

FITORREMEDIAÇÃO DE AQUÍFEROS CONTAMINADOS POR NITRATO

Mariana Bernardino Luiz; Ricardo Hirata & Rafael Terada & Fernando Saraiva & Norio Tasse

RESUMO

Fitorremediação é uma técnica de recuperação de áreas contaminadas baseada no uso de plantas como agente remediador. Embora essa técnica seja utilizada largamente na recuperação de solos e efluentes, o seu uso para tratar aquíferos contaminados tem sido pouco explorado, pois as raízes das plantas têm limitada capacidade de extrair contaminantes dentro da zona saturada do aquífero. Sabe-se que as plantas absorvem íons em soluções, por isso são capazes de interagir não só com a água, mas também com íons nela dissolvidos. Diante desse potencial, um projeto utilizando-se de árvores adultas de eucalipto está sendo testada com sucesso na remediação de um aquífero contaminado por nutrientes (notadamente nitrato). Uma ampla revisão da bibliografia existente sobre a fisiologia do eucalipto, juntamente com as alternativas de uso de plantas na remediação de diversos contaminantes foi conduzida, o que possibilitou estruturar o referido projeto. O estudo conduzido na área da Estação Experimental de Ciências Florestais em Itatinga (SP) permitiu concluir que as árvores de eucalipto adultas pode aprofundar as suas raízes em mais de 2 m sob o lençol freático e que os processos de absorção são capazes de retirar uma massa considerável de nitrato (> 2 g/L) do aquífero. Estudos a partir da injeção de nitrato com concentrações maiores estão sendo testadas e os resultados reproduzidos em um modelo numérico de detalhe.

ABSTRACT

Phytoremediation is a technique for treatment of contaminated areas based on the use of plants as remediation agent. While this technique is widely used in soil and waste recovery, its use to treat contaminated aquifers have been few explored, because plant roots have limited ability to extract contaminants within the saturated zone of the aquifer.

Mariana Bernardino Luiz: CEPAS|USP Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo, mbernardino@usp.br
Ricardo Hirata: CEPAS|USP Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo, rhirata@usp.br
Rafael Terada: CEPAS|USP Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo, terada.rafael@usp.br
Fernando Saraiva: CEPAS|USP Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Universidade de São Paulo, fasaraiv@usp.br
Norio Tasse: Universidade de Tsukuba (Japão) - Graduate School of Life and Environmental Sciences, nzmtase@mail2.accsnet.ne.jp

Plants absorb ions in solutions, so they are able to interact not only with water, but also with its dissolved ions. Given this potential, a project using adult trees of eucalyptus has been tested, successfully, in the remediation of an aquifer contaminated by nutrients (especially nitrate). A comprehensive review of the existing literature about the physiology of eucalyptus, along with the use of plants in remediation of various contaminants was conducted, allowing structuring this project. The study was conducted in the area of Estação Experimental de Ciências Florestais in Itatinga, the State of São Paulo where eucalyptus roots were found at depths greater than 2 m below the water table and the absorption processes were able to remove a considerable mass of nitrate (> 2 g/L) from the aquifer. Nitrate injection experiments with larger concentrations are being tested and the first results were simulated in a numerical model.

Palavras-chave – Fitorremediação; águas subterrâneas; eucaliptos

1 – INTRODUÇÃO

O amplo uso deste recurso, tanto pelas companhias públicas de águas, que abastecem mais de 80 milhões de pessoas, como pelos usuários privados, com poços particulares, que devem somar outras dezenas de milhões de pessoas, faz das águas subterrâneas um recurso vital e importante para o Brasil.

Várias atividades humanas geram efluentes que injetados no solo modificam as características da água subterrânea, contaminando-a. Esse problema atinge várias localidades, tanto em cidades, como no campo. Entre os vários contaminantes, o nitrato é um dos que tem maior ocorrência em área. Em zonas urbanas, ele é quase onipresente, pelo menos em porções mais superficiais do aquífero (até 30 m) (Hirata et al., 2015). A falta de estudos em áreas rurais não permite avaliar a extensão do problema sob culturas agrícolas, mas baseado em experiências na Europa e na América do Norte, é esperada a contaminação extensiva dos aquíferos livres. Adicionalmente, deve-se salientar que as áreas sem rede pública de esgoto apresentam sérios problemas de contaminação por nutrientes. Isso é particularmente preocupante quando mais de 100 milhões de brasileiros não têm acesso ao serviço de coleta de esgoto (SNIS, 2014). Mas estudos recentes igualmente têm mostrado que mesmo as áreas que contam com rede de esgoto há décadas apresentam problemas com o nitrato (Hirata et al., 2015).

O nitrato é um contaminante de baixa toxicidade, entretanto é uma substância muito insidiosa, devido à sua grande mobilidade e persistência nas águas subterrâneas de aquíferos livres e oxidantes. Devido a sua ocorrência estar associada a atividades como cidades e agricultura, as plumas de nitrato têm grande extensão em áreas, embora as concentrações não sejam muito elevadas (geralmente < 80mg/L sob cidades). Esta característica faz com que o tratamento do aquífero seja bastante complexo, pois envolve uma grande área e um volume de água muito elevado. Métodos de tratamento de aquíferos que se baseiam no bombeamento e tratamento são muito custosos, embora eficientes. Assim, alternativas de baixo custo devem ser buscadas e desenvolvidas.

A fitorremediação é uma técnica que utiliza as capacidades de absorção de plantas para a retirada de contaminantes do solo e das águas subterrâneas. No caso de contaminantes como o nitrato e outros nutrientes, a planta o utiliza para o seu próprio desenvolvimento, mas a técnica pode ser utilizada também para outros grupos de contaminantes, como metais. Neste caso, o contaminante pode ser assimilado à estrutura da planta e ali concentrado, que depois é removido do local. A grande vantagem desta técnica reside no seu baixo custo de implantação e manutenção, que a torna uma solução com muita potencialidade para contaminantes que se estendem por grandes áreas ou onde haja limitados recursos financeiros.

Este trabalho descreve os resultados de uma ampla busca bibliográfica que permitiu escolher o eucalipto como uma das plantas de maior potencial para a fitorremediação de aquíferos rasos contaminados por nitrato, bem como definir um experimento que testasse a sua eficiência.

2 – REVISÃO DOS DETALHES TÉCNICOS REFERENTES À IMPLANTAÇÃO DE REMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADA

2.1 – Fitorremediação

Fitorremediação é a técnica de tratamento que utiliza plantas para descontaminar ambientes como o solo, águas superficiais e subterrâneas, resultando na diminuição da concentração de poluentes e do risco a eles associados (EPA, 2001). As plantas podem remover muitos contaminantes dissolvidos em solução para utilizá-los em seus processos fisiológicos ou acumulá-los em seus órgãos.

A planta ideal a ser utilizada deve: 1) ser típica da área de estudo ou desenvolver-se no solo e clima local; 2) atuar na profundidade contaminada; 3) ser resistente ao contaminante, de maneira que possa se desenvolver mesmo na sua presença; 4) ser de fácil descarte, caso torne-se resíduo (EPA, 2000).

As vantagens do uso da fitorremediação são o pequeno impacto causado ao meio e o baixo custo de implantação e manutenção. Quando as plantas são adaptadas às condições naturais da região, os gastos com equipamento e mão de obra diminuem, tornando a técnica ainda mais viável. Entretanto, são limitações importantes da técnica: 1) dependência do desenvolvimento da planta e de sua fisiologia, muitas vezes não permitindo uma rápida resposta; 2) limitação em sua área de atuação sobretudo em aquíferos contaminados, pois as raízes de muitas plantas não se desenvolvem na zona saturada, limitando-se ao solo; e 3) requerimento de grande tempo de planejamento e maturação do projeto.

A integração das plantas com ambientes impactado foram estudadas anteriormente. Zhaug (1999) realizou um experimento em laboratório para tratar MTBE (éter metil terbutílico) na água subterrânea utilizando a alfafa associada a bactérias *Rhodococcus* e *Arthobacter* para degradá-lo. Hong (2001) utilizou a *populus* para reduzir o mesmo contaminante em um site na cidade Houston. Em ambos os casos obteve-se êxito, pois o balanço de massa apontou a degradação do MTBE. McMullin (1993) utilizou cenouras para absorver diclorodifenil- tricloro-etano do solo. O contaminante ficou acumulado nas cenouras que seguiram como resíduos para incineração. Magalhães (2008) usou *E. urophylla* para tratar um resíduo industrial contaminado por zinco, obtendo diminuição das concentrações, porém o zinco ficou acumulado na planta. Mackova et al., (2007) utilizou a enzima *bifenil operon* presentes em rabanete e mirtilos para metabolizar subprodutos de PCBs (chlorobenzoates, CBAs). Ambas metabolizaram em duas semanas mais de 90% de 2- clorobenzoato. Barac et al. (2009) observaram que a presença de BTX no meio propiciou o crescimento dos microorganismos presentes nas raízes das *Poplars trees*, contudo esses microorganismos são capazes de consumir o contaminante do meio.

Lintern (2012) comprovou que eucaliptos removeram partículas de ouro a 30 m de profundidade. O método Synchrotow de leitura por imagens evidenciou ouro nas folhas de uma planta localizada sobre um depósito desse minério. O ouro foi absorvido pelas raízes do eucalipto que ultrapassaram diferentes litologias. Buosi e Felfili (2004) observaram que as raízes das espécies *E. Grandis* e *E. Citriodora* absorveram os organoclorados presentes no solo, aumentando a quantidade de nutrientes e matéria orgânica. Nalon (2008) utilizou as espécies *E. Grandis* e *E. Saligna* na recuperação de uma área contaminada por chumbo. Embora o chumbo tenha ficado acumulado nas raízes das plantas em grande quantidade, o solo foi descontaminado com eficiência.

2.2 - Definição da planta

O eucalipto foi definido como planta ideal para a implantação da fitorremediação em território brasileiro, pois atende a todas as excelências necessárias:

Ser planta típica da área de estudo ou desenvolver-se no solo e clima local: A cultura do eucalipto no Brasil representa 71 % do total plantado para consumo de madeira. Está distribuída por todo o território nacional com área plantada maior que 5 milhões de hectares, seus maiores produtores são os Estados de Minas Gerais e São Paulo (ABRAF, 2013). O eucalipto é espécie nativa da Austrália, cultivada com êxito em países da África como o Moçambique e nas Américas, há cultivos em uma grande extensão desde o sul, como no Chile até países mais ao norte, como o México e os Estados Unidos; na Europa há culturas na Escócia e Itália (Andrade, 1961). A sua capacidade de abrir e fechar os estômatos em ambientes de déficit ou excedente hídrico o torna apto a desenvolver-se em vários ambientes, pois tem grande eficiência não só na absorção da água (Grieve, 1956, Shea et. al., 1975, Nacob, 1956), mas também do soluto disponível (Haven, 2007). Por crescer rapidamente os eucaliptos demandam grandes quantidades de água. Uma planta adulta consome entre 800 e 1200 mm por metro quadrado, superando o consumo de muitas outras espécies (ABPC, 2015). Já esse rápido crescimento permite que os projetos de remediação sejam mais facilmente instalados, comparativamente a outras árvores.

Atuar na profundidade contaminada: A necessidade fisiológica por água em climas secos, aprimorou as raízes de eucaliptos a buscá-la além da zona superficial do solo. Ou seja, as raízes dos eucaliptos desenvolvem-se radialmente na presença de água na zona superficial do solo, e na sua ausência, em profundidade na zona não saturada. O sistema radicular de espécies adaptadas a diversos climas cresce ocupando grandes volumes de solo, preferencialmente profundos e permeáveis (Navarro, 1961). Lintern (2012) comprovou que as raízes de eucaliptos são atuantes em mais de 30 m de profundidade. Christina (2011) avaliou a taxa de crescimento vertical das raízes de eucalipto. As raízes exploraram um volume considerável do solo no período monitorado (72 meses). A grande quantidade de raízes concentrou-se nas camadas superiores do solo (0 – 6 m), porém as raízes finas, as quais absorvem água e nutrientes, alcançaram profundidades superiores a 10 m. Quando há estresse hídrico, entretanto, as raízes das plantas podem alcançar muitas dezenas de m; sendo que há registros de raízes em solos desérticos na Austrália com mais de 60 m de profundidade (Stone e Kalizs, 1991).

Ser resistente ao contaminante, desenvolvendo-se mesmo na sua presença: Como o composto nitrogênio é comumente encontrado na água subterrânea, sua relação com o eucalipto foi avaliada. A principal fonte de entrada de nitrogênio no eucalipto é a sua fixação pelas raízes. Importante nutriente, o nitrogênio é utilizado nos seus processos fisiológicos, sendo essencial para a produção de proteínas e aminoácidos (Poore, 1985), e como os demais elementos essenciais para a vida das plantas, é absorvido da solução do solo sem muita discriminação, e quanto maior a disponibilidade maior o consumo, tendendo a ficar constante quando consumir suprimentos suficientes para os seus processos fisiológicos (Malavolta, 1989).

Porém, o nitrogênio em forma de amônio pode causar toxicidade ao solo e também à planta, sendo então o nitrato absorvido preferencialmente (Camargo, 2004, Britto, 2002).

Ser de fácil descarte, caso torne-se resíduo: O nitrogênio não é acumulado na planta, uma vez que é absorvido apenas o necessário à sua fisiologia. Este controle da planta, evita que a planta seja classificada como resíduo porque apresenta concentrações não tóxicas acumuladas em seus órgãos.

O eucalipto foi escolhido como agente fitorremediador porque mostrou-se capaz de absorver água e nutrientes de aquíferos livres devido as suas características genéticas adaptadas tanto a ambientes quentes e úmidos, como em ambientes frios e áridos, conforme as características supracitadas, e especialmente por ter grande crescimento e ser um grande absorvedor de água do solo em profundidade, inclusive de porções superiores da zona saturada.

2.3 - Definição do local para o experimento

Procurou-se por áreas ocupadas por eucaliptos sobre um aquífero livre e raso. Entre muitas áreas visitadas de 2012 a 2013, a escolhida foi o lote 48 no interior da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – SP (Figura 1) da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz Universidade de São Paulo. Ocupada predominantemente por eucaliptos e pinus, a porção leste é destinada a pesquisas acadêmicas, enquanto a porção oeste é ocupada unicamente por eucaliptos destinados à comercialização.

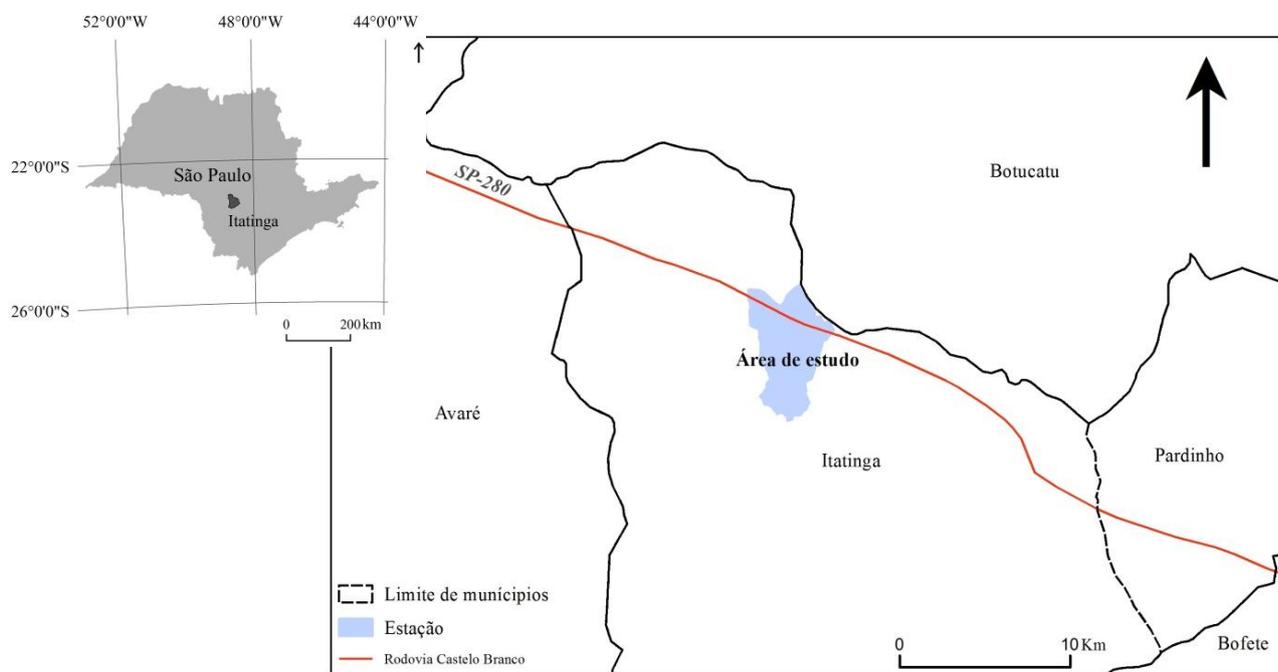


Figura 1. Localização da área de estudos

Eucaliptos da espécie híbrida foram plantados no lote 48 há aproximadamente 10 anos pelos funcionários da estação. Para melhorar seu crescimento, no primeiro semestre após o plantio foram adicionados ao solo fertilizantes ricos em nitrato, potássio e fósforo. A espécie *E. híbrido* é resultado do cruzamento de outras espécies, mas suas características de tronco e folhas indicam que as árvores do interior do lote 48 são híbridos *E. Grandis* com outras espécies, pois tem grande aceitação comercial (Carvalho, 2000). Atualmente as árvores estão com aproximadamente 20 m de altura, distribuídas em fileiras espaçadas por 5 x 5 m, por 5 m de rua (Figura 2).



Figura 2. Distribuição dos eucaliptos no lote 48

Os terrenos que afloram na estação são caracterizados por duas unidades geológicas do Mesozoico, a Formação Marília do Grupo Bauru e a Formação Serra Geral do Grupo São Bento (Figura 3).

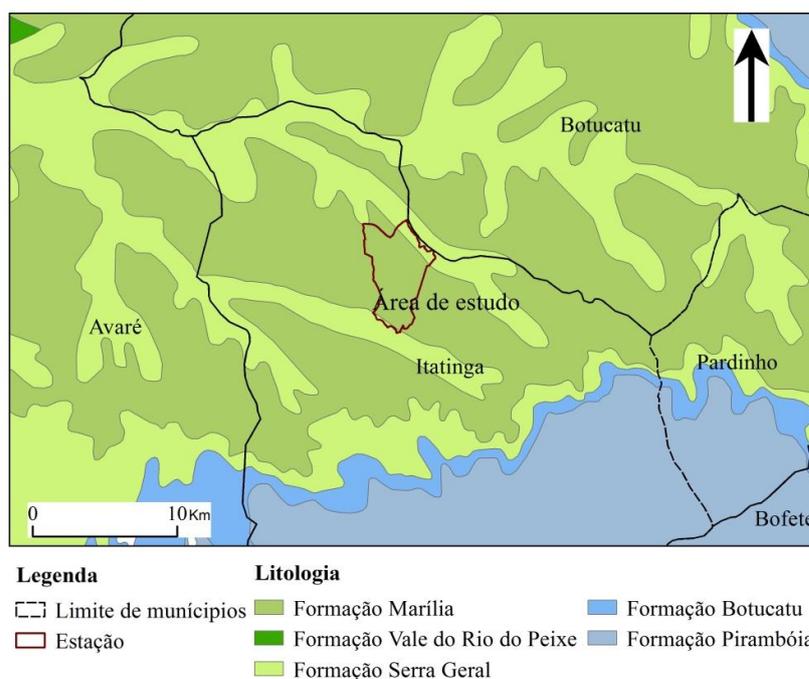


Figura 3. Distribuição das unidades litoestratigráficas que afloram na região da área de estudo (modificado de CPRM, 2006)

Os basaltos da Formação Serra Geral ocupam uma estreita faixa ao sul e a noroeste da estação e compreendem um conjunto de derrames de basaltos, ocorridos entre o Jurássico e o Cretáceo (IPT, 1981). Já a Formação Marília ocorre em cerca de 90 % da área da EECF. É composta por arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações subordinadas de siltitos, argilitos e arenitos muito finos com estratificações plana e paralela (IPT, 1981).

Itatinga é abastecida por água subterrânea através de um poço com capacidade total de 50 L/s (SABESP, 2016). Dois são os aquíferos que abrangem o município, o Sistema Aquífero Guarani na porção sul e o Sistema Aquífero Bauru, na porção norte onde localiza-se a estação.

O Sistema Aquífero Bauru é constituído pelos sedimentos da Bacia Bauru. A base do aquífero está disposta sobre os basaltos da Formação Serra Geral, e suas cotas topográficas chegam a variar de 100 a 600 m acima do nível do mar (DAEE, 2005). A espessura saturada média do aquífero é de aproximadamente 75 m, suas águas ocorrem de forma livre, podendo localmente, apresentar-se de forma semi-confinada a confinada. O sentido regional do escoamento das águas subterrânea dá-se no sentido leste-oeste, em direção aos rios Paraná e Paranapanema. As propriedades hidráulicas do aquífero são: capacidade específica (Q/s) apresenta valores na faixa de 0,002 m³/h/m a 4,9 m³/h/m, com predominância de valores inferiores a 0,5 m³/h/m; condutividade hidráulica (K) varia de 0,002 m/d a 3,66 m/d e transmissividade (T) predominantes inferiores a 50 m²/dia; e o coeficiente de armazenamento (S), representado pela porosidade efetiva é 5 % (DAEE, 2005).

As águas do Aquífero Bauru possuem baixa concentrações salinas, com condutividades elétricas variando de 50 a 628 mS/cm, pH na faixa de 5 a 9,4 unidades de pH; ocorrem dois tipos hidroquímicos de águas, as bicarbonatadas cálcicas e cálcio-magnésiana, que predominam, e as bicarbonatadas sódicas (CETESB, 2012).

3 – MÉTODOS

3.1 - Instalação de equipamentos para interromper o processo de infiltração

Para limitar a umidade do solo e reduzir a infiltração direta e o escoamento de água através dos troncos e do próprio escoamento superficial, causando estresse hídrico nas plantas e obrigando que a planta busque água em maiores profundidades, foram instaladas as seguintes estruturas na área:

a) Cobertura do piso com plástico impermeável em uma área de 400 m² de piso no interior do lote 48 (Figura 4).



Figura 4. Impermeabilização da superfície e cones invertidos nos troncos dos eucaliptos

- b) Instalação de cones invertidos nos troncos das árvores: para reduzir o escoamento de água para o solo advindo da interceptação das árvores.
- c) Escavação de valas a montante do plástico: valas foram escavadas nas porções altas do terreno ao redor da área coberta, para impedir que o escoamento superficial entrasse na área coberta do solo.

3.2 - Instalação de equipamentos e monitoramento das águas subterrâneas

- a) Perfuração de sondagens e instalação de poços de monitoramento: O total de poços instalados foi 27, sendo três na área de superfície descoberta (Figura 3a) e 24 poços concentrados na área de superfície coberta, com espaçamento de aproximadamente 1 m entre eles abrangendo todo o redor do poço de injeção. Os poços tem profundidade entre 9,70 e 12,70 m e 1 m de extensão de filtros. A construção dos poços seguiu o recomendado na norma técnica NBR 15.495-1 e NBR 15.495-2.
- b) Ensaio de permeabilidade: Para obter valores de condutividade hidráulica do aquífero foram realizados ensaios de permeabilidade do tipo *Slug Test* nos poços de monitoramento, interpretados pela técnica de Hvorslev (1954) com o software *Aquifer Test* (Waterloo Hydrogeologic, 2014).
- c) Medidas de nível estabilizado da água subterrânea: As medidas de nível de água estão sendo efetuadas em todos os poços existentes no local, utilizando um medidor elétrico de água. Ademais um trabalho de topografia dos poços permitiu ter os valores absolutos dos poços e a cota dos níveis de água.

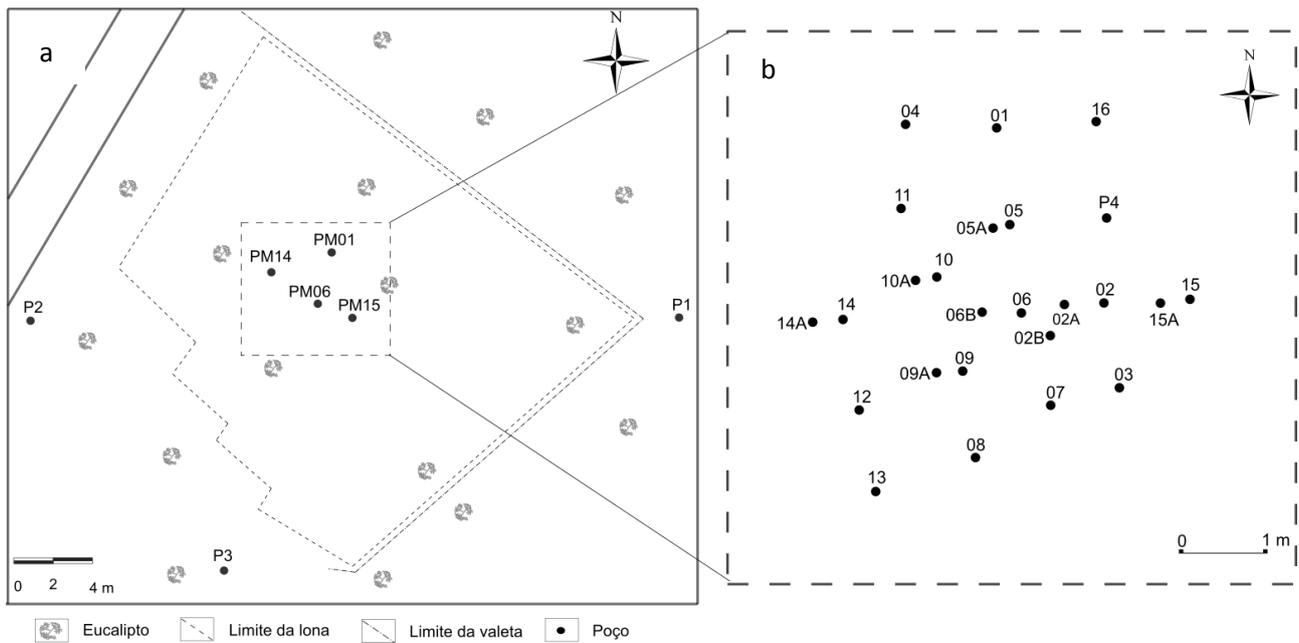


Figura 5. Distribuição dos poços de monitoramento na área do experimento, em (a) os poços instalados fora da área impermeabilizada, e em (b) os poços dentro da área impermeabilizada onde houve a indução ao crescimento das raízes dos eucaliptos

3.3 - Injeção de nitrato no aquífero

Até o momento duas campanhas de injeção de uma solução de nitrato de sódio e cloreto de potássio foram realizadas, com concentrações de cloreto e nitrato de 500 mg/L e 2000 mg/L. O poço injetado foi o PM-02. A solução foi preparada em laboratório e mesclada com água da mesma unidade geológica no campo (água de nascente).

4 – RESULTADOS

A litologia descrita durante a perfuração das sondagens é predominantemente arenosa, homogêneo em profundidade e lateralidade. Análises químicas e físicas realizadas em amostras de solo coletada durante a perfuração, mostrou que o solo tem frações de cerca de 80% de areia, 18% de argila e 2% de silte, o valor de porosidade efetiva é de 28%, e a quantidade de matéria orgânica foi de 1 a 4 g/kg. A condutividade hidráulica média de 8 testes deste material foi de $1,04 \times 10^{-5}$ m/s

Durante os monitoramentos dos níveis d'água dos poços da área de superfície coberta foram observadas raízes na zona saturada, confirmando a eficiência no conjunto de medidas utilizado para interromper a infiltração da precipitação.

A técnica empregada intensificou o crescimento das raízes até profundidades de 9,70 m, cerca de 2 m dentro da zona saturada entre janeiro e setembro de 2014, devido ao estresse hídrico criado. Tais raízes foram observadas nas tubulações de poços que foram retirados e reinstalados em setembro de 2014, e também ao longo de todo o perfil.

Os níveis d'água foram medidos em período de chuvas e estiagem durante um ano. Em outubro de 2014, na área de superfície coberta os níveis variaram de 8,37 m a 8,72 m, e de 7,63 m a 9,72 m na área de superfície descoberta. Em maio de 2015, na área de superfície coberta os níveis variaram de 8,53 m a 8,83 m, e de 7,81 m a 9,48 m na área de superfície descoberta. Entre outubro de 2014 e setembro de 2015 o volume precipitado foi de 1338 mm, segundo os dados registrados na estação meteorológica da EECF. A maior variação do nível d'água na área impermeabilizada se deveu à evapotranspiração dos eucaliptos, pois se observou que os níveis caíram a partir da chegada do período de estiagem (abril de 2015), e continuaram a cair mesmo com a chegada das chuvas em julho de 2015. A queda média dos níveis d'água entre abril e setembro de 2015 foi de 0,40 m. Entretanto, na área de piso natural as variações do nível d'água foram controladas pela intensidade dos eventos de precipitação, pois nos meses chuvosos os níveis aumentaram em média 0,40 m e nos meses de estiagem diminuíram em média 0,20 m (Figura 4).

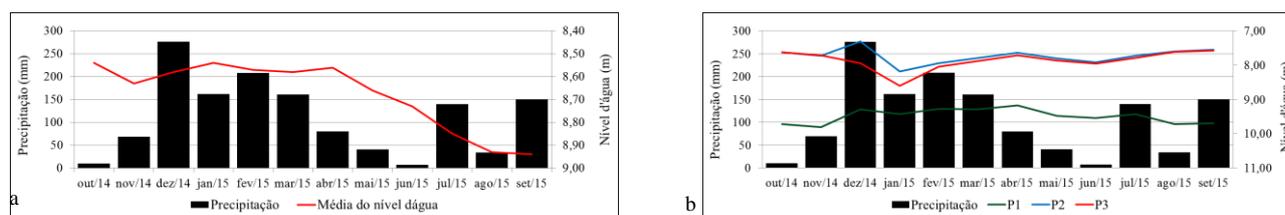


Figura 6. Precipitação versus nível d'água nas áreas de superfície coberta (a) e de superfície descoberta (b)

Foram calculadas as cargas hidráulicas a partir dos dados de nível d'água e cota relativa das bocas dos poços de monitoramento concentrados na área de superfície coberta. A interpolação das cargas hidráulicas permitiu a elaboração de mapas potenciométricos de maio e agosto de 2015, meses em que foram executadas as injeções, em ambos os meses o fluxo da água subterrânea tem sentido preferencial para oeste (Figura 5).

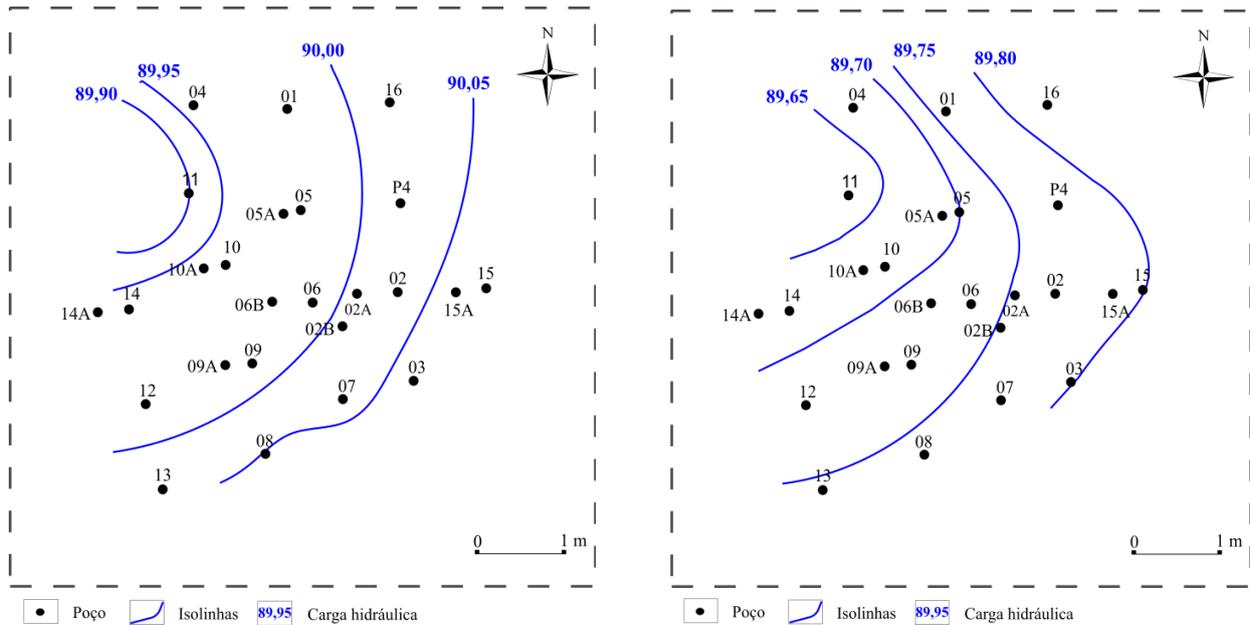


Figura 7. Potenciometria do aquífero de maio de 2015 (a) e agosto de 2015 (b), meses em que foram realizadas a primeira e a segunda campanha de injeção

A injeção preliminar de nitrato no PM-02 foi realizado em duas campanhas com concentrações de nitrato e cloreto, uma de 500 mg/L e outra de 2000 mg/L, com volumes de 60 litros de soluto. A grande permeabilidade da área fez com que o tempo de injeção fosse em menos de 10 minutos. Os resultados preliminares mostraram que o nitrato foi rapidamente consumido em grande proporção em períodos de até 144 minutos para ambas as campanhas. A pluma de injeção ficou restrita aos poços PM-02 e PM-02B.

5 – CONCLUSÕES

O método de impermeabilização da superfície da área permitiu que as raízes de eucalipto aprofundassem no aquífero em > 2 m, permitindo que a fitorremediação ocorresse na porção superior da zona saturada. Ademais as raízes de eucalipto podem chegar a profundidades superiores a 9 m em terrenos arenosos. Assim, essa capacidade das raízes permitem aos eucaliptos à capacidade de retirar águas contaminadas do aquífero, uma vez que absorvem junto com a água, nutrientes em quantidades expressivas, sem distinção. Para a área estudada foram retirados do aquífero pelos eucaliptos os íons cloreto e nitrato a concentrações superiores a 2000 mg/L, embora há fortes indícios de que maiores concentrações podem ser remediadas.

Um sistema de fitorremediação de baixo custo pode ser construído a partir da plantação de eucaliptos a jusante de uma pluma contaminante.

A capacidade do eucalipto de aceitar vários tipos de substâncias tóxicas, incluindo metais e solventes organoclorados, ademais de nutrientes; rápido crescimento; adaptação a diferentes climas e tipos de solos, permite que o método seja amplamente usado quando a contaminação do aquífero seja rasa e esteja na parte superior de sua zona saturada.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (Processo nº 2012/20124-3) pelo auxílio financeiro ao projeto e a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior - CAPES CNPq pela bolsa de mestrado para a primeira autora. Ressalta-se aqui a importância da parceria do Instituto de Geociências através do CEPAS|USP com a Universidade de Tsukuba, Japão. Também agradece ao Sr. Paulo Lima pela ajuda nos trabalhos de campo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E. N., 1970. O eucalipto. São Paulo. Cia Paulista de Estradas de Ferro. 667 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., 2007. Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 1: Projeto e construção - NBR 15495-1. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., 2008. Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 2: Desenvolvimento - NBR 15495-2. Rio de Janeiro: ABNT .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS., 2013. Anuário Estatístico da ABRAF 2012. Viçosa: ABRAF, p. 148. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF12/ABRAF12-BR.pdf>. Acessado em: 25 abr. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA., 2015. A cultura do eucalipto e o consumo de água. Disponível em: <<http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/567>>. Acessado em 01 de dezembro de 2015.
- BRITTO, D. T.; KRONZUCKER H. J., 2002. NH₄⁺ toxicity in higher plants a critical review. Elsevier – Journal of plants physiology, v 159, n 6, p. 567 – 584. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161704702667>>. Acessado em: 25 abr. 2014.

- BARAC, T., Wevens, N., Oeven, L., Taghavi, S., Van der Lelie, D., Dubin, D., et. al., 2009. Field Note: Hydraulic Containment of a BTEX plume using poplar trees. *International journal of phytoremediation*, v.11, issue 5, p.416-424.
- BUOSI, D. Felfili, J., 2004. *Recuperação de área contaminada por pesticidas organoclorados na Cidade dos Meninos, Município de Duque de Caxias*. Rio de Janeiro: Revista Árvore nº 28, p. 465 – 470.
- CAMARGO, M. L. P. Moraes, C. B. Mori, E. S. Guerinni, I. A. Mello, E. J. Od, S., 2004. *Nota científica Considerações sobre eficiência nutricional em Eucalyptus*. Jaboticabal: Científica, v 32, n 2, p. 191 - 196. Disponível em: <<http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/87/70>>. Acessado em: 25 abr. 2014.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB., 2012. Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo: 2010 – 2012. Disponível em <<http://aguassubterraneas.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>>. Acesso em 02 mar 2016.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP., 2016. A SABESP no município. Disponível em <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Municipio.aspx?secaoId=18&id=515>>. Acesso em 02 mar 2016.
- CHRISTINA, M. Laclau, J. P. Gonçalves, J. L. M. Jourdan, C. Nouvellon, Y. Boiullet, J. P., 2011. *Almost symmetrical vertical growth rates above and below ground in one of the most productive forests*. *Nature Communications.*, v 2 (3), n 27, p. 10. Disponível em: <<http://www.esajournals.org/doi/pdf/10.1890/ES10-00158.1>>. Acessado em: 25 abr. 2014.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE, Instituto Geológico – IG, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, CPRM, 2005. Escala 1:1.000.000.
- FETTER, C.W., 1994. *Applied Hydrogeology*. 2 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 596 p.
- GRIEVE, B.J., 1956. Studies in the water relations of plants. I- Transpiration of Western Australia (Swan Plain) sclerophylls. *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 40: 15-30.
- HONG, M. S. Farmayan, W. F. Ira, J. D. Chem, Y. C., 2001. *Phytoremediation of MTBE from a Groundwater Plume*. *Environ. Sci. Technol.*, v 35., n 6, p. 1231–1239.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT., 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT. 1v. Escala 1:500.000.

- LINTERN, M. Anand, R. Ryan, C. Peterson, D., 2013. Natural gold particles in eucalyptus leaves and their relevance to exploration for buried gold deposits. *Ecosphere.*, p. 8. Disponível em: <<http://www.nature.com/ncomms/2013/131022/ncomms3614/full/ncomms3614.html>>. Acessado em: 02 abr. 2014.
- MACKOVA, M., Vrchotova, B., Francova, K., Sylvestre, M., Tomaniova, M., Lovecka, P., et al., 2007. Biotransformation of PCBs by Plants and bacteria and consequences of plant-microbe interactions. *European Journal of Soil Biology*, p.233-241.
- MAGALHÃES, M., 2008. Evaluation of the potential of eucalypt species in the remediation of areas contaminated with heavy metals. Dissertação de Mestrado em Agronomia e Ciências do Solo. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- MALAVOLTA, E. V. C. G. Oliveira, A., 1998. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fósforo. 201p.
- MCMULLIN, E., 1993. An Absorbing idea. *California Farmer*. p. 20-24.
- NACOB, M. R., 1956. Growth Habits of the Eucalypt. Forest and Timber Bureau. Commonwealth of Australia. Canberra. 262pp.
- NALON, L., 2008. Potencial do eucalipto na fitoremediação de um solo contaminado por chumbo. Dissertação de Mestrado e Ciências Agrárias e Veterinárias . Universidade Estadual Paulista.
- POORE, M. E. D.; Fries, C., 1985. The ecological effects of eucalyptus. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, v 59, p. 04 - 20. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-an793e.pdf>>. Acessado em: 07 abr. 2014.
- RAVEN, Peter H.; EVERT, Ray F.; EICHHORN, Susan. E., 2007. *Biologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 7ª ed.
- SHEA, S.R.; Hatch, A. B., Havell, J. J., Ritson, P., 1975. The effects of changes in forest structure and composition on water quality and yield from the northern Jarrah forest. In: *Managing Terrestrial Ecosystems*. J. Kikkawa & H.A. Nix (Ed.) Proc. Of the Ecological Society of Australia, vol. 9 p.58-73.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS. 2014. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014. Disponível em <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>, acessado dia 08 de junho de 2016.
- STONE, E. L., Kalisz, P.L., 1991. On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management* 46:59-102.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 2014. Software AquiferTest 2014.1. Nova Metrix LLC.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA., 2001. A Citizen's Guide to Phytoremediation. Disponível em: <http://www.clu-in.org/download/citizens/citphyto.pdf>, acessado dia 07 de abril de 2014.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. 2000. Introduction of Phytoremediation. Disponível em: <https://www3.epa.gov/>, acessado dia 07 de abril de 2014.

ZHANG, Q.; Davis, L. C.; Scott F.; Erickson, N, L. E., 1999. An experimental study of phytoremediation of methyl-tert butylether (MTBE) in groundwater. Conference on Hazardous Waste Research., v 432 – 433, p. 227 – 242. Disponível em: <http://www.engg.ksu.edu/HSRC/99Proceed/zhang.pdf>. Acessado em: 07 mai. 2014.