminui a concentração de elementos indesejáveis, como esgoto sanitário e resíduos de lavagem de pátios e vias pavimentadas.

Os principais problemas que a recarga artificial do solo pode causar são a contaminação do lençol por infiltração de águas contaminadas, colmatação do solo, problemas de ordem geotécnica e comprometimento na qualidade das construções, Trolles [6].

O escoamento superficial das águas de chuva em áreas urbanas carrega o material solto ou solúvel, portanto, cargas poluidoras bastante significativas que podem contaminar o lençol subterrâneo, devendo ser levadas em consideração quando do uso de dispositivos de infiltração, Souza[7];[8].

Os principais métodos artificiais de recarga do solo são: plano de infiltração; bacias de infiltração, pavimentos porosos, poços absorventes e trincheiras de infiltração.

MÉTODO DE RECARGA DO LENÇOL FREÁTICO

Plano de Infiltração

Um Plano de Infiltração pode ser definido como uma camada de suporte porosa (geralmente brita) abaixo do pavimento (revestimento), como pavimentos permeáveis, superfície de material granular, pavimentos tipo pedregulho e superfícies cobertas por vegetação, SILVEIRA et al (2001) apud Silveira [9].

Os planos de infiltração não possuem capacidade de retenção/armazenamento. Para que sejam eficientes devem ter uma capacidade de infiltração igual ou maior que o evento chuvoso, Campana [10].

Segundo Sieker (1984) apud Campana [10], os planos de infiltração devem ser projetados para uma precipitação entre 10 e 15 min.de duração e um tempo de recorrência de 5 anos.

O plano de infiltração não é recomendado quando o lençol do período chuvoso for inferior a 1,20 m e quando a infiltração do solo for baixa (menor que 8mm/h). Para cálculo da vazão de projeto, a partir do Método Racional, poderão ser computadas apenas as áreas impermeáveis, tendo coeficiente de escoamento entre 0,85 e 0,95.

- Pavimentos Permeáveis.

É um tipo de pavimento que se diferencia do convencional pela sua composição, carente de materiais finos. Segundo Campana [10], sua aplicação mais adequada é em ruas de trânsito limitado ou restrito a veículos leves, em passeios e em estacionamentos.

Os principais benefícios do pavimento poroso são: redução do escoamento superficial; flexibilidade de ser usado em áreas já urbanizadas; aumento da segurança no trânsito evitando a

aquaplanagem dos veículos; melhoria da visibilidade com relação aos pavimentos tradicionais, Diniz (1975) apud Campana [10].

Campana [10], identificou trabalhos de Jacobsen et al. (1981), Ichikawa (1984) e Araújo et al.(2002), todos relativos à experimentos.

Os experimentos realizados por Jacobsen foram realizados a partir do uso de pavimento poroso (mistura com 72% de pedras de granito e 28% de areia) em uma área de 682 m², cuja declividade era de 1%. Essa área, usada como estacionamento de carros, após ser monitorada durante 5 meses produziu resultados que apontaram que a porcentagem de escoamento para o pavimento poroso era de 9%.

Ichikawa(1984) apud Campana [10], experimentou uma superfície construída por quatro camadas: uma superficial artificial de turfa, seguida por pavimento permeável, uma terceira de material poroso e, a última, uma base de areia. A partir de 10 módulos com esta cobertura, sendo alguns deles com base permeável e drenos, observou coeficientes de escoamento máximo de 6%. Vale considerar que houve apenas um evento chuvoso, cuja precipitação foi de 35 mm e duração de 40 minutos.

O experimento realizado por Araújo et al.(2002) apud Campana[10], teve a finalidade de avaliar a eficiência de diferentes tipos de pavimentos, como concreto poroso, blocos de concreto, blocos vazados paralelepípedos, dentre outros. A partir de simulador de chuvas em parcelas de 1m², observou-se que as superfícies mais eficientes na redução do escoamento superficial foram blocos vazados e paralelepípedos, cujos respectivos coeficientes de escoamento foram de 0,03 e 0,60. Campana [10], observando esse experimento, ressaltou que não identificou na literatura elementos para justificar esse baixo valor para blocos vazados. Acrescenta, ainda, a possibilidade de os blocos terem funcionado como micro-reservatórios, caso estes não estivessem totalmente preenchidos pelo material usado no seu enchimento.

Os experimentos realizados por Campana [10], aconteceram em três áreas distintas usadas como estacionamento, todas com o objetivo de avaliar a infiltração e o escoamento superficial. A primeira constituída de chão batido coberto por pedriscos, a segunda asfaltada e a terceira formada por blocos vazados.

Os dois primeiros módulos experimentais foram submetidos a cinco eventos chuvosos, em 2001, 2002 e 2003, enquanto a com blocos vazados foram submetidos a apenas três experimentos, ocorridos no ano de 2002 e 2003.

Do experimento, Campana [10] concluiu que as superfícies cobertas por pedriscos e a com blocos vazados são alternativas eficientes para a redução do escoamento superficial. Observou que, relacionando com a superfície em asfalto, o chão batido com pedrisco reduz em até 70% o escoamento, enquanto a superfície em blocos vazados em pelo menos 50%. O mesmo pesquisador

ressalta que foi constatado o fato do coeficiente de escoamento aumentar com eventos de maior precipitação e com o decorrer do tempo, este relacionado com a compactação do solo, já que são áreas submetidas à estacionamentos.

Poços de Infiltração

São escavações no solo com fundo permeável e paredes permeáveis, permitindo a infiltração subterrânea.

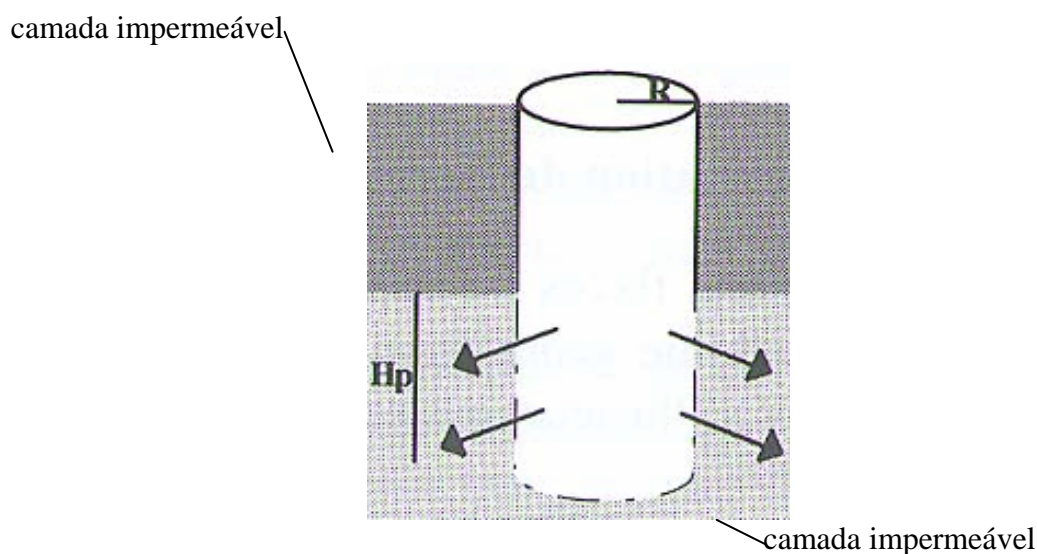
Essas estruturas, também denominadas de fossas de infiltração ou sumidouros, são recomendáveis para áreas consolidadas, quando não se dispõe de espaços que abriguem as medidas dispersivas de recarga do lençol subterrâneo [12].

Segundo Campana [10], os sumidouros são recomendáveis se o subsolo local for de material granular ou areia de espessura considerável, devendo o lençol freático estar pelo menos 3m da superfície do terreno. Além disso, não deverão receber, como contribuição, águas que possam contaminar o lençol subterrâneo.

Os problemas dessas estruturas de infiltração estão relacionados à manutenção, já que podem, ao longo do tempo, perder sua função por colmatagem.

As dimensões dos poços de infiltração serão determinadas em função das taxas de absorção do terreno, a partir de testes de absorção adequados. Como medida de segurança contra colmatagem, não deve ser adotada a área do fundo como área de infiltração.

A figura 2 apresenta um esquema de um poço de infiltração, sendo H a altura da camada permeável.



Fonte : Azzout [11]

Figura 2 - Poço de infiltração

Trincheiras de Infiltração

São valetas preenchidas por material granular, resultando em um reservatório de pedras para onde a água do escoamento pluvial é direcionada, ficando armazenada até a sua infiltração no solo ou sua drenagem para a rede pluvial, Souza [7].

As trincheiras de infiltração são adequadas à pequenas áreas, como lotes individuais, praças e outras áreas de uso comum em condomínios, cuja bacia de contribuição não produza poluentes que contaminem o lençol freático ou reduza a vida útil da camada drenante.

A figura 3 apresenta uma situação típica de uma estrutura de infiltração integrada de forma harmônica ao ambiente.

O uso da trincheira não deverá ser adotado quando: os níveis do lençol freático e da camada impermeável do solo estiverem abaixo de 1,20 m do seu fundo; se o solo estiver na classificação *C* ou *D* do *Soil Conservation Service*; se a taxa de infiltração do solo saturado for inferior a 8 mm/h ou se a superfície de infiltração for um aterro, Urbonas e Stahre (1993) apud Souza [7]. Além dessas situações Hasegawa et al. (1999) apud Souza [7], acrescentam que as trincheiras de infiltração não deverão ser usadas em áreas com risco de deslizamento; em áreas degradadas com alta declividade; em terrenos alagadiços; onde o escoamento carregue poluentes que possam contaminar o lençol freático e em áreas sujeitas a efeitos da maré.

Método de dimensionamento de trincheiras de infiltração através de elementos finitos foi apresentado por Zimmer et al. (1998) apud Souza [7].



Fonte : Azzout [11]

Figura 3 -Trincheira de infiltração

Souza (2002) adotou no seu estudo experimental de trincheiras de infiltração a metodologia recomendada por Jonasson (1994) e Urbonas e Stahre (1993) apud SOUZA [7], denominada

método da curva envelope (“*Rain-Envelope-Method*”). A metodologia é baseada no balanço de massa na trincheira, onde o volume armazenado é determinado pela máxima diferença entre os volumes acumulados de entrada e saída (diferença entre as duas curvas) , sendo o volume acumulado de saída dependente das dimensões da trincheira(processo iterativo).

$$V_T=1,25.[3600.C.(I_T/1000).t.A] \quad (2)$$

Onde: V_T = volume total escoado no tempo t para uma precipitação de T anos de retorno(m³)

C= coeficiente de escoamento

I_T = intensidade da precipitação para T anos de retorno(l/s/ha)

t= duração da precipitação (h)

A= área da bacia de contribuição(ha)

Os volumes de entrada podem ser determinado a partir da curva IDF local, enquanto os volumes de saída podem ser determinados de acordo com as características de infiltração/percolação do solo e da área disponível para infiltração /percolação.

O coeficiente de 1,25 da equação (3) significa um ajuste ao método racional para possibilitar a inclusão de um bloco único de precipitação.

Seguindo os critérios de Urbanas e Stahre (1993) apud Souza [7], são considerados apenas as áreas impermeáveis como contribuintes para a trincheira, tendo coeficiente de escoamento C entre 0,85 e 0,95.

A taxa de percolação da água no solo pode ser estimada pela lei de Darcy, considerando o fluxo como unidimensional, conforme a equação a seguir:

$$U=k.\nabla\phi.l \quad (3)$$

Sendo U = velocidade do fluxo (m/s)

k = condutividade hidráulica saturada (m/s)

$\nabla\phi$ = gradiente hidráulico (m/m)

A lei de Darcy deve ser aplicada ao escoamento subterrâneo em solo saturado, Urbanas e Stahre (1993) apud Souza [7]. Para o dimensionamento da trincheira se assume o solo saturado quando esta estiver em operação [7].

O valor da condutividade hidráulica k deverá ser obtido a partir de análise do solo local. Como forma de apresentar ordem de grandeza, temos que para o cascalho e areia a condutividade varia entre 10^{-3} e 10^{-1} e entre 10^{-5} e 10^{-2} m/s, respectivamente. Segundo recomenda Urbanas e

Stahre (1993) apud Souza [7], a condutividade hidráulica medida no campo deve ser reduzida por um coeficiente de segurança entre 2 e 3, como forma de considerar diminuição desta condutividade acontecida, ao longo do tempo, pela colmatção.

O volume útil da estrutura de infiltração é realizado a partir da porosidade efetiva do material de enchimento, sendo o volume dos vazios da trincheira, sendo ;

$$V_{\text{util}} = (V_T - V_{\text{perc}}) / \text{porosidade} \quad (4)$$

O método de dimensionamento das trincheiras adotado por Souza [7], baseado em Urbonas e Stahre (1993), considera que a saída d'água das trincheiras apenas ocorrerá pelas suas paredes, não considerando a área do fundo.

Urbonas e Stahre (1993) apud Souza [7], consideram o nível d'água constante na altura média da trincheira, o gradiente hidráulico como unitário, apresentando a equação abaixo para a determinação do volume de saída da estrutura.:

$$V_{\text{perc}}(t) = k \cdot \nabla \phi \cdot (A_{\text{perc}} / 2) \cdot 3600 \cdot t_p \quad (5)$$

Sendo: $V_{\text{perc}}(t)$ = volume de água percolado no solo (m³);

k = condutividade hidráulica saturada (m/s);

A_{perc} = área total dos lados da estrutura de percolação (m²);

$\nabla \phi$ = gradiente hidráulico = 1;

t = tempo de percolação (h).

CONCLUSÃO

O lençol freático está vulnerável a impactos decorrentes da modificação do solo na bacia hidrográfica a qual ele está inserido. A impermeabilização do solo, que é grande impactante no meio urbano, tem influência direta na diminuição da água infiltrada no solo, implicando em queda significativa da contribuição para os seus poços freáticos, para suas nascentes, cursos d'água e para o aumento da concentração de poluentes nesse lençol.

O controle urbano é indispensável para limitar as áreas não infiltráveis nos lotes e nas áreas públicas, seja na formulação da legislação urbanística, na sua implementação e na sua fiscalização.

As medidas mitigadoras apresentadas, conhecidas como medidas de controle na fonte, tem como finalidade principal o controle de enchentes. A sua eficiência na diminuição do escoamento superficial e, conseqüentemente a recarga do aquífero subterrâneo, passa pelos seguintes fatores que deverão seguir rigorosamente as técnicas já disponíveis para a medida de controle selecionada:

concepção; projeto; construção e manutenção.

O uso de medidas que privilegiem a ocupação sustentável da bacia hidrográfica, necessitam estar incorporadas nas ações dos planejadores, urbanistas e arquitetos, só desta forma é possível obter resultados satisfatórios dessas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tucci, C. E. M.; Clarke, R.T. – Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento – Revisão. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH. ISSN 1414-381X Porto Alegre: vol. 2, n. 1, jan/jun, 1997. pp. 135-152.
- [2] ASCE. Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems. American Society of Civil Engineer. ISBN 0-87 262-855-8, 1992. 753p.
- [3] Tucci, C. E. M.; Genz in Tucci C.E.M; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. de (organizadores) – Drenagem Urbana ABRH – Editora da Universidade –UFRGS. ISBN 85-7025-364-8, Porto Alegre, 1998. pp. 51-65.
- [4] Braga, B. P. F. – Controle de Cheias Urbanas em Ambiente Tropical in Braga, B. P. F; Tucci, C. E. M.; Tozzi, M. (organizadores). Drenagem Urbana: Gerenciamento; Simulação e Controle. ABRH – Editora da Universidade –UFRGS. . ISBN 85-7025-442-3, Porto Alegre, 1998. pp. 51-65
- [5] Baptista, M. B.; Coelho, M. M. L. P.; Cirilo, J. A. (organizadores). Hidráulica Aplicada – Coleção ABRH – Editora da Universidade –UFRGS. Porto Alegre, 2001, 619 p.
- [6] Trolles, J. de O. Influência da urbanização no processo de recarga do lençol freático. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2003. 105 p.
- [7] Souza, V. C. B. de .Estudo Experimental de Trincheiras de Infiltração no Controle da Geração de Escoamento Superficial. Tese (Doutorado de Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas , Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. 127 p.
- [8] Porto, R. de M. Metodologia de Cálculo para o Planejamento de Bacias de Detenção. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH, ISSN 1414-381X, vol. 8, n. 3 , jul/set 2003, p.p. 135-149.
- [9] Silveira, A. L. L. da . Pré- Dimensionamento Hidrológico de Pavimentos Permeáveis e Trincheiras de Infiltração .In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – 2003 - Curitiba . *Anais...*Porto Alegre: ABRH, 2003.1 CD.

- [10] Campana, N. A; Eid, N. J. Avaliação do Desempenho de Coberturas Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial em áreas Urbanas. In XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – 2003 - Curitiba . *Anais...*Porto Alegre: ABRH, 2003.1 CD.
- [11] Azzout, Y.;Barraud, S. ; Crês, F. N.; Alfakih, E. Techniques Alternatives En Assainissement Pluvial.; Graie. ISBN :2-85206-998-9 , Lyon 1994. 371 p.
- [12] Canholi, A. P. Soluções Estruturais e Não Convencionais em Drenagem Urbana. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica - USP. São Paulo, 1995.