



Ramon de Attayde Barros de Souza

**Avaliação da presença do herbicida paraquat no
escoamento superficial em bacia hidrográfica de Bom
Jardim-RJ, através de modelagem e simulação em SIG
(Sistema de Informação Geográfica)**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais e de
Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientador: Roberto José de Carvalho
Co-orientadora: Rachel Bardy Prado
Co-orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego

Rio de Janeiro
Agosto de 2009



Ramon de Attayde Barros de Souza

Avaliação da presença do herbicida paraquat no escoamento superficial em bacia hidrográfica de Bom Jardim – RJ, através de modelagem e simulação em SIG (Sistema de Informação Geográfica)

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Roberto José de Carvalho

Orientador e Presidente
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Dr. Luiz Felipe Guanaes Rego

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Dra. Rachel Bardy Prado

Empr. Brasileira de Pesq. Agropecuária – Embrapa

Dra. Raquel Andrade Donagemma

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Dr. Luiz Carlos Bertolino

Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

Dra. Elba dos Santos de Oliveira

Instituto Nacional de Tecnologia - INT

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de agosto de 2009.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da Universidade, do autor e do orientador.

Ramon de Attayde Barros de Souza

Graduou-se em Matemática na UERJ em 1998. Em 2000, iniciou seus estudos de nivelamento para mestrado em Matemática Pura e Aplicada na UFF. Obteve em 2003, o título de mestre em Ciência dos Materiais e Engenharia Metalúrgica pela PUC-Rio. Iniciou seu doutorado na PUC-Rio em 2004, com pesquisa na área de modelagem e simulação de processos físicos, químicos e ambientais com SIG (Sistema de Informação Geográfica). Desenvolveu sua tese sob co-orientação da EMBRAPA SOLOS e do NIMA/PUC-Rio. É professor de matemática das redes pública e privada de ensino do Rio de Janeiro, professor substituto do CAP - UFRJ. Atua também nas áreas da matemática aplicada e engenharias.

Ficha Catalográfica

Souza, Ramon de Attayde Barros de

Avaliação da presença do herbicida paraquat no escoamento superficial em bacia hidrográfica de Bom Jardim-RJ, através de modelagem e simulação em SIG (Sistema de informação geográfica) / Ramon de Attayde Barros de Souza ; orientador: Roberto José de Carvalho ; co-orientadora: Rachel Bardy Prado; co-orientador: Luiz Felipe Guanaes Rego. – 2009.

135 f. il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Escoamento superficial. 3. Herbicidas. 4. Paraquat. 5. Modelagem. 6. Simulação. 7. Bacia hidrográfica. 8. Declividade. 9. SIG. I. Carvalho, Roberto José de. II. Prado, Rachel Bardy. III. Rego, Luiz Felipe Guanaes. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. V. Título.

CDD: 620.11

Para minha esposa Luana Paula e meus avós pelo apoio incondicional.

Agradecimentos

Ao meu orientador Roberto José de Carvalho da PUC-Rio pelo estímulo, empenho e total colaboração na realização desta tese.

Aos meus co-orientadores Rachel Bardy Prado da EMBRAPA SOLOS e Luiz Felipe Guanaes Rego do NIMA/PUC-Rio pelo auxílio, dedicação e orientação para o desenvolvimento desta tese.

À PUC-Rio e ao projeto Pronex-PUC-Rio, pelos auxílios e suporte concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao pesquisador Heitor Luiz da Costa Coutinho da EMBRAPA SOLOS, pelo vínculo da tese com a EMBRAPA SOLOS e ao projeto PRONEX – PUC-Rio pelos dados fornecidos.

Ao pesquisador Alexandre Ortega Gonçalves da EMBRAPA SOLOS, pelo auxílio em muitos dados fundamentais para a pesquisa.

À professora substituta da UFRJ Raquel Andrade Donagemma, pelas análises realizadas nas amostras de escoamento superficial.

À minha esposa Luana Paula Cerqueira Monteiro, pela paciência, amparo e compreensão em todos os momentos.

Aos meus avós pela total ajuda e incentivo em todos os momentos de minha pesquisa.

Ao Alexandre (neto do proprietário do sítio, que continha as parcelas Wischmeier) pelo suporte nas coletas das amostras de escoamento superficial;

Ao meu tio Pedro pelos constantes incentivos em minha pesquisa.

Resumo

Souza, Ramon de Attayde Barros de. **Avaliação da presença do herbicida paraquat no escoamento superficial em bacia hidrográfica de Bom Jardim – RJ, através de modelagem e simulação em SIG (Sistema de Informação Geográfica)**. Rio de Janeiro, 2009. 135 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese propõe avaliar a presença do herbicida paraquat no escoamento superficial, ocorrido na microbacia do Córrego Pito Aceso, localizada em Bom Jardim-RJ, utilizando inicialmente uma etapa de modelagem e, posteriormente, uma etapa de simulação com SIG (Sistema de Informação Geográfica). A etapa da modelagem foi desenvolvida especificamente para cinco parcelas padrão Wischmeier, considerando suas respectivas culturas, manejo, tipo de solo e os seguintes parâmetros de influência no escoamento: interceptação do pesticida pela cultura, sorção do pesticida no solo. O fator de declividade da bacia hidrográfica foi considerado apenas para a etapa de simulação com SIG. Os resultados foram representados através de índices e concentrações de paraquat presente no escoamento e, posteriormente validados, através de dados reais medidos na área de estudo, e analisados pela EMBRAPA SOLOS. Uma vez validados, os resultados das parcelas foram georeferenciados em mapas poligonais e matriciais, através do software Arcgis 9.2, dando início, assim, a etapa de simulação dos resultados para toda a bacia hidrográfica. Pretende-se, ao final, avaliar o grau de influencia de alguns parâmetros considerados, tais como: interceptação do paraquat pela cultura e declividade da bacia hidrográfica. Os resultados das concentrações do paraquat (presente no escoamento) poderão em trabalhos futuros, serem comparados com os padrões mínimos aceitáveis para segurança ambiental, objetivando estabelecer limites de uso do paraquat em bacias hidrografias similares. Espera-se também, o desenvolvimento e aplicação da mesma modelagem utilizada nessa tese, para outros tipos de pesticidas aplicados e em diferentes bacias hidrográficas.

Palavras-Chave

Escoamento Superficial; Herbicidas; Paraquat; Modelagem; Simulação; SIG; microbacia; declividades.

Abstract

Souza, Ramon de Attayde Barros de; Carvalho, Roberto José de Carvalho (Advisor). **Evaluation of presence of hebicide paraquat in runoff in watershed Bom Jardim with modelling and simulation with SIG (Geographical Information System)**. Rio de Janeiro, 2009. 135 p. Doctoral Thesis - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study proposes to evaluate the presence of the herbicide paraquat in runoff water in a catchment in the municipality of Bom Jardim – RJ, using two steps: modelling and simulation with GIS (Geographical Information System). The step of modelling was developed specifically for five standardised Wischmeier scenarios, considering the respective crops, management, soil type and the following parameters: culture interception and soil of the sorption. The slope was considered only for the simulation steps of the GIS. The results were represented as rates paraquat concentrations in runoff and afterwards validated with real data measured in the study area and analysed by EMBRAPA SOLOS. After validation, the scenario results was georeferenced as raster images using the Arcgis Software 9.2, beginning the result simulation step for the watershed. The aim is also to evaluate the influence of some parameters: paraquat interception by the crop and slop of the catchmente. The results of paraquat concentrations in the runoff can, in the future , be compared with accepted standards for environmental safety, defining thereshobes limits of paraquat use in similar watersheds. We also expect the development and application of the same modeling approach used in this study for other types of pesticides and in different watersheds.

KeyWords

Runnof; herbicides; paraquat; modeling; simulation; GIS; watershed; slope.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivo Geral	21
1.2. Objetivos Específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Histórico dos Pesticidas	22
2.2. Impacto dos Pesticidas à Saúde Humana	23
2.3. Impacto dos Pesticidas no Meio Ambiente	23
2.4. Classificação dos Pesticidas	24
2.4.1. Classificação dos Pesticidas por Periculosidade	24
2.4.2. Classificação dos Pesticidas por Finalidade de Uso	25
2.4.3. Classificação dos Pesticidas por Estrutura Química	26
2.5. Inseticidas	26
2.6. Fungicidas	27
2.7. Herbicidas	27
2.8. Herbicida Paraquat	29
2.8.1. Paraquat em Contato com o Solo	30
2.8.2. Riscos Toxicológicos Causados por Paraquat	30
2.8.3. Propriedades Físico-Químicas do Paraquat	31
2.9. Propriedades Físico-Químicas de um Pesticida	31
2.9.1. Coeficiente de Partição K_{ow}	32
2.9.2. Solubilidade Aquosa	32

2.9.3. Pressão de Vapor	32
2.9.4. Constante de Equilíbrio de Ionização	33
2.9.5. Constante da Lei de Henry (H)	35
2.9.6. Interceptação Foliar	35
2.10. Destino de um Pesticida no Solo	37
2.10.1. Sorção de um Pesticida no Solo	38
2.10.1.1. Matéria Orgânica no Processo de Sorção	38
2.10.2. Absorção de um Pesticida pelas Plantas	39
2.10.3. Degradação de um Pesticida no Solo	40
2.10.4. Lixiviação de um Pesticida	41
2.10.5. Volatilização de um Pesticida	42
2.10.6. Escoamento Superficial	42
2.10.6.1. A Influência do Solo no Escoamento Superficial	44
2.11. Valores Máximos Permitidos de Pesticidas em Água	45
2.12. Sistema de Informação Geográfica (SIG)	46
2.12.1. Representação Vetorial e Matricial	47
2.12.1.1. Representação Vetorial	47
2.12.1.2. Representação Matricial	49
2.12.2. Software Arcgis 9.2	50
2.13. Modelagem Matemática	50
2.13.1. Modelo Matemático	51
2.13.1.1. Modelo Matemático de Simulação	51
2.13.1.2. Classificação dos Modelos Matemáticos	52
2.13.2. Modelagem Ambiental	52
2.13.2.1. Modelagem Ambiental em Ambiente SIG	53

2.13.2.1.1. Modelagem para Escoamento Superficial de Pesticidas	55
2.13.3. Modelo Utilizado (Tese)	56
3. MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1. Localização da Área de Estudo	57
3.2. Uso e Cobertura do Solo na Microbacia de Estudo	60
3.3. Localização das Parcelas Experimentais na Microbacia	61
3.3.1. Parcelas Experimentais	63
3.4. Estrutura da Metodologia	65
3.4.1. Coleta e Análise dos Dados de Precipitação	65
3.4.2. Coleta e Análise dos Dados do Escoamento Superficial	66
3.4.3. Aplicação do Paraquat	68
3.4.4. Coleta das Amostras de Água (Escoamento Superficial)	69
3.4.5. Análise das Amostras Coletadas	70
3.4.6. Modelagem (Modelo Utilizado)	71
3.4.6.1. Fatores e Parâmetros Necessários para o Modelo	71
3.4.6.1.1. Índice de Escoamento Superficial	72
3.4.6.1.2. Fator de Degradação	73
3.4.6.1.3. Fator de Sorção	74
3.4.6.1.4. Fator de Interceptação	75
3.4.6.2. Dados Necessários ao Modelo (Relativos ao Paraquat)	76
3.4.6.3. Dados Ambientais Necessários ao Modelo	76
3.4.6.3.1. Dados Relativos ao Carbono Orgânico	77
3.4.6.3.2. Dados Relativos à Densidade do Solo	78
3.4.6.4. Resumo dos Dados Ambientais Necessários ao Modelo	78
3.4.7. Simulação em SIG	80

3.4.8. Classificação do Mapa de Predominância de Paraquat no Escoamento Superficial em Função dos VMP	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Escoamento Superficial Relativo às Parcelas Experimentais	82
4.1.1. Escoamento Superficial Relativo à Parcela de Cultura Café	82
4.1.2. Escoamento Superficial Relativo à Parcela de Cultura Banana	83
4.1.3. Escoamento Superficial Relativo à Parcela de Cultura Pousio	85
4.1.4. Escoamento Superficial Relativo à Parcela de Cultura Mata	86
4.1.5. Escoamento Superficial Relativo à Parcela de Cultura Anual	88
4.1.6. Perfil de Precipitação (Escoamento Superficial)	90
4.1.7. Fluxo Máximo de Escoamento Superficial	91
4.1.8. Duração da Chuva Intensa (Escoamento Superficial)	92
4.2. Inteceptação Foliar do Paraquat	93
4.3. Representação dos Dados de Entrada e dos Resultados	94
4.4. Resultados da Modelagem	94
4.4.1. Avaliação dos Resultados da Modelagem	96
4.5. Simulação em Ambiente SIG	96
4.5.1. Modelo Digital de Elevação da Microbacia	97
4.5.2. Mapa de Estrutura Matricial das Parcelas Experimentais	99
4.5.2.1. Reclassificação dos Mapas das Parcelas Experimentais em Função da Declividade	100
4.5.2.1.1. Mapa Reclassificado da Parcela Café	100
4.5.2.1.2. Mapa Reclassificado da Parcela Banana	101
4.5.2.1.3. Mapa Reclassificado da Parcela Pousio	102
4.5.2.1.4. Mapa Reclassificado da Parcela Mata	103

4.5.2.1.5. Mapa Reclassificado da Parcela Anual	104
4.5.2.2. Declividade Predominante das Parcelas Experimentais	105
4.5.2.2.1. Declividade Predominante da Parcela Café	105
4.5.2.2.2. Declividade Predominante da Parcela Banana	106
4.5.2.2.3. Declividade Predominante da Parcela Pousio	107
4.5.2.2.4. Declividade Predominante da Parcela Mata	108
4.5.2.2.5. Declividade Predominante da Parcela Anual	109
4.5.2.2.6. Valores dos Pixels Relativos às Parcelas Experimentais (Utilizados Como Referência)	110
4.5.3. Resultados da Simulação	110
4.5.3.1. Simulação Relativa às Culturas Anuais	111
4.5.3.2. Simulação Relativa às Culturas Perenes	115
4.5.3.3. Simulação Relativa à Mata Inicial	118
4.5.3.4. Mapa de Predominância de Paraquat no Escoamento Superficial para todas as Culturas	121
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	124
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127
7. ANEXOS	134
7.1. Curva Analítica Relativa às Amostras de Escoamento Superficial	134
7.2. Tabela Com Resultados das Análises das Amostras de Escoamento Superficial	135

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Classificação dos pesticidas em função da periculosidade.	24
Tabela 2 - Classificação dos pesticidas em função da finalidade de uso.	25
Tabela 3 - Classificação dos pesticidas em função de sua estrutura química e finalidade de uso.	26
Tabela 4 - Propriedades físico-químicas relativas ao paraquat.	31
Tabela 5 - Faixa de pH do solo – Ácido fraco.	33
Tabela 6 - Faixa de pH do solo – Base fraca.	34
Tabela 7 - Tendência de volatilidade de um composto químico.	35
Tabela 8 - Índices de interceptação foliar por culturas.	36
Tabela 9 - Especificidades dos fatores influentes no processo de lixiviação.	41
Tabela 10 - Valores Máximos Permitidos (VMP) para pesticidas em água.	45
Tabela 11 - Taxa de aplicação do paraquat.	68
Tabela 12 - Identificação das amostras relativas às parcelas Wischmeier.	69
Tabela 13 - Resumo dos resultados obtidos.	70
Tabela 14 - Parâmetros necessários para o modelo proposto.	72
Tabela 15 - Parâmetros relativos ao paraquat.	76
Tabela 16 - Índices de carbono orgânico de cada parcela Wischmeier.	77
Tabela 17 - Densidade do solo relativa às parcelas Wischmeier.	78
Tabela 18 - Dados relativos aos parâmetros de cada parcela Wischmeier.	79
Tabela 19 - Resumo da proporção de classificação.	51
Tabela 20 - Dados de precipitação e escoamento superficial -parcela café.	82
Tabela 21 - Dados de precipitação e escoamento superficial -parcela banana.	84

Tabela 22 - Dados de precipitação e escoamento superficial -parcela pousio.	85
Tabela 23 - Dados de precipitação e escoamento superficial -parcela mata.	87
Tabela 24 - Dados de precipitação e escoamento superficial -parcela anual.	88
Tabela 25 - Planilha de cálculos do modelo.	94
Tabela 26 - Resultados obtidos por meio da modelagem e pela análise laboratorial das amostras.	96
Tabela 27 - Resumo dos pesos finais utilizados.	110
Tabela 28 - Quantidade de pixels distribuídos relativos à figura 29.	121

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura molecular do Paraquat.	29
Figura 2 - Processos associados no destino do pesticida no solo.	37
Figura 3 - Estrutura vetorial poligonal.	47
Figura 4 - Estrutura vetorial isolinha.	48
Figura 5 - Estrutura vetorial TIN.	48
Figura 6 - Estrutura matricial.	49
Figura 7 - Estrutura poligonal e matricial.	49
Figura 8 - Estrutura de funcionamento de um modelo de simulação.	51
Figura 9 - Localização da microbacia do córrego Pito Aceso.	58
Figura 10 - Imagem e mapa da microbacia do córrego Pito Aceso.	59
Figura 11 - Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia do córrego Pito Aceso.	60
Figura 12 - Localização das parcelas experimentais na microbacia do córrego Pito Aceso.	61
Figura 13 - Localização ampliada das parcelas experimentais na microbacia do córrego Pito Aceso.	62
Figura 14 - Local de instalação das parcelas experimentais.	63
Figura 15 - Estrutura das parcelas Wischmeier.	63
Figura 16 - Caixas d'água de armazenamento de escoamento superficial.	64
Figura 17 - Estação hidrossedimentológica.	66
Figura 18 - Curvas de nível da microbacia de estudo.	97
Figura 19 - Modelo Digital de Elevação relativo à microbacia de estudo.	98
Figura 20 - Mapa de estrutura matricial relativo à cabeceira da microbacia de estudo.	99
Figura 21 - Mapa de estrutura matricial relativo à parcela café.	100
Figura 22 - Mapa de estrutura matricial relativo à parcela banana.	101
Figura 23 - Mapa de estrutura matricial relativo à parcela pousio.	102

Figura 24 - Mapa de estrutura matricial relativo à parcela mata.	103
Figura 25 - Mapa de estrutura matricial relativo à parcela anual.	104
Figura 26 - Mapa de avaliação da presença de paraquat no escoamento superficial em culturas anuais.	113
Figura 27 - Mapa de avaliação da presença de paraquat no escoamento superficial em culturas perenes.	116
Figura 28 - Mapa de avaliação da presença de paraquat no escoamento superficial em regiões cobertas por mata inicial.	119
Figura 29 - Mapa de predominância de paraquat no escoamento superficial para todas as culturas.	122

Lista de Ilustrações

Ilustração 1 - Estrutura molecular do paraquat	29
Ilustração 2 - Resumo da metodologia	65
Ilustração 3 - Perfil de escoamento superficial relativo à parcela experimental de cultura café	83
Ilustração 4 - Perfil de escoamento superficial relativo à parcela experimental de cultura banana	84
Ilustração 5 - Perfil de escoamento superficial relativo à parcela experimental de cultura pousio	86
Ilustração 6 - Perfil de escoamento superficial relativo à parcela experimental de cultura mata	87
Ilustração 7 - Perfil de escoamento superficial relativo à parcela experimental de cultura anual	89
Ilustração 8 - Perfil de precipitação de cada parcela Wischmeier	90
Ilustração 9 - Fluxo máximo de escoamento superficial de cada parcela Wischmeier	91
Ilustração 10 - Duração da chuva intensa de cada parcela Wischmeier	92
Ilustração 11 - Interceptação foliar para cada parcela Wischmeier	93
Ilustração 12 - Resultados da modelagem	95
Ilustração 13 - Processamento relativo à parcela café	105
Ilustração 14 - Resultado do processamento relativo à parcela café	106
Ilustração 15 - Processamento relativo à parcela banana	106
Ilustração 16 - Resultado do processamento relativo à parcela banana	107
Ilustração 17 - Processamento relativo à parcela pousio	107
Ilustração 18 - Resultado do processamento relativo à parcela pousio	108
Ilustração 19 - Pprocessamento relativo à parcela mata	108
Ilustração 20 - Resultado do processamento relativo à parcela mata	109

Ilustração 21- Processamento relativo à parcela anual	109
Ilustração 22 - Resultado do processamento relativo à parcela anual	110
Ilustração 23 - Cálculos necessários para obtenção dos resultados relativos às culturas anuais	111
Ilustração 24 - Gráficos auxiliares ao mapa da figura 26	114
Ilustração 25 - Cálculos necessários para obtenção dos resultados relativos às culturas perenes	115
Ilustração 26 - Gráficos auxiliares ao mapa da figura 27	117
Ilustração 27 - Cálculos necessários para obtenção dos resultados relativos às regiões cobertas por mata inicial	118
Ilustração 28 - Mapa de avaliação da presença de paraquat no escoamento superficial em culturas perenes	120