

**TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ MÔ HÌNH HÓA CÁC QUÁ TRÌNH THỦY  
LỰC VÀ HÓA LÝ TRONG NƯỚC NGẦM - ỨNG DỤNG TRONG  
NGHIÊN CỨU ĐẤT PHÈN  
OVERVIEW ON MODELLING OF HYDRAULIC- AND CHEMICO-  
PHYSICAL PROCESSES IN GROUND WATER  
AND APPLICABILITY FOR ACID SULPHATE SOILS**

Hồ Long Phi

Khoa Kỹ thuật Xây dựng - Trường Đại học Bách khoa TP HCM

**BẢN TÓM TẮT**

Để đánh giá các tác động môi trường đối với các dự án khai thác tổng hợp và bền vững các nguồn tài nguyên đất - nước trong một lưu vực, xu thế chung hiện nay trên thế giới là tích hợp các kiến thức chuyên ngành riêng rẽ để phát triển những hiểu biết mới thông qua việc nghiên cứu những quá trình tương tác động (dynamic interaction) giữa các yếu tố thủy lực - hóa - lý - sinh diễn ra trong môi trường đất và nước. Bài báo sẽ đề cập đến những phát triển cho đến nay về vấn đề mô hình hóa các diễn biến thủy lực và chất lượng trong nước ngầm, đặc biệt là khả năng ứng dụng trong mô hình hóa môi trường đất phèn; từ đó chỉ ra những nghiên cứu cần được tiếp tục trong thời gian tới.

**ABSTRACT**

In order to assess environmental impacts for projects to exploit integratedly and sustainably resources of soil-water in a watershed, the currently common trend in the world is that the specific knowledge on separated fields should be integrated in order to achieve new understanding through investigations of dynamic interactions among hydraulic-chemical-physical-biological factors occurring within soil-water media. The paper aims to overview important results dealing with the modelling problems of hydraulic and quality for sub-surface water, and particularly, their applicability in modelisation of acid sulphate soils. Some orientations for the problems to be concerned in coming years are also suggested.

**GIỚI THIỆU**

Việc đánh giá các tác động môi trường đối với các dự án khai thác tổng hợp và bền vững các nguồn tài nguyên đất - nước và sinh vật trong một lưu vực đang là một trong những nhu cầu hết sức bức thiết để có thể dự báo những thay đổi trong tương lai và phát triển những giải pháp quản lý tối ưu cho lưu vực. Sử dụng những hiểu biết đã có trong từng lĩnh vực cụ thể và riêng biệt, người ta đang cố gắng xây dựng những mô hình tích hợp, trong đó xét đến những diễn biến động giữa các yếu tố hóa - lý, tương tác với nhau dưới ảnh hưởng của các quá trình thủy lực. Cho đến nay mặc dù đã có khá nhiều mô hình tương tác được giới thiệu cho những bài toán cụ thể và đặc thù, có thể nói rằng chưa có, và có lẽ sẽ không bao giờ có, một mô hình vạn năng cho phép nghiên cứu bài toán tác động môi trường một cách tổng

quát. Xu thế chung vẫn là tìm cách xây dựng các mô hình tích hợp phù hợp cho từng điều kiện môi trường đặc thù, trong đó các nghiên cứu riêng lẻ về các mặt hiện tượng đều đã được tiến hành từ lâu và đã thu được những hiểu biết cơ bản quan trọng. Tuy nhiên sự hiểu biết nhiều mặt về một đối tượng phức tạp như môi trường đất - nước vẫn chưa cho phép giải thích được những diễn biến phức tạp, mà cơ chế của chúng được quyết định bởi sự tương tác của các yếu tố vốn được nghiên cứu một cách tách biệt trong thời gian qua. Mặt khác, nhiều quyết định liên quan đến việc khai thác và quản trị tài nguyên đất - nước đòi hỏi phải có những dự báo dài hạn về tác động khả dĩ của các giải pháp giá định. Do đó việc mô phỏng các diễn biến động (hiểu theo nghĩa không gian và thời gian) của các yếu tố được quan tâm, thường là các độc chất, là hết sức

cần thiết. Cách thức duy nhất để giải quyết vấn đề này là sử dụng mô hình toán. Trong lớp bài toán nghiên cứu về tác động môi trường trên quy mô thực (field-scale) thường phải dựa trên nền của một mô hình thủy lực về lan truyền và cân bằng động của dòng chảy, trong đó sự tương tác thủy lực giữa các môi trường Khí quyển - Đất - Nước ngầm - Nước mặt cần phải được mô tả một cách chính xác. Các mô hình thủy lực 1D, 2D và 3D cho nước ngầm và nước mặt, được xây dựng theo các sơ đồ sai phân hữu hạn và phần tử hữu hạn đã được phát triển từ thập niên 1960 đến nay và đã đạt được những thành quả đáng kể. Các mô hình hiện có thuộc về hai dạng (1) Miền phí (Public domain) và (2) Thương mại (Commercial). Các phần mềm thương mại có giá bán rất cao (từ vài ngàn đến vài chục ngàn USD), thường khá mạnh và dễ sử dụng... trong khi đó các phần mềm miền phí thường có giao diện kém thân thiện, khó tìm hiểu và sử dụng. Tuy nhiên nếu chú ý khai thác thì đây là một nguồn quan trọng, có thể hỗ trợ rất tốt cho sinh viên cao học, nghiên cứu sinh và các nhà nghiên cứu trong việc nghiên cứu về mô hình hóa và phát triển những sản phẩm chuyên biệt hóa theo yêu cầu.

### **CÁC MÔ HÌNH TOÁN THỦY LỰC VÀ CHẤT LƯỢNG NƯỚC NGẦM**

Với mục đích đặt ra là tìm kiếm và đánh giá những phần mềm có thể cho phép nối kết, mở rộng và cải tạo giao diện, dưới đây chúng tôi giới thiệu một số phần mềm mở được chấp nhận bởi USGS (United States Geological Survey) và USEPA (United States Environment Protection Agency), được cho phép sử dụng trên toàn nước Mỹ.

#### **BIOPLUME**

Là một phần mềm dùng để mô phỏng nồng độ, phản ứng và vận chuyển của Hydrocarbon trong đất và nước ngầm.

#### **CHEMFLO**

Dùng để mô phỏng dòng thấm và chuyển vận dung dịch trong môi trường bão hòa/không bão hòa. Tuy nhiên các diễn biến tương tác hóa học chỉ được xét đến với mức độ hạn chế. Mô hình này thích hợp với các thành phần dung dịch không phản ứng (Non-active).

#### **VLEACH**

Là một mô hình sai phân hữu hạn 1, có khả năng xét đến các phản ứng đơn giản trong đất như hấp phụ và cân bằng và khuếch tán.

#### **MOFAT**

Là một mô hình 2D phần tử hữu hạn có mô phỏng dòng chảy nhiều pha trong đất. Tuy nhiên mô hình không cho phép tính toán các diễn biến cân bằng hóa học cũng như vận chuyển dung dịch.

#### **FEMWATER / LEWASTE**

Cho phép nghiên cứu dòng chảy và vận chuyển 3D trong môi trường bão hòa, không ổn định cũng như phản ứng hấp phụ bậc nhất. **3DFEMWATER** là một mô hình phần tử hữu hạn 3D dùng để mô phỏng chuyển động của dòng thấm qua môi trường đất bão hòa và không bão hòa. Nó được sử dụng kết hợp với **3DLEWASTE** để mô phỏng hiện tượng vận chuyển chất trong điều kiện thấm không ổn định. Mô hình này được phát triển vào năm 1993 bằng ngôn ngữ FORTRAN và chạy dưới môi trường DOS. Do tính phức tạp, thiếu tài liệu hướng dẫn và khả năng liên thông kém, mô hình này không được sử dụng phổ biến và thường chỉ được dùng với mục đích kiểm tra.

#### **MULTIMED**

Là mô hình 1D, bao gồm 3 module. Module 1 tính toán ảnh hưởng của mưa, thấm, chảy tràn và dòng thấm ngang. Module 2 mô phỏng dòng thấm thẳng đứng không ổn định và dòng thấm ngang bão hòa. Module 3 cho phép đánh giá ô nhiễm của dòng chảy mặt do tương tác với dòng thấm ổn định.

#### **PESTAN**

Dùng để mô tả chuyển động thẳng đứng của dung dịch hữu cơ xuyên qua tầng không bão hòa xuống đến nước ngầm. Bài toán chuyển vận chất được mô tả thông qua lời giải giải tích của phương trình khuếch tán - đối lưu.

**MODFLOW** (USGS Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model) là một phần mềm sai phân hữu hạn có khả năng mô phỏng hầu hết các quá trình xảy ra trong nước ngầm và đã hầu như trở nên một phần mềm chuẩn, được thừa nhận và sử dụng rộng rãi bởi các cơ quan, công ty tư vấn, trường đại học và công nghiệp trên khắp thế giới. Tuy nhiên MODFLOW cần phải được liên kết với một phần mềm khác để có được khả năng mô phỏng các quá trình vận chuyển chất trong nước ngầm.

**RT3D** là một phần mềm 3D được mở rộng từ phần mềm nổi tiếng MT3D, chuyên dùng để mô phỏng các quá trình chuyển vận, phản ứng đa chất trong môi trường địa hóa học. RT3D

cung cấp các module phản ứng được lập trình sẵn cũng như cho phép người sử dụng được định nghĩa các quá trình theo ý muốn. Đặc tính mềm dẻo này cho phép RT3D được áp dụng khá rộng rãi trong các bài toán địa hóa học. Giống như MT3D, phần mềm này cũng có thể cho phép kết nối với MODFLOW trong các bài toán thực tế.

Các phần mềm trên đây đều có thể được download miễn phí trên mạng, với khá nhiều những tài liệu hướng dẫn cần thiết. Tuy nhiên nhược điểm chung của các phần mềm đa dụng là khó thể áp dụng trực tiếp cho các quá trình xảy ra trong môi trường rất đặc thù của đất phèn.

### CÁC MÔ HÌNH TOÁN VỀ ĐẤT PHÈN

Vấn đề càng trở nên đặc biệt phức tạp đối với đất phèn là loại đất có bản chất phức tạp vào bậc nhất trên thế giới. Các hiện tượng xảy ra trong đất phèn đã được nghiên cứu từ vài thập kỷ nay, chủ yếu là bởi các tiếp cận mang tính phiến diện xuất phát từ những yêu cầu bức thiết của các đối tượng sử dụng đất. Tuy nhiên càng ngày người ta càng nhận ra rằng chỉ có thể đạt được những hiểu biết đầy đủ về đất phèn thông qua những nghiên cứu mang tính tổng hợp để có thể xét đến những quá trình tương tác phức tạp của các yếu tố thủy lực - hóa - lý - sinh học diễn ra trong đất phèn.

Phát triển một mô hình toán đủ mạnh để cho phép nghiên cứu các diễn biến tương tác động xảy ra trên diện rộng và thời gian đủ dài trên môi trường đất phèn là mục đích được đặt ra. Đây là một thách thức thực sự, bởi vì trong hơn ba thập kỷ nghiên cứu về đất phèn trên thế giới, số mô hình đã được thiết lập là quá ít và còn nhiều nhược điểm. Trong cùng thời gian đó, lĩnh vực mô hình toán dành cho môi trường đất - nước, kể cả thủy lực và hóa lý, đã phát triển rất mạnh trong với những mô hình 2D, 3D sai phân hữu hạn và phần tử hữu hạn. Nhiều mô hình đã được kiểm định và đánh giá rất cẩn thận và được sử dụng rộng rãi trong những dự án khác nhau về môi trường và lưu vực, điển hình là những mô hình được thiết lập bởi USGS và EPA của Hoa Kỳ. Dưới đây, chúng tôi liệt kê một số phần mềm nghiên cứu về đất phèn đã được phát triển trong thời gian qua trên thế giới.

Mô hình **MAGIC** (Model for Acidification of Groundwater In Catchments)

[1] được giới thiệu vào năm 1985 để nghiên cứu những diễn biến dài hạn của lưu vực trong quá trình acid hóa của đất và nước. Mô hình MAGIC đưa vào các phương trình cân bằng trong dung dịch đất như hấp phụ sulphate, trao đổi cation, hòa tan và kết tủa của nhôm cũng như carbon vô cơ và hữu cơ. Sản phẩm của các quá trình cân bằng hóa học này được trao đổi trong quá trình tương tác giữa nước ngầm và nước mặt cũng như các tác nhân tiêu tán khác. Tuy nhiên MAGIC thiếu hẳn sự mô tả về cơ chế của oxy hóa pyrite, là nguồn acid hóa chủ yếu của đất phèn. Ngoài ra, cơ chế tương tác thủy lực của mô hình này được thiết lập quá đơn giản theo kiểu khối rút gọn (lumped approach) nên khó thể mô tả được tính chất bất đồng nhất của lưu vực thực. Mặt khác, các quá trình xảy ra trong đất phèn thường không phải là quá trình cân bằng và hoàn chỉnh.

Một bước ngoặt căn bản đã diễn ra vào năm 1992 khi Bronswijk và Groenenberg giới thiệu mô hình **SMASS** trên cơ sở kết hợp các module riêng rẽ SWATRE và EPIDIM và các module bổ sung khác để có thể mô phỏng và dự báo các diễn biến xảy ra trong đất phèn. SMASS (Simulation model for Acid Sulphate Soils) về bản chất là một phần mềm được tạo lập bằng cách kết nối các module sẵn có chuyên dụng để mô phỏng các quá trình hóa lý xảy ra trong đất phèn. Khi được kết hợp với SWAP, một phần mềm tính toán thủy lực nước ngầm giả 2D, SMASS có thể cung cấp những khả năng mô phỏng những diễn biến hóa lý xảy ra trong đất phèn-mặn. Tuy nhiên nhược điểm của SMASS chỉ mô phỏng các diễn biến hóa lý trong đất phèn dựa trên nền thủy lực của mô hình SWAP nên không đủ khả năng nghiên cứu các bài toán tương tác thủy lực nước mặt - nước ngầm phức tạp xảy ra trong thực tế. Ngoài ra khả năng liên kết với một mô hình thủy lực nền tốt hơn (sơ đồ 2D hoặc 3D thực với các điều kiện biên phức tạp bất kỳ) là hạn chế do tính năng module hóa không cao.

Mô hình SMASS đã được sửa chữa, đánh giá và khai thác trong những năm tiếp theo [1], [2] trong các dự án nghiên cứu độc lập. Tuy nhiên việc mở rộng các ứng dụng cho mô hình SMASS đã gặp phải các khó khăn nhất định.

Thứ nhất, module thủy lực SWATRE (sau này được thay thế bằng SWAP) là một mô hình 2D giả lập nên không thể đáp ứng được các yêu cầu thực tế của vấn đề tương tác thủy

lực phức tạp của đồng bằng ven biển chịu ảnh hưởng mạnh của thủy triều.

Thứ hai, quá trình oxy hóa pyrite được giả thiết chỉ xảy ra do oxy hòa tan trong dịch đất và được khống chế bởi cơ chế giảm đường kính tinh thể một cách đồng đều (equal diameter reduction model), mà chưa xét đến quá trình oxy hóa hóa học bởi  $Fe^{3+}$ .

Thứ ba, vấn đề tương tác động về chất lượng giữa nước mặt và nước ngầm là chưa được xét đến. SMASS giả định một môi trường có chất lượng không đổi của nước mặt và nước ngầm như là những điều kiện biên của quá trình mô phỏng quá trình oxy hóa diễn ra trong đất. Trên thực tế, những thông số này lại thay đổi theo thời gian và tương tác với nhau một cách mạnh mẽ.

Thứ tư, việc nối kết các kết quả thu được bởi SMASS với các mô hình lan truyền trong dòng chảy mặt vẫn chưa được nghiên cứu đúng mức, do đó các ứng dụng cho các bài toán diện rộng và dự báo dài hạn gặp phải những khó khăn nhất định.

So với MAGIC, mô hình SMASS đã tiến được một bước khá dài. Tuy nhiên từ sau 1998 đến nay, không có một thay đổi cơ bản nào được thực hiện đối với mô hình SMASS, thực chất là một mô hình 1D và không xét đến vấn đề tương tác với môi trường nước mặt.

Blunden và Indraratna (2000) đã nối kết SMASS với FEMWATER (Lin *et al.*, 1997) để tạo ra một mô hình có khả năng xét đến ảnh hưởng của hệ thống tưới - tiêu.

Rassam và Cook (2001) [8] đã sử dụng một mô hình chuyển vận chất 2D (HYDRUS-2D, Simunek *et al.*, 1999) để đánh giá tác động kết hợp của các quá trình bốc hơi và tiêu nước đối với hiện tượng vận chuyển chất trong đất phèn và mô phỏng sự chuyển vận của sulphate vào kênh tiêu.

Các mô hình nối kết cũng được thiết lập theo hướng giải tích để khắc phục nhược điểm của các mô hình số là quá phức tạp và cồng kềnh. Cook và Rassam (2002) đã liên kết mô hình tiêu nước của Youngs (1985) với mô hình bốc hơi của Gardner (1958) và Averiyonov (Wenyan *et al.*, 1992) để phát triển nên một mô hình đơn giản nhằm mô tả đồng thẩm từ đất phèn chảy vào kênh tiêu. Mô hình **FLASSH** (Cook, F.J. *et al.*, 2002) [3] đã kết hợp mô hình giải tích của Cook và Rassam (2002) với một mô hình thực nghiệm để mô

phong quá trình phát sinh và vận chuyển của nước trong đất phèn.

Những tiêu chí để đánh giá triển vọng áp dụng của phần mềm trong lĩnh vực nghiên cứu đất phèn bao gồm:

- Khả năng mô phỏng / cơ sở lý thuyết
- Thuật toán và sơ đồ tính
- Tính thân thiện và khả năng module hóa
- Tài liệu hướng dẫn và cơ sở lý thuyết, mã nguồn
- Kinh nghiệm sử dụng và diễn đàn trao đổi thông tin

Dựa trên những tiêu chí trên, các phần mềm trên đây đều không đạt yêu cầu về mặt này hay mặt khác. Các mô hình lưu vực cho đất phèn vẫn còn tồn tại những nhược điểm cơ bản và vấn đề phát triển một mô hình tốt hơn vẫn đang còn ở phía trước. Hướng phát triển có triển vọng nhất là xây dựng một module chuyên dụng cho đất phèn dựa trên nền của MODFLOW như đã được làm đối với nông được và ô nhiễm rác thải. Việc chọn MODFLOW làm phần mềm nền để phát triển và kết nối module đất phèn có các ưu điểm căn bản sau đây:

- Là một trong những phần mềm mã nguồn mở, có cấu trúc và giải thuật hiện đại, được chuẩn hóa và module hóa tốt nhất hiện nay.
- Được sử dụng rất rộng rãi và đã được kiểm nghiệm bởi nhiều nghiên cứu độc lập.
- Có diễn đàn trao đổi thông tin được cập nhật thường xuyên,
- Có tài liệu tham khảo khá chi tiết.

Việc xây dựng và đánh giá module đất phèn cần phải được thực hiện trên cơ sở những hiểu biết về lý thuyết và thực nghiệm mới nhất về loại đất đặc thù này.

## CÁC PHÁT TRIỂN LÝ THUYẾT HIỆN ĐẠI VỀ MÔ HÌNH TOÁN NƯỚC NGẦM

Bên cạnh các vấn đề liên quan đến mô hình hóa, việc tiếp tục hoàn thiện về lý thuyết của bài toán vận chuyển nước và chất trong nước ngầm vẫn có những thử nghiệm mới mẻ trong thời gian gần đây.

Tegnander (2001) [13] đã nghiên cứu một dạng thức mở rộng của phương trình Richard để xét đến ảnh hưởng của pha khí trong đất như là một thành phần độc lập (fractional flow). Trong đó, phương trình này chỉ là một trường hợp giới hạn khi tính lưu động của pha khí trong đất tiến đến vô hạn. Ngoài ra ảnh hưởng của các quá trình cơ ngót -

trường nở của đất cũng cần phải được xét đến trong dạng tổng quát hóa của phương trình Richards (H. L. Phi, 2005) [7].

Việc lựa chọn mô hình thích hợp cho một đối tượng nghiên cứu cho trước cũng được nghiên cứu theo hướng Genetic Algorithm [5], [6], [7]. Mặt khác việc mở rộng khả năng ứng dụng của các mô hình theo tích hợp GIS cũng trở thành một xu hướng chủ đạo trong những phát triển ứng dụng gần đây.

## KẾT LUẬN

Ở Việt Nam, các vấn đề liên quan đến môi trường đất phèn có thể gặp phải trong các lĩnh vực khác nhau: nông nghiệp, thủy sản, lâm nghiệp, vệ sinh và sức khỏe cộng đồng, giao thông, thủy lợi, quy hoạch sử dụng và cải tạo đất... Tất cả những dự án có quy mô lớn hoặc nhỏ đều phải trả lời những câu hỏi giống nhau:

- Tác động dài hạn của dự án ấy đối với môi trường đất và nước của khu vực ra sao?

- Giải pháp nào để giảm thiểu thiệt hại, cực đại hóa lợi ích và đảm bảo khai thác bền vững?

Mô phỏng các quá trình tự nhiên và tác động của con người đối với môi trường ven biển luôn là một nhu cầu cấp bách của thực tế. Công việc này là hoàn toàn không dễ dàng, tuy nhiên các nghiên cứu theo các hướng tiếp cận khác nhau vẫn đang được phát triển liên tục để phục vụ cho việc hoàn thiện kiến thức của con người về môi trường. Tuy nhiên xét riêng trong lĩnh vực nghiên cứu về môi trường đất phèn, đặc biệt là đất phèn ven biển, thì những tiến bộ về mặt mô hình hóa cho đến nay vẫn còn chưa tương xứng với tầm quan trọng của loại đất đặc biệt này. Hướng phát triển có triển vọng nhất về mặt phần mềm là xây dựng một module chuyên biệt cho đất phèn trên nền MODFLOW.

Môi trường đất - nước cần phải được nghiên cứu như một thể thống nhất và tương tác động, trong đó bất kỳ một thay đổi nào diễn ra trong môi trường đất đều có thể gây ra những tác động nhất định đối với môi trường nước và ngược lại. Tương tác thủy lực giữa nước mặt và nước ngầm có lẽ đóng vai trò cực kỳ quan trọng, nếu không nói là quyết định trong toàn bộ chuỗi quá trình phức tạp này. Do đó việc tiếp tục nghiên cứu để hoàn thiện việc mô phỏng các quá trình tương tác này là công việc cần phải được tiếp tục tiến hành trong thời gian tới.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bosch H.v.d., Phi H. L., Michaelsen J. and Nugroho K. *Evaluation of water management strategies for sustainable landuse of acid sulphate soils in coastal low lands in the tropics*. Report 157. DLO-Staring Centrum, Wageningen. The Netherlands. (1998).
2. Bronswijk, J, Groenenberg, J. *A simulation model for acid sulphate soils: I: Basic principles*. In Selected papers of the Ho Chi Minh City Symposium of Acid Sulphate Soils. ILRI Publication 53. IRRI, Wageningen. (1997).
3. Cook, F.J., Rassam, D.W., Carlin, G.D. and Gardner, E.A. *Acid flow from acid sulphate soils: Measurements and modelling of flow to drains*. In Proceedings 3rd Environmental Conference, 26-25 May 2000, Brisbane, Australia. 195-199. (2000b).
4. Daud W. Rassam and Freeman J. *Numerical Simulations of Water Flow and Solute Transport Applied to Acid Sulfate Soils*. J. Irrig. and Drain. Engrg., Volume 128, Issue 2, pp. 107-115 (March/April 2002).
5. Foster, M.R. *Key concepts in model selection: Performance and generalizability*. Journal of Mathematical Psychology **44**(1):205-231. (2000).
6. Hongzhi, A. *Fast stepwise procedures of selection of variables by using AIC and BIC criteria*. Acta Mathematicae Applicatae Sinica **5**:60-67. (1989).
7. Iba, H. *Complexity-based fitness evaluation*. In T. Back, D.B. Fogel and Z. Michalewicz (eds.) *Evolutionary Computation 2*, 15-24. Bristol, UK: IOP Publishing, Ltd. (2000).
8. Phi H. L. *A generalised form of Richards' equation for shrinkable soils*. (draft in preparation). (2005).
9. Rassam, D.W. and Cook, F.J. *Modelling the transport of  $SO_4^{2-}$  ions in acid sulphate soils*. In MODSIM 2001, International Congress on Modelling and Simulation, The Australian Nation. (2001).
10. Rassam, D.W. and Cook, F.J. *Numerical simulations of water flow and solute transport applied to acid sulfate soils*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE, **128** (2) (2002).

10. Rassam, D.W. and Cook, F.J. *Modelling the transport of  $SO_4^{2-}$  ions in acid sulphate soils*. In MODSIM 2001, International Congress on Modelling and Simulation, The Australian National University, 10-13 December, 2001, Vol 1, 499-504. (2001).
11. Sammut, J., Callinan, R.B. and Fraser, G.C. *An overview of the ecological impacts of acid sulfate soils in Australia*. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National conference of Acid Sulfate Soils. pp 140-145. Robert J. Smith and Associates and ASSMAC, Australia. (1996).
12. Sammut, J., Callinan, R.B. and Dove, M.. *A brief review of the aquatic impacts of acid sulfate soils*. In Acid Sulfate Soils and their Management in Coastal Queensland: Forum and Technical Papers. (Eds. K.M. Hey, C.R. Ahern, V.J. Eldershaw, J.M. Anorov and K.M. Watling), Brisbane 21-23 April, 1999. pp 4-1 - 4-10. (Department of Natural Resources, Indooroopilly, Queensland, Australia. (1999) .
13. Tegnander C., *Models for Ground Water Flow: A Numerical Comparison Between Richards' Model and the Fractional Flow Model*. Transport in Porous Media **43**: 213–224, 2001. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 213.(2001).
14. White, I, Melville, MD, Lin, C, Sammut, J, van Oploo, P and Wilson, BP (1995). *Fixing problems caused by acid sulfate estuarine soils*. In Ecosystem Management: The Legacy of Science. Ed. C Copeland, Halstead Press, Sydney.