

# CONTRIBUIÇÃO DOS SOLOS IRRIGADOS NA DINÂMICA DE SALINIZAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ALUVIÕES

Abelardo A. A. Montenegro<sup>1</sup>, Suzana M. Gico L. Montenegro<sup>2</sup> e  
Rae Mackay<sup>3</sup>

**Resumo** - O estudo da dinâmica da salinização de aquíferos aluviais em decorrência da prática de irrigação, associada a condições climáticas específicas de clima semi-árido é o principal foco deste trabalho. A metodologia apresentada envolve o acoplamento de modelos computacionais de fluxo e transporte de sais na zona saturada e não saturada de solo, levando em consideração a variabilidade espacial das propriedades hidráulicas e a variabilidade temporal das entradas e saídas de água e sal no sistema. O modelo desenvolvido para a zona não saturada é do tipo simplificado, baseado no balanço hídrico e de sais em uma coluna de solo. A metodologia é aplicada a um estudo de caso utilizando dados reais de uma fazenda irrigada no interior de Pernambuco.

**Palavras-chave** - Salinização, aluvião, semi-árido

## INTRODUÇÃO

Os aquíferos aluviais do Nordeste brasileiro vêm sendo amplamente utilizados dentre outros fins para a pequena agricultura irrigada. As manchas aluvionares presentes no Nordeste brasileiro, por constituírem fontes renováveis de recursos hídricos, devem ser consideradas como áreas prioritárias para o desenvolvimento agrícola de pequena escala. Se apoiada em sistema produtivo de baixo custo, a agricultura irrigada em manchas aluvionares é capaz de reduzir impactos ambientais - quando comparada com

---

<sup>1</sup> UFRPE. Av. D. M. de Medeiros, s/n. Recife-PE. Fone:(081)4454418. monte@hotmail.com.br.

<sup>2</sup> UFPE. Av. A. Helió Ramos, s/n. Cid.Universitaria. Recife- PE. Fone/: (081)271-8223. 44smglm@npd.ufpe.br

agricultura de grande porte- , bem como permitir ações participativas das comunidades rurais.

Devido a fatores climáticos, aos métodos de irrigação utilizados, e a condições edáficas, os sais dissolvidos contidos na água de irrigação e do aquífero podem-se acumular no perfil do solo. Tal acumulação pode comprometer a qualidade do solo e, em consequência (através do ciclo da água no sistema), contribuir para a degradação da água subterrânea.

## **DOMÍNIO DE ESTUDO**

O estudo vem-se desenvolvendo em área de assentamento da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira-PE. Nesta Fazenda estão assentadas cerca de 50 famílias, que desenvolvem agricultura irrigada desde Dezembro de 1991, em lotes de cerca de 1 hectare. Parte da Fazenda (cerca de 60 ha) localiza-se sobre um aluvião, que é utilizado como fonte de suprimento para a agricultura irrigada, através de quatro poços Amazonas com ponteiras e 14 cacimbões construídos pelos agricultores. O aquífero aluvial é relativamente raso, com profundidade média de 10 metros, possuindo cerca de 15 km de extensão e 300 metros de largura. Neste estudo, esta formação geológica será referida como 'aluvião Mimoso', tendo em vista a vila de mesmo nome situada em suas proximidades.

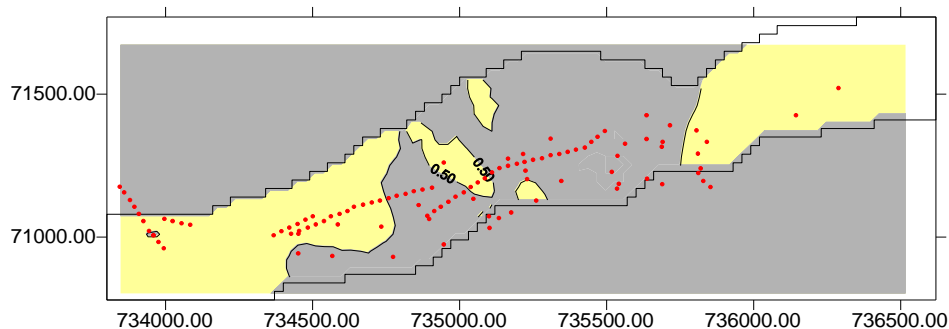
O município de Pesqueira está localizado na Região Agreste do Estado de Pernambuco, exibindo clima semi-árido muito quente tipo estepe, segundo Koeppen.

Com base em levantamento de campo para caracterização hidráulica do aluvião (**Montenegro(1997a)** e **Montenegro(1997b)**), 70 amostras de solo deformadas e indeformadas foram coletadas em três profundidades do aluvião. Solos lemo e lemo arenosos (segundo classificação triangular proposta pelo Serviço de Solos dos Estados Unidos) são dominantes, representando ao todo 75% do total de amostras analisadas. **Montenegro e Montenegro (1997)** descrevem metodologia indireta para cálculo das propriedades hidráulicas dos solos do aluvião Mimoso, baseada em dados de textura das amostras coletadas. Utilizando metodologia geostatística, pode-se construir mapa dos solos dominantes no aluvião (**Montenegro, 1997b**) (Figura 1). **Mackay e Montenegro (1996)** procederam a detalhado estudo da variabilidade espacial nas propriedades hidráulicas da zona saturada do aluvião. Testes de condutividade hidráulica foram

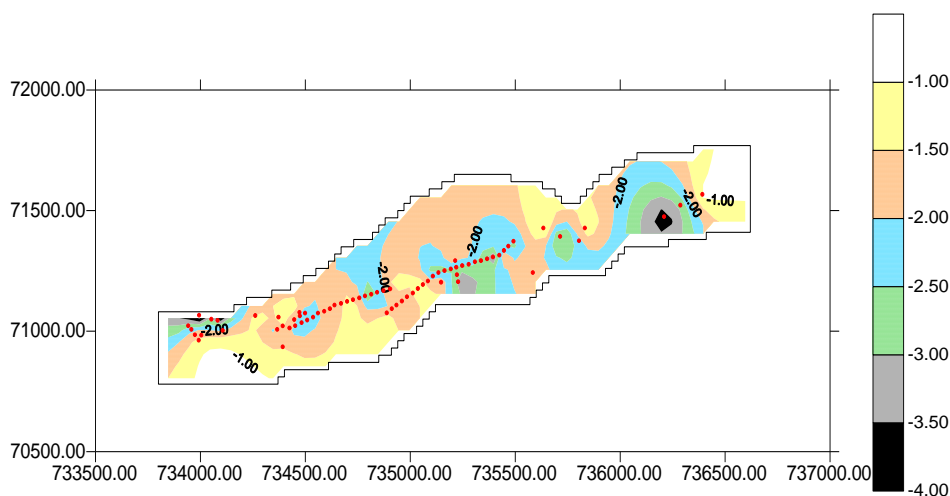
---

<sup>3</sup> Universidade de Birmingham, Inglaterra. R.Mackay@bham.ac.uk.

realizados em 63 piezômetros especialmente construídos para fins de caracterização e monitoramento. Com base em medidas replicadas de campo e no variograma resultante, mapa de condutividade hidráulica da zona saturada foi gerado para o domínio (Figura 2). Esse mapa demonstra o elevado grau de variabilidade espacial das propriedades hidráulicas.



**Figura 1-** Distribuição dos solos lemo arenosos (amarelo) e lemo (cinza).



**Figura 2-** Logaritmo da condutividade hidráulica da zona saturada (m/ d).

## **ESTIMATIVAS DE FLUXO E TRANSPORTE**

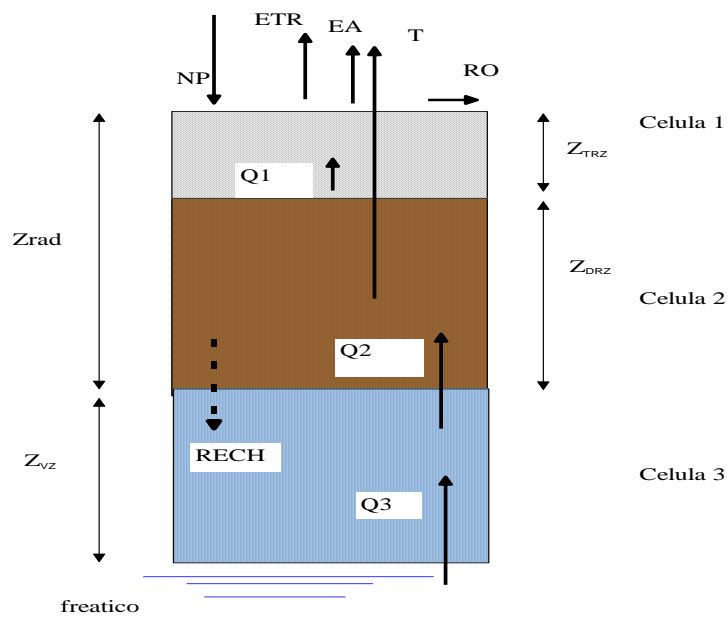
A dinâmica hidrológica do aluvião em resposta a eventos de evapotranspiração, de precipitação pluviométrica e de irrigação tem sido investigada neste estudo com base em modelagem integrada das zonas saturada e não-saturada. Em virtude da variabilidade temporal de eventos climáticos e hidrológicos típica do semi-árido Nordeste, a profundidade do lençol freático no domínio em estudo apresenta marcante sazonalidade, com variações anuais superiores a 3 metros. Tais oscilações têm fundamental

importância na duração de eventos de recarga e na magnitude de fenômenos capilares, como é demonstrado neste trabalho. A depender das concentrações salinas presentes na franja capilar, significativos aportes podem ocorrer em direção à rizosfera, provenientes de lençol freático raso. Com efeito, tais contribuições oriundas da zona saturada são passíveis de ocorrer mesmo durante a estação seca, devido aos reduzidos conteúdos de umidade na subsuperfície do aluvião. Com a lixiviação, estes sais retornam para o aquífero, e degradam as reservas hídricas subterrâneas, caso não haja eficiente circulação na zona saturada.

De modo a simular a potenciometria do aluvião em resposta aos componentes de recarga e descarga, bem como às explorações através de cacimbões, o modelo PARADIGM (**Mackay, 1993**), desenvolvido na Universidade de Newcastle- Inglaterra, foi selecionado, tendo em vista sua potencialidade em simular eficientemente variabilidade temporal de eventos hidrológicos e variabilidade espacial de propriedades hidráulicas de meios porosos.

Para previsão de componentes hídricos e de sais na zona não-saturada, modelo simplificado, baseado em discretização espacial do solo em três células (célula de sub-superfície, célula radicular e célula capilar) foi desenvolvido e comparado a modelos numéricos tradicionais baseados na Equação de Richards (ver **Montenegro (1997a) e Montenegro(1997b)**). Embora tais modelos detalhados constituam-se excelentes ferramentas de pesquisa, o elevado requerimento de dados dos mesmos limita suas aplicações em manejo de larga escala. Desse modo, modelos simplificados baseados em balanços, permanecem extremamente úteis e atuais.

Devido à marcante variação espacial e temporal da profundidade do lençol freático, especial atenção foi dedicada ao comportamento da componente capilar. A Figura 3 apresenta discretização da zona não- saturada, onde **T** é a transpiração (célula 2), **EAR** a evaporação do solo nu, **ETR** a transpiração (célula 1), **RO** o runoff, e **NP** a precipitação líquida.



**Figura 3** - Discretização da zona não- saturada.

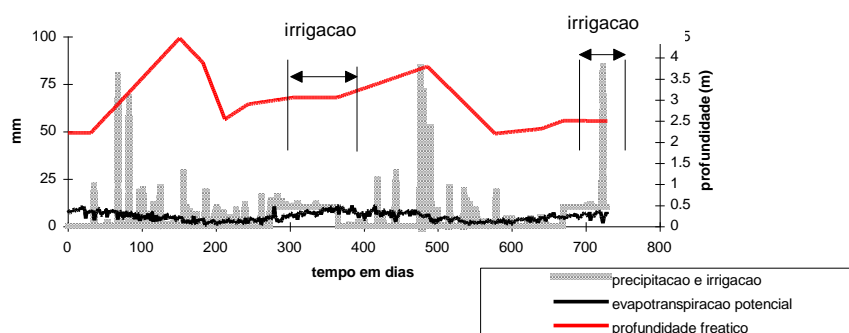
Aproximação “quasi-permanente” (sucessão de soluções permanentes) foi adotada para o fluxo, utilizando forma integrada da Equação de Darcy ao longo da franja capilar (Equação 1), expressa como:

$$z = \int_0^{\psi_b} \left[ 1 + \frac{q}{K(\psi)} \right]^{-1} d\psi \quad (1)$$

onde  $K(\psi)$  é a condutividade hidráulica em função de  $\psi$ ,  $\psi$  é a tensão no contorno superior da coluna de solo e  $q$  o fluxo capilar. Pode-se dessa forma determinar o perfil de umidade na referida célula e investigar a mínima profundidade,  $z$ , sob ação da franja capilar. Quando a ascensão capilar é desprezível, recarga difusa é passível de ocorrer, dependendo de eventos de irrigação e pluviometria. Os fluxos capilar e de recarga difusa para os solos dominantes do aluvião, simulados através do modelo simplificado, foram validados com resultados obtidos a partir de modelo numérico detalhado e com medidas experimentais em lisímetros (Montenegro, 1997b).

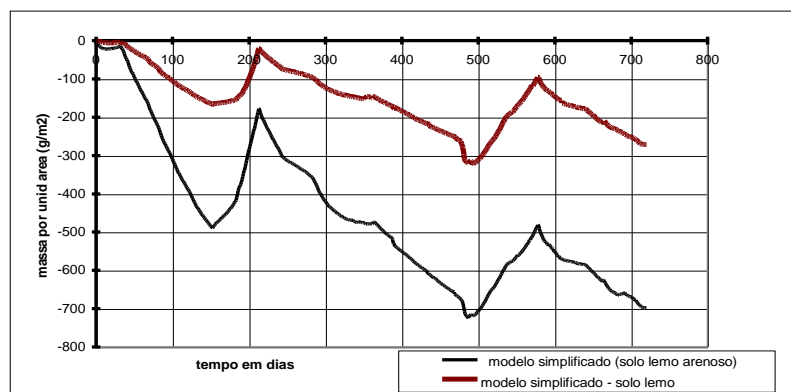
## **SIMULAÇÕES DE FLUXO E TRANSPORTE DE SAIS**

Utilizando-se dados climáticos locais e piezometrias medidas no poço 2 do aluvião, ambos para o período entre Novembro de 1993 a Outubro de 1995 (Figura 4), simulou-se dinâmica de sais na zona não-saturada do aluvião. Em razão da falta de informações detalhadas sobre umidade na zona não-saturada e perfis de salinidade dos solos em Novembro de 1993, condições de equilíbrio foram adotadas como inicialização da modelagem. A modelagem foi então inicialmente conduzida por um período de seis anos, de modo a inicializar perfis de umidade e salinidade, para as simulações no intervalo de Novembro de 1993 a Outubro de 1995. Calendário agrícola sugerido por **CISAGRO(1991)** foi adotado, com cultivo de beterraba de Setembro a Novembro. Fluxos e transporte de sais foram simulados na zona não saturada de solos lemo e lemo-arenosos.



**Figura 4-** Profundidade lençol freático no Poço P2 e dados climáticos da estação de Pesqueira no período Novembro de 1993 – Outubro de 1995.

A Figura 5 apresenta, como resultado das simulações, o balanço entre recarga e descarga de sais acumulado, no período considerado, para solos lemo e lemo-arenosos.

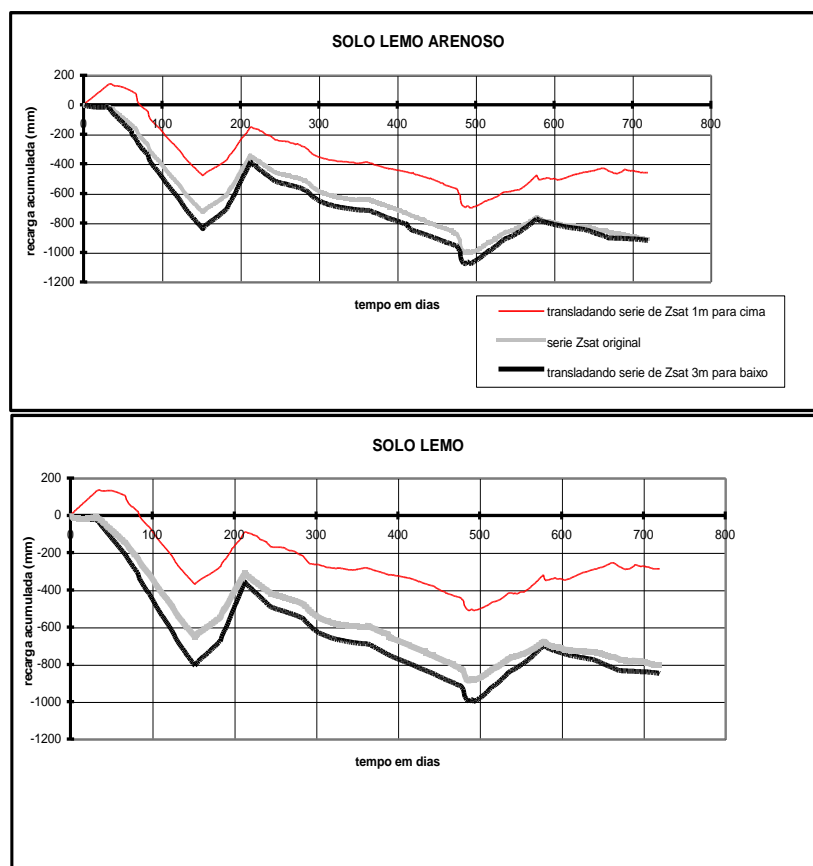


**Figura 5** - Transporte de sais acumulado, através do contorno superior do lençol freático, no período Novembro 1993- Dezembro de 1995 (valores negativos correspondem a eventos de recarga para a zona saturada)

Como se pode notar, o transporte de massa ascendente através do topo do lençol é mais elevado para os solos lemo. Esta diferença pode ser explicada considerando os fluxos capilares de maior magnitude que se estabelecem nos solos lemo, e os superiores valores de condutividade elétrica da zona saturada em tais solos.

Análise de sensibilidade dos fluxos (no contorno saturado- não saturado) à profundidade do lençol freático foi conduzida, trasladando-se a série temporal de profundidades apresentada na Figura 4, tanto para cima (lençol mais raso), quanto para baixo. Os resultados do balanço de massa estão apresentados na Figura 6.

Pode-se notar o importante papel do lençol freático raso no controle de mecanismo de recarga para a zona saturada. Mesmo durante a estação chuvosa, recarga difusa para um aquífero pode ser reduzida ou mesmo anulada caso a zona saturada esteja próxima da superfície. Conforme ilustrado na Figura 6, redução significativa de recarga ocorreu em consequência da ascensão generalizada do lençol em 1 metro (redução de 49% e 64% ao final do período de simulação, para os solos lemo- arenosos e lemo, respectivamente). Por outro lado, leve incremento em recarga ocorreu quando a série temporal foi trasladada para baixo. A maior redução para os solos lemo pode ser explicada através do comportamento fortemente não-linear do fluxo capilar nestes solos.



**Figura 6** - Controle hidráulico à recarga difusa, exercido por lençol freático raso, no período Novembro 1993- Dezembro de 1995.

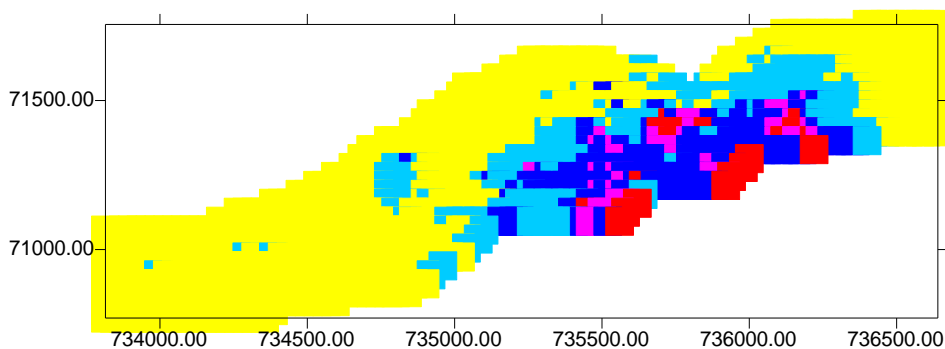
## SIMULAÇÕES REGIONAIS

O modelo simplificado descrito sumariamente na seção anterior (ver **Montenegro (1997b)**) foi integrado e acoplado ao modelo PARADIGM para fluxo e transporte em meios saturados. Distribuições de salinidade e carga hidráulica no aluvião foram simuladas, considerando a variabilidade espacial de solos (representada no mapa apresentado na Figura 1) , e a distribuição espacial de condutividade hidráulica da zona saturada, conforme Figura 2.

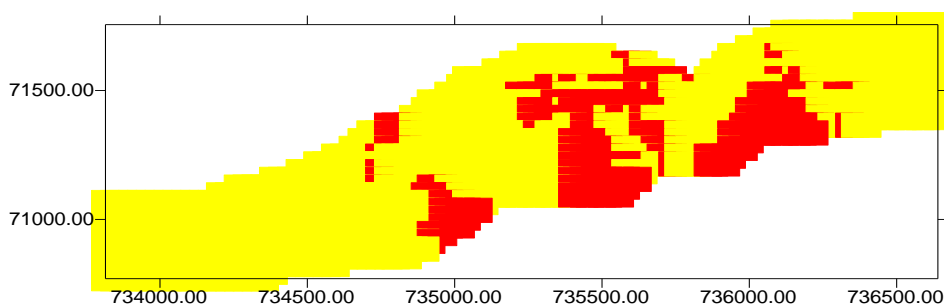
A partir da análise dos resultados simulados, áreas críticas exibindo altos conteúdos de sais podem ser identificadas, as quais são consistentes com observações de campo (consultar **Montenegro (1997b)**). Tais áreas críticas estão situadas na parte média e baixa do aluvião, para onde se concentram os sais aplicados ao sistema através do contorno superior e dos lotes irrigados.



A distribuição de sais no aquífero apresenta forte correlação com a profundidade do lençol freático e com o tipo de solo. Quando lençol freático raso ocorre em regiões de solos finos, uma região de descarga distribuída pode-se estabelecer, e produzir acúmulo de soluto e reconcentração na zona saturada. Com efeito, conforme destacado em **Salama (1993)**, a distribuição de sais em aquíferos livres está intimamente ligada à distribuição espacial e temporal das zonas de descarga e recarga. A Figura 8 apresenta a integração ao longo do tempo do fluxo **Q3** (ver Figura 3) entre as zonas saturada e não-saturada, para um período de simulação de 12 anos após implementação da irrigação. As regiões de descarga (em vermelho) estão, em termos gerais, associadas com zonas de alto teor de sais dissolvidos (Figura 7).



**Figura 7** - Condutividades elétricas (dS/m) doze anos após implementação da irrigação : amarelo (entre 0 e 1); azul claro (entre 1 e 2); azul escuro (entre 2 e 3); rosa (entre 3 e 4); vermelho (entre 4 e 5)



**Figura 8** - Zonas de recarga (amarelo) e de descarga (vermelho) doze anos após implementação da irrigação

## CONCLUSÕES

Este estudo demonstra o potencial de ferramentas desenvolvidas para o estudo de salinização de aquíferos aluviais em regiões semi-áridas. Pode-se extrair desse estudo as seguintes conclusões:

- A ocorrência de lençol freático raso, em áreas de solos finos, desempenham forte controle hidráulico à recarga difusa, que ocorreria devido a precipitações pluviométricas e a irrigações. Com a redução na recarga difusa, sais se acumulam nos perfis de solo, e diminui-se o potencial hídrico dos vales aluviais.
- Com a ascensões capilares, motivadas pelas elevadas demandas atmosféricas das regiões semi-áridas, depressões hidráulicas são geradas na zona saturada, as quais passam a atuar como regiões de convergência de fluxos e transporte saturados. Desse modo, tais zonas deprimidas interrompem localmente a circulação regional, permitem reconcentração e, conseqüentemente, salinização das águas subterrâneas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- **CNPq**- Brasil, da “Overseas Development Administration”- **ODA**- Inglaterra, da Universidade Federal Rural de Pernambuco- **UFRPE**, da Universidade Federal de Pernambuco- **UFPE**, e da **EMATER- PE** para realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CISAGRO** (Companhia Integrada de Serviços Agropecuários). 1991. Projeto de Irrigação da fazenda Nossa Senhora do Rosario-Pesqueira-PE. Pernambuco, Recife-PE.
- Mackay, R.** 1993. A Study of the effect of the extent of site investigation of radiological performance, Volume 1- Development of the synthetic site model, Report No. DoE/HMIP/RR/93.052, Water Resource Systems Research Unit, Newcastle University, UK
- Mackay, R. and A. A. A. Montenegro.** 1996. Salinity control for sustainable small scale agriculture, Final Report to the Overseas Development Administration (ODA), UK. 30pp

- Montenegro, S.M.G.L.** 1997a. Stochastic analysis of salt accumulation in heterogeneous irrigated soils: A case study in Northeast Brazil, PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK
- Montenegro, A.A.A** 1997b. Stochastic Hydrogeological Modelling of Aquifer Salinization from Small Scale Agriculture in Northeast Brazil, PhD Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, UK
- Montenegro, S.M.G.L., Montenegro, A.A.A** 1997- Uso de Funções de Transferência Hidropedológica em uma Área Irrigada do Estado de Pernambuco Visando Modelagem espacial Estocástica; XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória- ES
- Salama, R. B., P. Farrington, G. A. Bartle, and G. D. Watson.** 1993a. Distribution of recharge and discharge areas in a first-order catchment as interpreted from water level patterns. *Journal of Hydrology*, 143: 259- 277