



ALTERAÇÕES DO FLUXO HÍDRICO E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DO FERRO E
NA ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA

Rodrigo Sondermann Muniz

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadores: Maria Claudia Barbosa

Wenceslau Geraldes Teixeira

Rio de Janeiro
Outubro de 2017

ALTERAÇÕES DO FLUXO HÍDRICO E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DO FERRO E NA ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA

Rodrigo Sondermann Muniz

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof.^a Maria Claudia Barbosa, D.Sc.

Pesq. Wenceslau Geraldes Teixeira, Ph.D.

Prof. Martinus Theodorus van Genuchten, Ph.D.

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Nelson Ferreira Fernandes, Ph.D.

Prof. Jarbas Honório de Miranda, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2017

Muniz, Rodrigo Sondermann

Alterações do fluxo hídrico e seus efeitos na dinâmica do ferro e na estrutura de um Latossolo Amarelo na Amazônia / Rodrigo Sondermann Muniz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVIII, 157 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maria Claudia Barbosa

Wenceslau Geraldes Teixeira

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 95-111.

1. Amazônia. 2. Latossolo Amarelo. 3. Estrutura do solo. 4. Fluxo de água. 5. Modelagem numérica. 6. HYDRUS. I. Barbosa, Maria Claudia *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título

Dedico ao meu pai José Muniz Neto
(In memoriam)

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora Prof^a. Maria Claudia Barbosa pelo apoio, incentivo e a oportunidade de ingressar no doutorado..

Ao meu orientador e amigo, pesquisador Wenceslau Geraldes Teixeira pela dedicação, apoio, incentivo nesse estudo.

Ao Prof. Martinus Theodorus Van Genuchten pelo apoio e ajuda com relação à parte de modelagem da tese.

À Marborges Agroindústria S.A, especialmente ao gerente Antônio Pina, pelo apoio incondicional ao projeto e por permitir acesso à área e disponibilização de dados.

À Embrapa Amazônia Ocidental e Oriental pelo apoio e por ter realizado as análises físicas dos solos estudados.

A todos os funcionários da Embrapa Solos, especialmente aos pesquisadores Silvio Tavares, Donnagema e Sebastião, aos técnicos Natali, Marcelo e Viviane e as estagiárias Júlia Cardozo e Júlia Nogueira, pela ajuda no acesso aos laboratórios e na utilização dos equipamentos.

À minha amiga Shirlei de Oliveira, pelo apoio e ajuda desde que entramos juntos no doutorado.

Às colegas Marcia Batalha, Camila Coelho e Rafael França, pelo apoio durante o doutorado.

À Maria Solange Sondermann Muniz (Mãe), Elaine de Paula Santos (Namorada) e especialmente ao meu pai José Muniz Neto (*In memoriam*), pois ele foi o meu maior incentivador em dar prosseguimento aos meus estudos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ALTERAÇÕES DO FLUXO HÍDRICO E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DO FERRO E
NA ESTRUTURA DE UM LATOSSOLO AMARELO NA AMAZÔNIA

Rodrigo Sondermann Muniz

Outubro/2017

Orientador: Maria Claudia Barbosa - Wenceslau Geraldes Teixeira

Programa: Engenharia Civil

A substituição da floresta primária por atividades agrícolas, no Latossolo Amarelo, textura média, solo predominante no nordeste paraense, pode ocasionar alterações na estrutura do solo e nos fluxos hídricos. A hipótese em estudo foi que devido ao desmatamento e utilização agrícola desses solos ocorre uma redução da evapotranspiração e redução dos macroporos que facilitam a infiltração e transmissão da água. Com isso, o solo torna-se mais úmido e permanece nessa situação por longos períodos, com reduzido potencial de oxirredução, acarretando alterações no solo em especial nos minerais de ferro responsáveis pela cimentação e agregação desses Latossolos Amarelos. O estudo teve como foco a caracterização físico-química e mineralógica de um Latossolo Amarelo, em Moju-PA. Foi realizado o monitoramento dos teores de ferro total, pH e condutividade elétrica na solução do solo no campo; realizados ensaios em laboratório sobre os efeitos do alagamento na estabilidade dos agregados, foram ajustados parâmetros físicos para a modelagem da dinâmica do potencial da água no solo em três sistemas de uso da terra: área sem vegetação, cultivo de palma de óleo (*Elaeis guinnensis Jacq.*) e floresta primária. Os resultados evidenciaram que o Latossolo Amarelo, sob cobertura de palma de óleo ou sem cobertura permaneceu por longos períodos próximos a saturação. Foram também detectadas, como consequência do alagamento, a redução do ferro que migra para a solução do solo, e provoca uma desestabilização da estrutura do solo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CHANGES IN WATER FLOW AND ITS EFFECTS ON IRON DYNAMICS AND
THE STRUCTURE OF A XANTHIC FERRALSOL IN THE AMAZON

Rodrigo Sondermann Muniz

October/2017

Advisor: Maria Claudia Barbosa - Wenceslau Geraldes Teixeira

Department: Civil Engineering

The substitution of primary forest for agricultural activities in the xanthic ferralsols, medium texture. The predominant soil class in the northeast of the State of Para – Brazil, may cause changes in the soil structure and water flows. The hypothesis was that due to deforestation and its subsequent agricultural use occur reduction in evapotranspiration rates, and reduction the infiltration and transmission of water into the soil. As a result, soil becomes more humid and close to saturation, and remains in this situation for long periods, reduced oxi-redox potential leading to changes in soil characteristics in special in the iron minerals responsible for the cementation and aggregation of these xanthic ferralsols. The study focused on the physical-chemical and mineralogical characterization of a xanthic ferralsol, in the city of Mojú – PA. In filed, total iron, pH and electrical conductivity in the soil solution was monitored. In the laboratory was carried out experiments to verify the effect of flooding in the aggregate stability. It was adjusted soil physical parameters to modeling of soil water potential dynamics in three systems of use of the land: area without vegetation, oil palm plantation (*Elaeis guineensis Jacq.*) and primary forest. The results evidenced that xanthic ferralsols, under oil palm plantation or without vegetation cover remained for long periods near saturation. The reduction of the iron that migrates to the soil solution was also detected as consequence of flooding, and it provokes a destabilization of the soil structure.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
NOMENCLATURA.....	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 A região de estudo – nordeste paraense.....	2
1.3 Objetivos da pesquisa	3
1.3.1 Índícios.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
CAPÍTULO 2 ESTUDOS DOS PARÂMETROS FÍSICOS EM UM LATOSSOLO AMAZONICO SOB DIFERENTES USOS.....	8
2.1 Resumo	8
2.2 Fundamentos e estado da arte	8
2.2.1 Ciclo hidrológico em sistemas naturais com ênfase na Amazônia	8
2.3 Material e métodos.....	17
2.4 Resultados e discussão.....	18
2.5 Conclusões	21
CAPÍTULO 3 VARIAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO NO CAMPO (pH, CE, Teores de Ferro).....	22
3.1 Resumo	22
3.2 Fundamentos e estado da arte	22
3.2.1 Caracterização e Ocorrência dos Latossolos.....	22
3.2.2 Ferro.....	27
3.2.3 Solução do solo	30
3.3 Material e métodos.....	33
3.4 Resultados e discussão.....	36
3.5 Conclusões	42
CAPITULO 4 EFEITO DO ALAGAMENTO DO SOLO NO POTENCIAL REDOX, pH, CE, TEORES DE FERRO E A ESTABILIDADE DE AGREGADOS.....	43
4.1 Resumo	43
4.2 Fundamentos e estado da arte	43
4.2.1 Formação da estrutura dos Latossolos	43
4.2.2 Reação redox em solos alagados	47

4.3 Material e Métodos	54
4.4 Resultados e Discussão	56
4.4 Conclusões	62
CAPITULO 5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO HÍDRICO DO SOLO EM TRÊS SISTEMAS DE USOS.....	63
5.1 Resumo	63
5.2 Fundamentos e estado da arte	63
5.2.1 Estimativa das taxas de evapotranspiração	69
5.2.2 Programa de simulação de fluxos hídricos no solo (Hydrus 1D).....	70
5.3 Material e métodos.....	71
5.4 Resultados e discussão.....	77
5.4.1 Modelagem da dinâmica do potencial de água no solo nos diferentes sistemas de uso da terra.....	81
5.5 Conclusões	93
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXO I	112
ANEXO II	116
ANEXO III.....	122
ANEXO IV.....	131
ANEXO V	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Perfis de solos sob vegetação de floresta e sob cultivo de palma de óleo na região nordeste do Pará. Detalhe de agregado de solo com a presença de mosqueados de redução de ferro.....	5
Figura 1.2 - Componentes principais para formação da tese.....	7
Figura 2.1 - Modelo de balanço hídrico simplificado na Amazônia	9
Figura 2.2 - Balanço hídrico do solo na área de estudo.....	10
Figura 2.3 - Sistema de uso (cobertura) do solo estudado.....	17
Figura 3.1 - Representação esquemática da distribuição de solos no Brasil..	26
Figura 3.2 - Biogeoquímica do ferro no solo..	29
Figura 3.3 - Diagrama Eh-pH para par redox $Fe^{3+} - Fe^{2+}$	31
Figura 3.4 - Área sob cultivo de palma de óleo do Grupo Marborges S.A.	34
Figura 3.5 – Extratores de cápsula porosa para amostragem da solução do solo.....	35
Figura 3.6- Precipitação ao longo do período de monitoramento.	39
Figura 3.7- Predição da evolução do pH da solução do solo em diferentes profundidades.	40
Figura 3.8 - Representação BoxPlot dos dados de ferro da solução do solo em diferentes profundidades.	41
Figura 3.9 - Representação dados preditivos de ferro da solução do solo em função do tempo (Período).	42
Figura 4.1 - Arranjos de partículas de quartzo, caulinita (A), óxidos de Fe (B) e matéria orgânica (C) em agregado de Latossolo caulinítico.	45
Figuras 4.2 - Diferentes vias de óxidos de ferro e interações com bactérias.....	48
Figura 4.3 - Atividade do Fe^{+2} em solução de equilíbrio com diferentes óxidos na fase sólida, em função do potencial redox.....	53
Figura 4.4 - Difractogramas de Raios-X da fração argila da amostra total (A), amostra total e amostras submetidas aos tratamentos (B) e amostra desferrificada e saturada com potássio aquecida a 550 °C (C).....	57
Figura 4.5 - Representação dos dados de condutividade elétrica (A), pH (B) e potencial de oxirredução (C) em função de 95 dias de alagamento em agregados de um Latossolo Amarelo, textura média (Moju – Pará).....	59
Figura 4.6-Teores de ferro total na solução (A) e a estabilidade de agregados (B) por um período de 95 dias de um Latossolo Amarelo submerso em condições de laboratório..	61

Figura 5.1 - Esquema do modelo conceitual unidimensional utilizado para calcular o fluxo para a zona vadosa e recarga.	65
Figura 5.2 - Esquema da função de resposta ao estresse hídrico da planta,	67
Figura 5.3 - Localização da área de estudo no município de Moju (PA).	71
Figura 5.4 - Fluxograma de Modelagem pelo programa HYDRUS-1D.	72
Figura 5.5 - Tensiômetros de mercúrio na área de estudo em Moju (PA).	73
Figura 5.6 - Distribuição das camadas e pontos de observação inseridos no gráfico editor do Hydrus-1D.	76
Figura 5.7- Curvas de retenção de água no solo nas áreas sem vegetação, com palma de óleo e floresta primária nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-100 cm.	80
Figura 5.8– Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 10 cm.	83
Figura 5.9 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 10 cm na área sem vegetação.....	83
Figura 5.10 - Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 30 cm.	84
Figura 5.11- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 30 cm na área sem vegetação.....	84
Figura 5.12 - Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 60 cm.	85
Figura 5.13- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 60 cm na área sem vegetação.....	86
Figura 5.14 - Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju na profundidade de 10 cm.	87
Figura 5.15- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 10 cm na área de palma de óleo.....	87
Figura 5.16 - Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju na profundidade de 30 cm.	88
Figura 5.17 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 30 cm na área de palma de óleo.....	89
Figura 5.18 - Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju na profundidade de 60 cm.	90
Figura 5.19 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 60 cm na área de palma de óleo.....	90

Figura I.1 - Tratamento “drenagem vertical” na área de estudo.....	112
Figura I.2 - Tratamento “seca dendê” na área de estudo.....	113
Figura I.3 - Declividade da área de estudo e localização dos tratamentos	115
Figura II.1 - Correlação entre os dados de evapotranspiração calculados pelo programa Hydrus e por meio de algoritmo implementado em planilha Excel.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Textura e grau de floculação dos diferentes perfis das diferentes coberturas do solo.	19
Tabela 2.2 - Densidade e porosidade do solo em diferentes coberturas.....	20
Tabela 3.1 - Distribuição por área dos solos no Brasil.....	25
Tabela 3.2 - Características químicas do solo nos diferentes tratamentos.	37
Tabela 3.3 - Concentrações de silício, alumínio, ferro, titânio e manganês totais e ferro extraídos por oxalato ácido de amônio e ditionito-citrato de sódio nos diferentes tratamentos.	38
Tabela 4.1 - Sequência do processo redutivo.	52
Tabela 4.2 - Propriedades químicas e granulométricas na camada de 0-20 cm de Latossolo Amarelo, distrófico, textura média em Moju (PA).	56
Tabela 4.3 - Teores de carbono total nos agregados de um Latossolo Amarelo, distrófico, textura média em Moju (PA).	60
Tabela 5.1 - Propriedades físico-hídricas do solo, parâmetros da equação unimodal de van Genuchten, obtidas de forma inversa e direta para a área do plantio de palma de óleo e sem cobertura vegetal e direta (floresta primária).	78
Tabela 5.2 - Desempenho dos resultados originada de forma inversa e direta através do modelo unimodal de van Genuchten-Mualem para a área sem cobertura vegetal e cultivo de palma de óleo.	82
Tabela I.1 - Manejo utilizados no tratamento durante o experimento.....	113
Tabela I.2 - Análise de variância dos dados de condutividade elétrica da solução do solo.	114
Tabela I.3 - Análise de variância dos dados de pH da solução do solo.....	114
Tabela I.4 - Análise de variância dos dados de ferro da solução do solo.....	114
Tabela III.1- Dados de potencial mátrico em 3 pontos sem vegetação na área de estudo no período de 373 dias.....	122
Tabela IV.1 - Dados de potencial mátrico em 3 pontos com palma de óleo na área de estudo no período de 373 dias.	131

NOMENCLATURA

Letras Latinas

D_i	média aritmética dos limites inferior e superior da classe
d_r	inverso da distância relativa Terra-Sol [rad]
e_s	pressão de saturação do vapor média diária [kPa]
e_a	pressão atual de vapor média diária [kPa]
e_o	pressão de saturação do vapor d'água
E	máxima infiltração ou potencial de evaporação para as condições atmosféricas locais [$L \cdot T^{-1}$]
E_0	Evaporação
ET_o	evapotranspiração de referência [$mm \text{ dia}^{-1}$]
G	fluxo de calor no solo [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$];
G_{SC}	constante solar [$0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$]
h	carga de pressão hidráulica [L];
h_a	mínima pressão permitida sob a superfície do solo [L];
h	elevação da coluna de mercúrio [cm]
h_s	máxima pressão permitida sob a superfície do solo [L];
h_1	distância entre o nível do mercúrio do reservatório e a superfície do solo [cm]
h_2	distância da superfície do solo até a cápsula porosa [cm]
I	máxima taxa de potencial de infiltração
J_w	fluxo volumétrico [LT^{-1}]
K	condutividade hidráulica não saturada [LT^{-1}]
l	parâmetro de conectividade de poros ou inclinação
L_R	profundidade da zona radicular [L]
m	parâmetro de ajuste da curva ou coeficiente
n	parâmetro de ajuste da curva ou coeficiente
m_i	massa da classe i
m_t	massa total
n_c	número de classes de tamanho de agregados
P_{ef}	precipitação efetiva da área de floresta primária [$mm \text{ dia}^{-1}$]
P_{ep}	precipitação efetiva da área de palma de óleo [$mm \text{ dia}^{-1}$]
P_t	precipitação total [$mm \text{ dia}^{-1}$]
R_a	radiação solar extraterrestre [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
R_n	saldo de radiação [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
R_{nc}	balanço de radiação de ondas curtas [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
R_{nl}	balanço de radiação de ondas longas [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
R_s	radiação solar global [$MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]
R_{so}	radiação solar para dias de sol claro
S	é o termo fonte/sumidouro [$L^3 L^{-3} T^{-1}$],
S_p	a taxa de captação de água potencial [T^{-1}]
Se	coeficiente de saturação efetiva
T	tempo [T]
T_{max}	temperatura máxima absoluta do ar durante o dia [K]
T_{min}	temperatura mínima absoluta do ar durante o dia [K]
t	temperatura média diária do ar [$^{\circ}C$];
T_{as}	tensão de água no solo [cm de água]
T_p	taxa potencial de transpiração [LT^{-1}]
u_2	velocidade média diária do vento a 2 m de altura [$m \text{ s}^{-1}$]
z	altitude do local [m]
Z	coordenada espacial [L]

Letras Gregas

α	parâmetro de ajuste da curva ou coeficiente
α	albedo, que para as condições estabelecidas pela metodologia, tem um valor de 0,23
θ	conteúdo volumétrico de água [L^3L^{-3}]
θ_r	conteúdo volumétrico de água residual do solo [$L^3.L^{-3}$]
θ_s	conteúdo volumétrico de água na saturação do solo [$L^3 L^3$]
γ	constante psicrométrica [$kPa\ ^\circ C^{-1}$].
σ	constante de Stefan Boltzmann, cujo valor é $5,6697 \times 10^{-8} WJ\ m^{-2}\ K^{-4}$.
ω_s	ângulo horário de pôr-do-sol [rad]
φ	latitude local [rad]
δ	declinação solar [rad]
Λ	declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura [$kPa\ ^\circ C^{-1}$]
ε	razão entre as massas moleculares da água e do ar seco [0,622]

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A bacia amazônica representa a maior extensão de florestas tropicais da Terra, exercendo significativa influência no clima local e global, devido aos fluxos de energia e água na atmosfera. Presume-se que a alteração dos ciclos da água, energia solar, carbono e nutrientes, resultantes das mudanças no uso da terra na Amazônia, possam provocar consequências climáticas e ambientais em escalas local, regional e global (SENNA *et al.*, 2014). A substituição da floresta por culturas agrícolas causa inúmeras mudanças nos atributos do solo que, em muitos casos, conduzem a perdas da produtividade (MARQUES *et al.*, 2004; MARQUES *et al.*, 2012).

Alguns trabalhos realizados na Amazônia com relação ao efeito do fluxo hídrico devido à mudança de vegetação, como os trabalhos de HODNETT *et al.* (1995) e VON RANDOW *et al.* (2004), observaram uma diminuição da evapotranspiração e um aumento no armazenamento de água nas camadas subsuperficiais do solo sob pastagem em comparação à floresta. Segundo o modelo hidrológico em Latossolos na Amazônia sob floresta, desenvolvido por BELK *et al.* (2007), a diminuição da evapotranspiração devido à mudança de vegetação proporciona períodos prolongados de estiagem naquele local. Em outras palavras, a substituição da floresta primária por cultura agrícola ocasiona períodos maiores sem precipitação na área.

Nas últimas décadas houve um aumento da ocupação de terras na Amazônia para atividades de cultivo, sendo de particular interesse para a proposta dessa pesquisa o plantio de palma de óleo (*Elaeis guineensis Jacq*), conhecida com o dendezeiro. Devido à procura de fontes renováveis de energia no mundo, aumentou-se o plantio de plantas oleaginosas como a palma de óleo para produção de biodiesel e outros derivados de óleos vegetais. Segundo RAMALHO FILHO *et al.*(2010), a bacia amazônica é um local de boa aptidão para o desenvolvimento da palma de óleo, pois apresenta as seguintes características: (I) precipitação média anual superior a 1.800 mm, com precipitação mensal superior a 100 mm e distribuída uniformemente ao longo do ano; (II) insolação igual ou superior a 1600 horas/ano; (III) pequenas variações de temperatura e onde a média anual situa-se entre 24 e 28°C, sem ocorrência de temperaturas mínimas abaixo de 16°C por períodos prolongados; (IV) umidade relativa do ar média mensal entre 75 e 90%.

Pesquisas recentes da EMBRAPA em áreas da Amazônia (TEIXEIRA *et al.*, 2014a e 2014b) mostraram indícios de alteração do padrão de fluxo e da composição química do solo pela introdução do plantio de palma de óleo, com efeitos sobre a estrutura do solo e, conseqüentemente, com potencial de impacto nas suas propriedades físico-hídricas e fluxos de circulação da água. Essas pesquisas motivaram o presente estudo teórico e experimental dos efeitos dessa atividade agrícola sobre os Latossolos Amarelos, em substituição à cobertura original de floresta.

Este estudo faz parte de uma parceria do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Embrapa Solos (RJ), Embrapa Amazônia Ocidental e Oriental, e com a empresa Marborges Agroindústria, S.A.

O tema é de grande relevância para o país, tanto por contribuir para a análise dos impactos de substituição da floresta primária por atividades agrícolas, quanto para subsidiar a melhoria dessas atividades nas áreas destinadas a esse fim na Amazônia.

Do ponto de vista acadêmico, a compreensão do fluxo hídrico em regiões de solos tropicais na condição natural e alterada, assim como do próprio processo de alteração da estrutura de solos tropicais, quando em condições estagnadas, representa contribuições científicas relevantes.

1.2 A região de estudo – nordeste paraense

Na região nordeste do Pará, onde há palmares (plantios de palma de óleo) com mais de 30 anos de idade, observaram-se mudanças nas características físicas do solo em comparação ao solo sob cobertura da floresta primária. Verificou-se aumento da água empoçada na superfície do solo e a identificação de mosqueados de redução nas camadas subsuperficiais do solo. Os mosqueados de redução (Figura 1.1) são indicadores dos processos de oxidação-redução do ferro (SANTOS *et al.*, 2013a), típicos de solos que apresentam períodos de alagamento com déficit de oxigênio. Os Latossolos Amarelos da região Amazônica apresentam-se originalmente com boa estruturação e com elevada capacidade de infiltração e transmissão de água, sem mosqueados de redução. A estruturação dessa classe de solos é devida não somente a processos de agregação e cimentação provocados pela matéria orgânica, mas principalmente nos horizontes subsuperficiais devido à agregação causada pelos óxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio (LEHMANN *et al.*, 2001). Neste trabalho, foi levantada a hipótese que a degradação da estrutura, compactação, leva à redução da

infiltração e condutância da solução e solo, criando um ambiente redutor que deteriora a estrutura do solo. Esse fenômeno verifica-se não somente em plantios de palma de óleo como também em pastagens (HODNETT *et al.*, 1995).

1.3 Objetivos da pesquisa

Com base nos dados obtidos por TEIXEIRA *et al.* (2014b) para um palmar no estado do Pará, foram definidas algumas hipóteses sobre as alterações do comportamento hídrico e de seus efeitos sobre a composição e estruturados Latossolos Amarelos do nordeste do estado do Pará. O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da mudança de uso da terra no processo de infiltração no solo, e o possível efeito da água estagnada na deterioração da estrutura do solo. Apresenta-se a seguir o problema que deu origem às pesquisas mencionadas, os indícios de alteração observados no campo, as hipóteses que foram formuladas e os objetivos específicos da proposta.

Foram formuladas basicamente duas hipóteses de efeitos da mudança da cobertura vegetal sobre o solo local.

a) 1ª Hipótese

Devido ao desmatamento das terras e sua posterior utilização agrícola ocorre uma redução da evapotranspiração, e também o menor aprofundamento das raízes que reduz os macroporos que facilitam a infiltração e transmissão da água em profundidade na condição original. Com isso, o solo torna-se mais úmido e próximo da saturação, e permanece nessa situação por longo período, com a criação de condições de redução do potencial de oxirredução do solo. Essa é a hipótese relacionada à alteração do comportamento hídrico do solo.

b) 2ª Hipótese

A estrutura do solo é desestabilizada pelo alagamento e submersão, que cria um ambiente redutor (hipóxia e anóxia). O processo de desestruturação ocorre devido à diminuição do potencial de oxirredução do solo, acarretando alterações na composição iônica da solução do solo (processos de redução dos íons Fe^{3+} , NO_3^+ e Mn_3^+) em especial a redução de íons de ferro responsáveis pela cimentação e agregação desse solo.

1.3.1 Indícios

As evidências que foram encontradas no campo que levaram à formulação das hipóteses acima são:

- a ocorrência dos alagamentos em áreas onde não eram observados anteriormente sob cobertura vegetal nativa;
- através do monitoramento do potencial mátrico do solo, observou-se que as camadas próximas da superfície do solo sem cobertura vegetal ou com palma de óleo tendem a ficar próximas à saturação por um longo período;
- presença de mosqueado de redução de ferro no perfil da área de uso agrícola (Figura 1.1);
- medições realizadas nos palmares mostraram que o solo da área pode chegar a valores de potencial redox (Eh) inferiores a -200 mV;
- presença de íons de ferro reduzido na superfície do solo no período de chuvas intensas, medida pelo uso de indicadores (alfa-alfa dipiridil), a presença de ferro reduzido na superfície do solo não foi verificada em áreas de floresta nativa na região estudada.

1.3.2 Objetivos específicos

- caracterização física do solo nas áreas sob diferentes usos da terra (sem vegetação, palma de óleo e floresta primária);
- caracterização química e mineralógica nas áreas sob diferentes manejos (palma de óleo, sem vegetação, adubação e calagem, seca dendê e drenagem vertical);
- análise de pH, da condutividade elétrica e de ferro da solução do solo sob diferentes manejos (palma de óleo, sem vegetação, adubação e calagem, seca dendê e drenagem vertical);
- modelagem do potencial de água no solo em três sistemas de uso da terra utilizando dados de tensiômetros e parâmetros hidráulicos obtidos através da curva de retenção de água no solo.

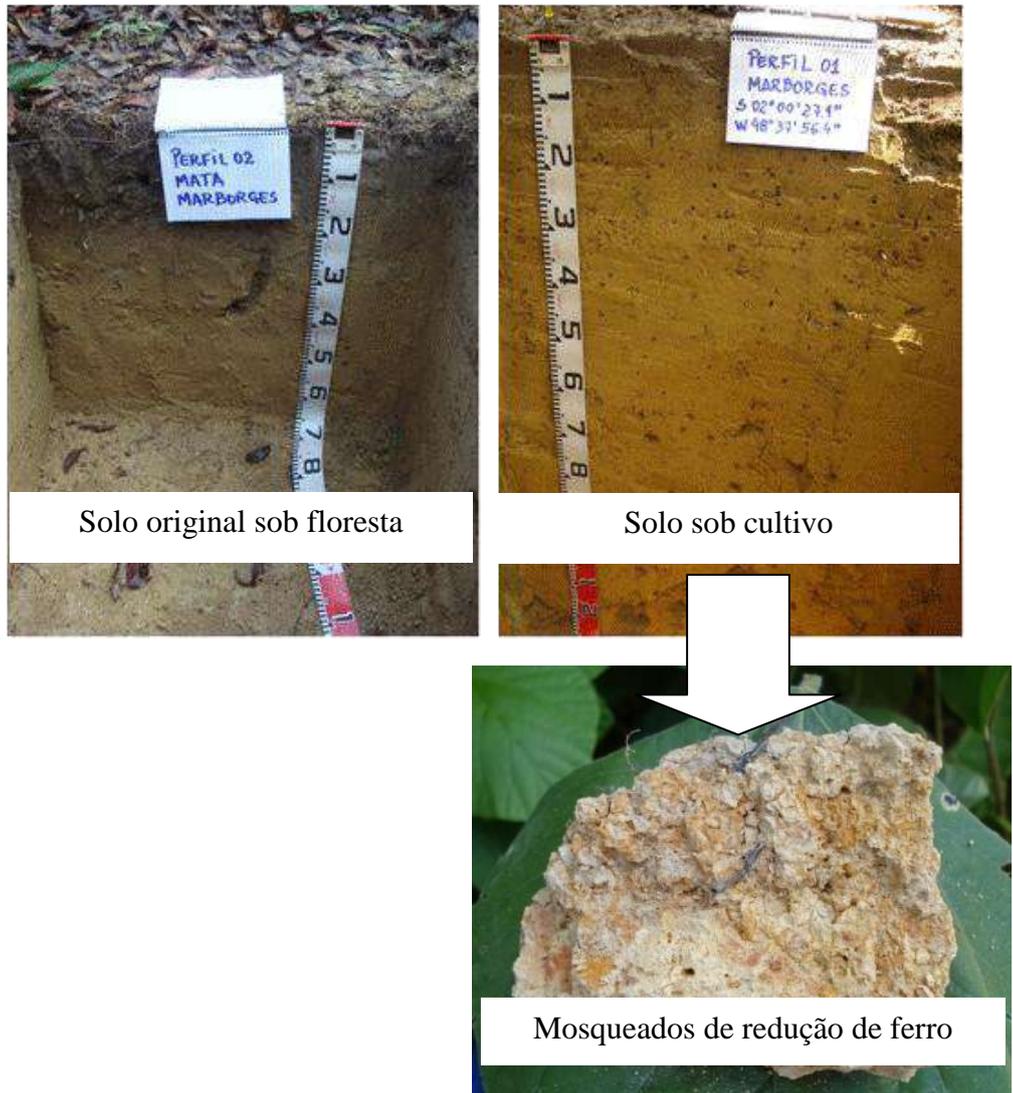


Figura 1.1- Perfis de solos sob vegetação de floresta e sob cultivo de palma de óleo na região nordeste do Pará. Detalhe de agregado de solo com a presença de mosqueados de redução de ferro. (Foto: Wenceslau Teixeira).

1.4 Estrutura da tese

A tese foi dividida em cinco capítulos principais (Figura 1.2): caracterização física do Latossolo Amarelo sob diferentes usos da terra; caracterização química e evolução do pH, condutividade elétrica e ferro na solução do solo em diferentes manejos; efeito do alagamento do solo no potencial redox, pH, CE, teores de ferro e na estabilidade de agregados; modelagem teórica do comportamento hídrico do solo em três sistemas de uso da terra (sem cobertura vegetal, palma de óleo e floresta primária); conclusões e recomendações finais. Essa estrutura tem o objetivo de comprovar a degradação estrutural e a alteração do fluxo de água em um Latossolo Amarelo do nordeste do Pará.

O capítulo dois concentra-se nos efeitos dos diferentes usos do solo nos parâmetros físicos. Este capítulo é subdividido em cinco seções principais: resumo, fundamentos e estado da arte, material e métodos, resultados dos parâmetros físicos do solo e conclusões.

O capítulo três concentra-se na investigação no campo sobre a evolução do ferro na solução do solo em diferentes manejos. Este capítulo é subdividido em cinco seções principais: resumo, fundamentos e estado da arte, material e métodos, resultados do teor de ferro da solução de solo de campo e conclusões.

O capítulo quatro concentra-se na investigação em laboratório da correlação entre o alagamento, a redução do potencial redox no solo, as mudanças do teor de ferro na solução do solo e seus efeitos sobre a estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, sobre a estrutura do solo. Este capítulo é subdividido em cinco seções principais: resumo, fundamentos e estado da arte, material e métodos, resultados do ensaio de alagamento e conclusões.

O capítulo cinco concentra-se na modelagem matemática do comportamento hídrico do solo em três sistemas de usos (sem cobertura vegetal, palmar, vegetação de floresta primária), usando parâmetros do solo e das condições de fronteira, diferenciados por sistema de uso da terra. Este capítulo é subdividido em cinco seções principais: resumo, fundamentos e estado da arte, material e métodos, resultados da modelagem e conclusões.

O capítulo seis são as conclusões e recomendações finais, correlacionando os resultados e conclusões obtidos nos capítulos da tese com o objetivo de comprovar a degradação estrutural e a alteração do fluxo de água em um Latossolo Amarelo do nordeste do Pará.

A tese é complementada por uma seção de referências e cinco apêndices contendo tabelas, cálculos utilizados na tese, incluindo os resultados adicionais da modelagem.

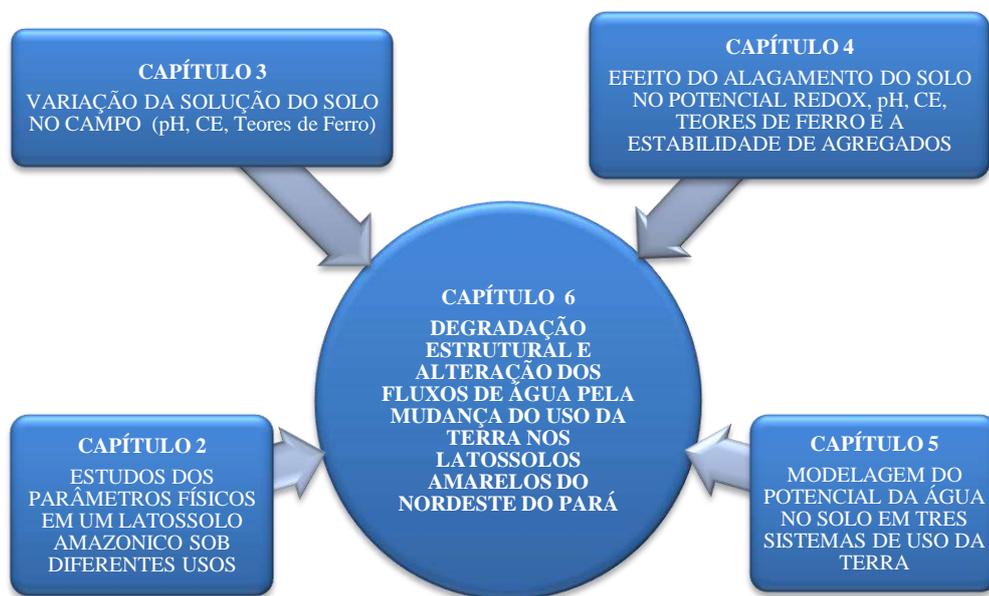


Figura 1.2 - Componentes principais para formação da tese.

CAPÍTULO 2 ESTUDOS DOS PARÂMETROS FÍSICOS EM UM LATOSSOLO AMAZONICO SOB DIFERENTES USOS

2.1 Resumo

A estrutura é boa indicadora da qualidade do solo devido a sua sensibilidade às práticas de manejo. Na medida em que se intensifica o uso agrícola, os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal e ao movimento de água no solo que ficam mais nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural.

Este trabalho teve como objetivo estudar os parâmetros físicos em um Latossolo Amazônico sob cultivo de palma de óleo, sem vegetação e floresta primária. Para a determinação das características físicas nas três situações distintas, foram retiradas amostras com estrutura indeformadas nas camadas 0-10cm, 10-20cm, 20-40cm e 40-70cm de profundidade. Os parâmetros físicos analisados foram: granulometria; grau de floculação; densidade do solo; porosidade total; macroporosidade; e microporosidade. Os resultados mostraram que a área com palma de óleo e a área sem vegetação não apresentaram diferenças significativas entre si entre os parâmetros físicos estudados. O uso agrícola do solo provocou a compactação com o aumento da densidade, diminuição da macroporosidade e, conseqüentemente, diminuição da drenabilidade da água no solo.

2.2 Fundamentos e estado da arte

2.2.1 Ciclo hidrológico em sistemas naturais com ênfase na Amazônia

Segundo KUNERT *et al.* (2017), a floresta amazônica é um elemento integrante do sistema climático global, em parte devido à alta taxa de reciclagem de chuvas através da transpiração das árvores. Em seu local de estudo, localizado na Amazônia central, foi observado que em 2.303mm de precipitação anual (100%), 1.360 mm (59%) foram devolvidos à atmosfera por evaporação e transpiração. O escoamento (*runoff*) representou 41% da perda líquida do ecossistema.

O ciclo hidrológico tem diversos componentes que são apresentados na Figura 2.1 para a condição da floresta amazônica (BELK *et al.*, 2007). Em áreas com florestas de grande porte, a evapotranspiração e a interceptação da precipitação são componentes de grande importância no balanço hídrico (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Os processos que ocorrem em subsuperfície e na zona radicular ganham relevância quando comparados com a condição de floresta de grande porte representada na Figura 2.1. São eles: a infiltração na zona radicular: a absorção de água pelas raízes, a percolação em profundidade, que recarregará o lençol freático: o escoamento subsuperficial transversalmente: a ascensão capilar de um lençol freático raso para a zona de raiz: além dos processos de evaporação, transpiração e escoamento superficial. Nos modelos de manejo agrônômico, considera-se irrigação, além da precipitação, como fonte de água e não se considera a interceptação da precipitação na condição vegetal. (ALLEN *et al.*, 1998).

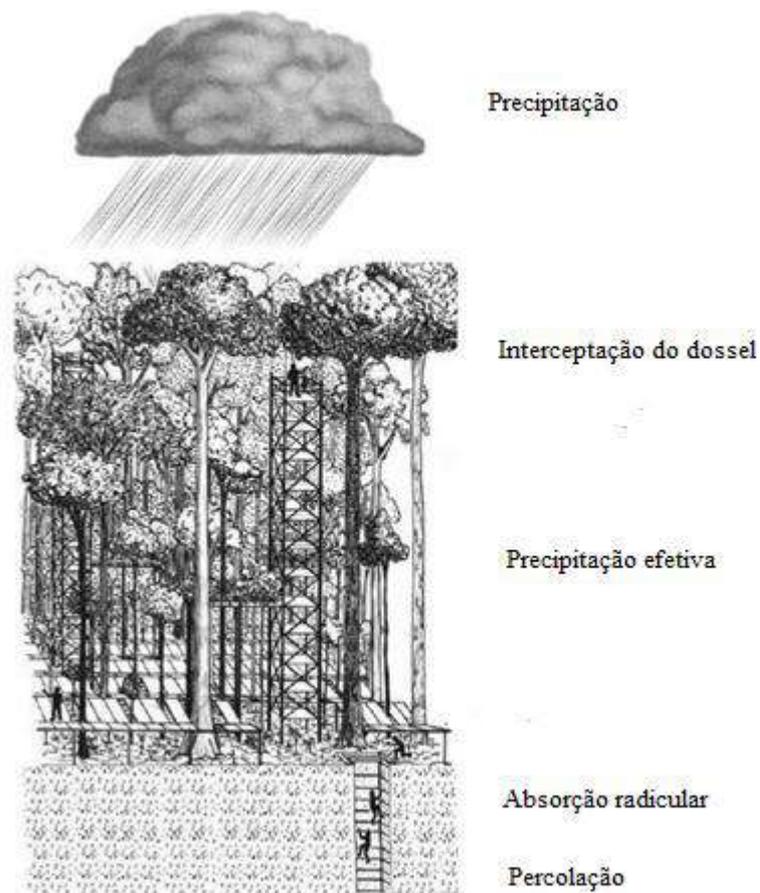


Figura 2.1- Modelo de balanço hídrico simplificado na Amazônia (adaptado de BELK *et al.*, 2007).

Por outro lado, a escala da Figura 2.2 permite assinalar a influência de outros componentes sobre o fluxo, como a configuração das raízes (profundidade, densidade e arquitetura), e as características do próprio solo, como a textura e a estrutura, particularmente a estrutura de poros do solo. O modelo hídrico considera a interceptação da precipitação pelo dossel das plantas e a precipitação que chega ao solo após esta interceptação (precipitação efetiva). O escoamento lateral de subsuperfície tem uma relação direta com o relevo (declividade) e com a estratigrafia, mas esses aspectos não são relevantes para a área de estudo, que é plana. Então, não serão abordados no presente trabalho.

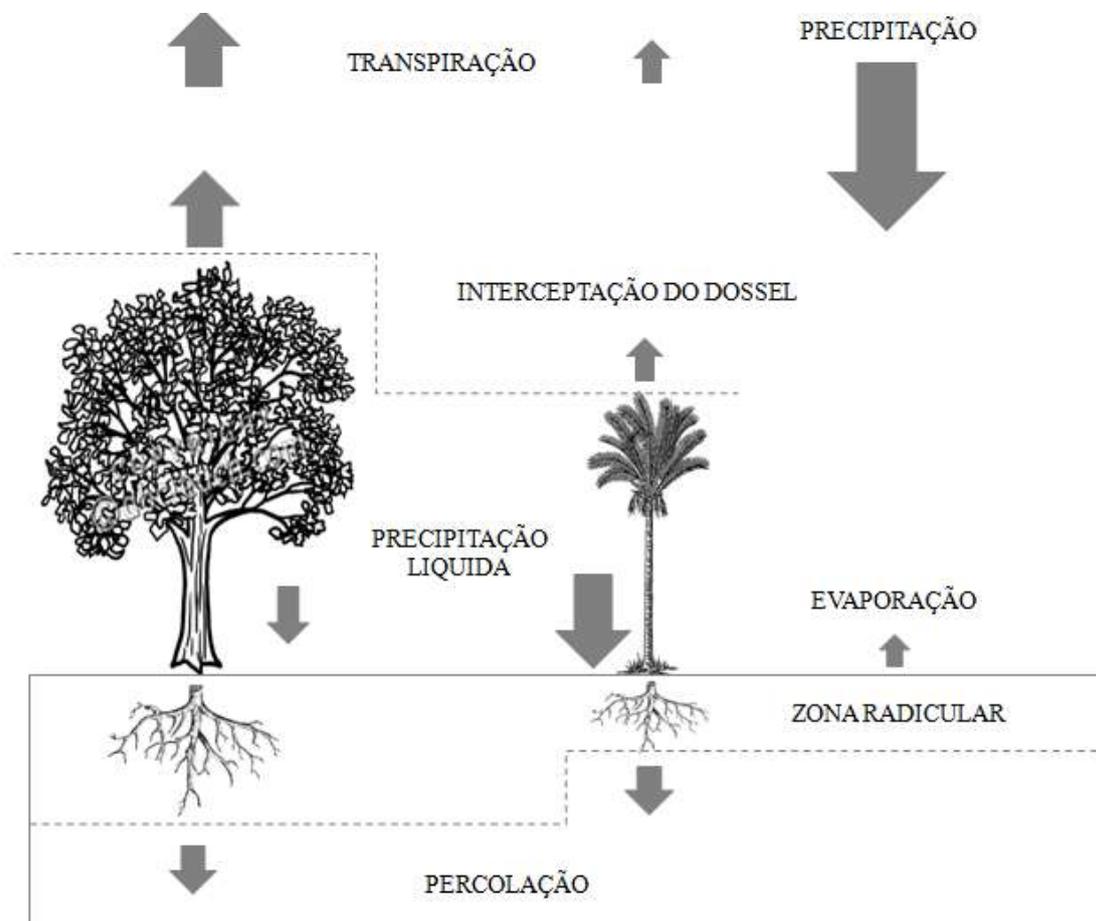


Figura 2.2- Balanço hídrico do solo na área de estudo.

O fluxo de entrada de água e sua distribuição no solo dependem, dentre outros fatores, da quantidade, da continuidade e do tamanho de poros. Além das raízes, pequenos animais também podem ser responsáveis pela criação de macroporos que facilitarão o fluxo preferencial no processo de percolação.

Discute-se, a seguir, os componentes individuais considerados de maior relevância para o estudo, e cuja alteração pela mudança do tipo de cobertura vegetal, de floresta primária para plantio de palma de óleo, pode resultar em mudanças significativas no balanço hídrico no local.

a) Interceptação

Florestas densas favorecem a interceptação de parte da água de chuva, e a evaporação é diretamente a partir da superfície das folhas. A parcela excedente é, então, encaminhada ao solo pelos fluxos de atravessamento (direto) e de tronco (indireto).

OLIVEIRA *et al.* (2008), por exemplo, estudaram o efeito da interceptação na floresta amazônica. Um segundo estágio de interceptação ocorre na camada de serrapilheira acumulada sobre a superfície do solo (SILVEIRA, 2004). SILVEIRA (2004) e VALLEJO (1982) observaram que a capacidade de armazenamento de água da serrapilheira é muito alta (em torno de 100 % do peso seco) e por isso amortece a entrada de água no solo.

KUNERT *et al.* (2015) realizaram um trabalho em uma área da Amazônia central comparando a interceptação do dossel da floresta com a sua substituição pela cobertura vegetal de duas espécies vegetais da família palmácea (cupuaçu - *Theobroma grandiflorum* e açaí - *Euterpe oleracea*), para uma precipitação anual de 2.007mm. Os autores observaram que a floresta provocou uma interceptação do dossel de 550mm, enquanto a área de palmáceas gerou 110mm, representando uma redução de 80% na interceptação de chuva no dossel.

b) Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo total de transferência de água na forma de vapor a partir de superfície vegetada para a atmosfera. Esse processo é dinâmico, sendo representado pelas perdas de água ocorridas, sob a forma de vapor, através da superfície do solo (evaporação) e da superfície das folhas (transpiração), com variações locais e espaciais provocadas pelas condições de solo, clima e características da cobertura vegetal (BEZERRA *et al.*, 2010).

A evaporação é o processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor de água (vaporização) e removida a partir da superfície de evaporação (remoção de vapor). A água evapora a partir de uma variedade de superfícies, como, por exemplo, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação molhada.

Como descrito por ALLEN *et al.* (1998), energia é necessária para alterar o estado das moléculas de água de líquido para vapor, e essa energia é provida pela radiação solar direta e, em menor grau, pela temperatura do ambiente. A força motriz para remover o vapor de água a partir da superfície de evaporação gerada por essa energia é a diferença entre a pressão do vapor de água na superfície de evaporação e na atmosfera circundante. Conforme a evaporação prossegue, o ar circundante é gradualmente saturado, e o processo torna-se mais lento e para quando o ar se torna saturado na atmosfera (umidade relativa do ar de 100%). A substituição do ar saturado por ar mais seco depende muito da velocidade do vento. Assim, a radiação solar, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento são parâmetros climatológicos determinantes no processo de evaporação.

A evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente e não há uma maneira fácil de distinguir entre os dois processos. Além da disponibilidade de água no solo, a evaporação de um terreno descoberto é determinada principalmente pela fração da radiação solar que atinge a sua superfície. Na presença de cobertura vegetal, a parcela de transpiração é crescente com a altura das espécies, a densidade foliar (área foliar por unidade de superfície do solo), e também varia com a cor do dossel da vegetação (determina o albedo da espécie).

As florestas tropicais permanentes na região central e oeste da Amazônia mantêm elevadas taxas de evapotranspiração mesmo durante a estação seca, uma vez que árvores de enraizamento profundo podem extrair água do solo de profundidades maiores do que um metro. (ARAGÃO, 2012; NEPSTAD *et al.*, 1994; KUNERT *et al.*, 2017).

Segundo BELK *et al.* (2007), a evapotranspiração média da floresta Amazônica está em torno de 3,7mm dia⁻¹, sendo que na Amazônia oriental, a evapotranspiração está em torno de 4,15mm dia⁻¹, enquanto na Amazônia central, a evapotranspiração está em torno de 4,1mm dia⁻¹, e, em lugares próximos a Manaus, a evapotranspiração varia de 3,59 a 3,65mm dia⁻¹. Segundo os mesmos autores e RAMALHO FILHO *et al.* (2010), a evapotranspiração da floresta Amazônica é menor no período chuvoso comparada com o período menos chuvoso. Isso se deve ao maior gradiente de pressão de vapor de água

entre o ar e a superfície da folha no período mais seco (umidade relativa do ar mais baixa).

A evapotranspiração potencial da palma de óleo é estimada para condições em que não haja limitação de fornecimento de água pelo solo, assumindo um valor médio de $3,3\text{mm dia}^{-1}$ para palmares de um a três anos e valores médios de 5 a 6mm dia^{-1} para palmares na fase adulta. Esse valor pode se elevar até 10mm dia^{-1} em condições extremas (CORLEY e TINKER, 2003). Esses não são valores medidos na região de interesse, onde a umidade relativa do ar é muito alta, e os valores reais podem ser inferiores aos mencionados acima.

Segundo RAMALHO FILHO *et al.* (2010), além das condicionantes atmosféricas, a evapotranspiração da palma de óleo é condicionada pela disponibilidade de água no solo. Com a redução da umidade, a água retida no solo em poros de menor diâmetro equivalente tem aumentada sua energia potencial, conseqüentemente diminuindo a capacidade de extração de água até a parada de absorção pelas raízes.

KUNERT *et al.* (2015) realizaram um trabalho em uma área na Amazônia central comparando a evapotranspiração da floresta e com substituição da cobertura vegetal de duas espécies de palmeiras (cupuaçu e açaí). Para uma precipitação anual de 2.007mm, registra-se evapotranspiração de 1.487mm na área de floresta e de 898 mm na área de palmeiras, representando uma redução de 40% na evapotranspiração. Segundo o mesmo autor, houve um aumento significativo da evaporação do solo de 0% na floresta para até 15% da precipitação anual (301mm) na área com palmeiras. Esse fato deve-se à diminuição da área foliar com a substituição da floresta por cultivo de palmeiras.

Os mecanismos de interceptação e evapotranspiração são substancialmente reduzidos na troca da floresta equatorial amazônica pela cobertura vegetal do plantio de palma de óleo.

c) Papel das raízes

As raízes das espécies vegetais têm dois papéis importantes no ciclo hidrológico: (I) a sua influência sobre o fluxo por macroporos através do solo; (II) a absorção de água do solo.

A influência das raízes sobre o fluxo depende da arquitetura do sistema radicular, da profundidade de alcance e da densidade de raízes no local. Em florestas,

sobretudo tropicais, as raízes de árvores vizinhas misturam-se formando um emaranhado e devem ser consideradas como uma unidade funcional própria e não como sistemas individuais de raízes (KRAMER e BOYER, 1995; SILVEIRA, 2004). A extensão do sistema radicular depende da espécie e é condicionada pelo clima e pelo teor de nutrientes no solo. Em solos pouco aerados ou com baixo conteúdo de nutrientes as raízes tendem a se concentrar próximo à superfície. SILVEIRA (2004) relata trabalhos de diferentes autores que encontraram a maior concentração de raízes entre 60 e 150cm de profundidade no caso de árvores de clima temperado (KRAMER e BOYER, 1995), enquanto observações na Floresta da Tijuca (NUNES *et al.*, 1992; FREIRE ALLEMÃO *et al.*, 1997) indicaram a presença de raízes até 400cm de profundidade, porém com a maior concentração na mesma faixa de 60 a 150cm. Sob o aspecto de alcance da influência sobre o fluxo de água no solo, STERNBERG *et al.* (2002) reportam que árvores de pequeno porte na Amazônia conseguem extrair água a 10m de distância.

As raízes das palmas de óleos são do tipo fasciculado e se desenvolvem a partir do bulbo, órgão de 80cm de diâmetro e profundidade de 40 a 50cm, localizado na base do estipe. De toda a superfície do bulbo, partem raízes primárias que, em sua maior parte, estendem-se horizontalmente, paralelas à superfície do solo, predominando nos primeiros 50cm. As raízes não possuem pelos absorventes, e a função de absorção de água e nutrientes é realizada pelas raízes terciárias e quarentenárias (RAMALHO FILHO *et al.*, 2010), onde estão localizadas em grande parte entre 20 a 50cm de profundidade (CORLEY e TINKER, 2003).

d) Influência da textura e estrutura no fluxo de água no solo

A estrutura é boa indicadora da qualidade do solo devido a sua sensibilidade às práticas de manejo (STEFANOSKI *et al.*, 2013). De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas como estrutura, permeabilidade, densidade e porosidade adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA *et al.*, 2000).

Na medida em que se intensifica, o uso agrícola os atributos físico-hídricos do solo sofrem alterações, geralmente adversas ao crescimento vegetal e ao movimento de água no solo (HAMBLIN, 1985; PRADO e CENTURION, 2001), que ficam mais

nítidas quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (SANTOS *et al.*, 2011a).

A estrutura de poros do solo é determinante para o fluxo de água e vapor. A textura influencia o tamanho dos poros e, conseqüentemente, a permeabilidade e a drenabilidade. A estrutura dos poros não é condicionada apenas pela distribuição de tamanhos de partículas, sendo fortemente influenciada pela composição mineralógica do solo e sua relação com a composição química da solução do solo, e por ações externas, tanto físicas (compactação) quanto físico-químicas (reações entre os sólidos e a solução) e biológicas (penetração de raízes, abertura de canais por animais).

Estruturas com distribuição bimodal de poros como os solos tropicais acarretam fluxos diferenciados pela matriz (microporos) e pelos macroporos ou outros vazios estruturais que criam canais de fluxo preferencial. Um exemplo é o estudo experimental na floresta da Tijuca relatado por SILVEIRA *et al.* (2005), em que a utilização de um traçador (cloreto) mostrou a chegada da água em profundidade (2,0m) em dois tempos distintos. Conseqüentemente, alterações na estrutura do solo podem ter um impacto significativo sobre o seu comportamento hídrico. O diâmetro dos poros influenciará as condições de energia em que a água fica retida. Em algumas situações de manejo de solos tropicais, o espaço poroso total do solo não se altera, mas ocorrem mudanças na distribuição de frequência de poros por tamanho. O aumento da quantidade de poros de pequenos diâmetros (microporos) causa alterações drásticas nos fluxos de água e de ar no solo (TEIXEIRA, 2001).

e) Estudos sobre fluxo de água na Amazônia

O trabalho de D'ALMEIDA *et al.* (2006) propôs um modelo de balanço hídrico para avaliar o impacto do desmatamento na hidrologia da Amazônia em diferentes escalas e sob diferentes graus de heterogeneidade espacial. Os resultados mostraram que os efeitos hidrológicos do desmatamento na Amazônia são sujeitos a efeitos de escala e de heterogeneidade intrínseca e dependências inter-relacionadas, sendo que o desmatamento em escala local causa aumento do escoamento superficial juntamente com uma diminuição da evapotranspiração, sem mudanças significativas na precipitação.

Segundo o trabalho de JUÁREZ *et al.* (2007) na floresta Amazônica, o armazenamento de água disponível para absorção pelas raízes da superfície até 3m de

profundidade no solo é suficiente para manter as mesmas taxas de evapotranspiração durante a estação de seca. Como resultado, os déficits de precipitação na estação de seca podem ser facilmente atenuados por um aumento na absorção radicular. A perda de água no solo ocorre em torno de 50% a partir da camada superficial do solo até 1m de profundidade no período de um mês. A umidade do solo até 1m de profundidade reduz-se ao mínimo durante esse período da estação de seca até a próxima estação chuvosa começar. A evapotranspiração na estação de seca após o primeiro mês é dependente da absorção radicular do solo abaixo de 1m. Durante as estações de seca com chuvas abaixo do normal ou na média, mais de 75% da evapotranspiração é oriunda da água do solo retirada do perfil abaixo de 1m de profundidade, enquanto que, durante a estação mais chuvosa, esse valor cai para cerca de 50%.

Segundo BELK *et al.* (2007), na Amazônia, somente medições de umidade do solo não descrevem as magnitudes e as taxas de fluxos de água, pois duas camadas de solo com a mesma umidade volumétrica podem apresentar diferentes taxas de circulação de água através deles. Segundo os autores, somente modelagem dos fluxos de água pode quantificar totalmente o sistema hidrológico.

Um experimento realizado pelos mesmos autores em um Latossolo Vermelho localizado na Floresta Nacional do Tapajós, importante unidade de conservação no oeste do Pará, mostra que o modelo unidimensional de Richards teve uma ótima predição e indica que processos físicos de movimento de água no solo no ecossistema são capturados pelo modelo. A modelagem indicou que mudanças nas condições climáticas deverão aumentar os períodos de seca em florestas da Amazônia e podem levar a um aumento da mortalidade de árvores, alterações na composição da floresta, ou uma maior susceptibilidade ao fogo. O modelo indica que as atuais taxas de evapotranspiração têm sido sustentadas à custa de armazenamento de água do solo.

Segundo o trabalho de modelagem da dinâmica da água na zona de raiz em um sistema agroflorestal em um Latossolo Amarelo realizado na Amazônia por SCHLEGEL *et al.* (2004), os resultados da calibração apresentaram boa conformidade entre os dados medidos e simulados pelo programa computacional HYDRUS-2D. A modelagem do fluxo de água nos sistemas agroflorestais desse estudo consistiu da análise da influência de diferentes espaçamentos entre árvores sobre a absorção de água pela raiz, a evaporação e a drenagem. Os resultados mostraram que o fluxo de água varia de acordo com os espaçamentos entre as árvores principalmente na profundidade

das raízes, onde o espaçamento tem uma influência significativa na absorção de água pela raiz, na evaporação e na drenagem.

2.3 Material e métodos

A área de estudo está localizada no município de Moju a 264 km de Belém (PA), nas coordenadas 02°00'26.7" S / 48°37'56.4" W – Alt (GPS – Datum WGS 84) – 60m. O solo é caracterizado como um Latossolo Amarelo distrófico, de textura média e relevo plano. O clima é tropical úmido ou superúmido, sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 18°C, e o total das chuvas do mês mais seco é superior a 60mm, com precipitações maiores de março a agosto, ultrapassando o total de 1.500mm anuais, correspondendo ao tipo Af na classificação climática de Köppen- Geiger.

A área apresenta três situações distintas de cobertura do solo que foram estudadas: a primeira consiste em área com cobertura vegetal proveniente da floresta primária; a segunda é uma área com cobertura de palma de óleo (Figura 2.3); e a terceira é uma subárea sem cobertura vegetal.



Figura 2.3 - Sistema de uso (cobertura) do solo estudado.

Para a determinação das características físicas nas três situações distintas, foram retiradas amostras com estrutura indeformada, utilizando amostrador e anéis com volume de 100cm³, no centro das camadas 0-10cm, 10-20cm, 20-40cm e 40-70cm em três diferentes pontos aleatórios, conforme SANTOS *et al.* (2013b). Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ até serem processadas nos laboratórios da Embrapa Amazônia Ocidental e da Embrapa Solos. Nestas amostras foram mensuradas: granulometria; grau de floculação; densidade do solo; porosidade total; macroporosidade e microporosidade. As análises seguiu-se a metodologia descrita por DONAGEMMA *et al.* (2011).

Foi realizada análise de variância entre alguns dos parâmetros estudados. Os dados foram submetidos ao teste de Bartlett para análise de homogeneidade de variância e o teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, quando atendidas às condições de homogeneidade de variância e normalidade, foi realizada análise de variância e teste de médias (teste Tukey).

2.4 Resultados e discussão

O solo apresentou parâmetros físicos como granulometria, argila dispersa e grau de floculação semelhante (Tabela 2.1) nas diferentes coberturas do solo e em diferentes profundidades (0-10cm, 10-20cm, 20-40cm e 40-70cm). Os sistemas de uso do solo não interferiram em suas características. Em todas as camadas dos sistemas de uso do solo estudado existe argila floculada, sendo isso um dos pré-requisitos juntamente com agentes cimentantes como óxidos de ferro para a formação de agregados.

Tabela 2.1 - Textura e grau de floculação dos diferentes perfis das diferentes coberturas do solo.

Coberturas vegetais	Profundidade	Areia 2.00-0.05 mm	Silte 0.05- 0.002 mm	Argila total <0.002 mm	Grau de floculação
	(cm)	-----(-)-----			
Sem cobertura vegetal	0-10	78±3	9±1	13±2	74±11
	10-20	70±7	9±2	20±6	60±11
	20-40	58±4	9±1	33±4	44±11
	40-70	51±5	8±1	41±5	51±11
Palma de óleo	0-10	76 ±2	10 ±1	13 ±2	61 ±7
	10-20	69 ±2	10 ±1	21 ±1	39 ±5
	20-40	62 ±4	9 ±1	29 ±4	23 ±7
	40-70	58 ±7	9 ±1	33 ±6	31 ±5
Floresta primária	0-10	73±3	11±1	16±3	59±12
	10-20	64±5	13±3	23±8	47±12
	20-40	52±8	18±11	30±3	39±22
	40-70	49±3	9±4	42±6	30±1

Obs: Valores médios ± desvio-padrão (n=3).

A área de floresta (Tabela 2.2) apresenta menor densidade do solo em todas as camadas de solo estudadas (0-10cm, 30-40cm e 50-60cm) em comparação as áreas de palma de óleo e a área sem vegetação. A área de palma de óleo e a área sem vegetação não apresentaram diferenças nos valores da densidade do solo em todas as camadas de solo estudadas.

A porosidade total, macroporos e microporos da área de floresta são maiores em todas as profundidades estudadas (0-10cm, 30-40cm e 50-60cm), em comparação em áreas de palma de óleo e sem vegetação (Tabela 2.2). Na área de palma de óleo, os valores de porosidade total, macroporos e microporos não apresentarem diferenças na camada superficial e nas camadas subsequentes (30-40cm e 50-60cm) em comparação com a área sem vegetação.

A diferença de densidade do solo, porosidade total, microporos e macroporos em todas as camadas estudadas (0-10cm, 30-40cm e 50-60cm) da área de floresta em comparação com as áreas de palma de óleo e área sem vegetação, deve-se à proteção que a floresta primária oferece para a camada superficial do solo através de sua copa e

do seu sistema radicular que é predominantemente profundo e extenso, e que fisicamente ajudam a manter a estrutura.

Por ser tratar de Latossolos Cauliníticos (Capítulo 3) que apresentam menor estabilidade de agregados em água, a absorção de água pelas raízes das árvores evita a dispersão de agregados pela água do solo mantendo a porosidade desse solo. Adicionalmente, essas áreas não tiveram o impacto de máquinas agrícolas ou de animais como no palmar e na área sem cobertura (antigo palmar).

Tabela 2.2 - Densidade e porosidade do solo em diferentes coberturas.

Parâmetros	Profundidade (cm)	Coberturas vegetais		
		Área sem vegetação	Palma de óleo	Floresta primaria
Densidade do solo (kg m ⁻³)	0-10	1,50 Ab	1,49 Ab	1,38 Ba
	30-40	1,63 Aa	1,60 Aa	1,29 Ba
	50-60	1,56 Aa	1,50 Aa	1,38 Ba
Volume total de poros (%)	0-10	42 Ba	43 Ba	47 Aa
	30-40	37 Bb	39 Bb	51 Aa
	50-60	40 Bb	42 Bb	47 Aa
Macroporos (%)	0-10	25 Aa	25 Aa	26 Aa
	30-40	19 Bb	20 Bb	28 Aa
	50-60	20 Bb	21 Bb	25 Aa
Microporos (%)	0-10	17 Bb	18 Bb	21 Aa
	30-40	18 Bb	18 Bb	23 Aa
	50-60	20 Ba	21 Aa	22 Aa

Obs: Os valores médios (n = 3). Letras seguidas de mesma letra (maiúsculas na linha e minúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p <0,05).

A área de palma de óleo não apresentou diferenças significativas da área sem vegetação com relação aos parâmetros densidade do solo, volume total do solo, macroporos e microporos em todas as profundidades estudadas. Isso se deve às características morfológicas da palma de óleo, pois se trata de uma planta da família das palmáceas, nas quais as características de sua copa, como formato das folhas e sua inclinação, oferecem pouca proteção ao solo. O seu sistema radicular também é pouco

profundo (50cm de profundidade), oferecendo menor agregação às camadas subsuperficiais.

2.5 Conclusões

O uso agrícola do solo provocou a compactação com o aumento da densidade, diminuição da macroporosidade e, conseqüentemente, diminuição da drenabilidade da água do solo.

CAPÍTULO 3 VARIAÇÕES DA SOLUÇÃO DO SOLO NO CAMPO (pH, CE, TEORES DE FERRO)

3.1 Resumo

O estudo e a caracterização da composição da solução do solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de absorção, adsorção, dissolução e precipitação que podem ocorrer no terreno, sendo que a análise química das soluções pode identificar as formas e quantidades dos elementos que estão sendo adicionados.

Este trabalho teve como objetivo investigar a dinâmica do pH, da condutividade elétrica e do ferro da solução do solo no campo sob cultivo de palma de óleo com diferentes manejos em um Latossolo Amarelo da Amazônia. As amostras de solução do solo foram coletadas em cada tratamento (em triplicata) através de extratores de cápsula porosa, na profundidade de 10 e 50cm do solo. O período de amostragem foi realizado a cada 15 dias no período de 442 dias, totalizando 30 coletas. Não houve efeitos significativos dos tratamentos e da profundidade nos valores da condutividade elétrica do solo. Os valores de pH foram menores na profundidade de 50cm em todos os tratamentos. Esses valores variaram ao longo do tempo, entretanto o pH da solução na superfície permaneceu mais alto por um período maior. Houve uma interação significativa entre os tratamentos e os tempos de coleta, mostrando uma variação dos teores de ferro ao longo do tempo. Essa variação acentuou-se no período seco, quando os teores de ferro preditivos na solução do solo atingiram valores de até 2,6µg/L.

3.2 Fundamentos e estado da arte

3.2.1 Caracterização e ocorrência dos Latossolos

Os Latossolos são solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos devido às transformações no material constitutivo e são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo. Esses solos têm capacidade de troca de cátions da fração argila baixa (inferior a 17cmolc/kg^{-1} de argila) sem correção para carbono, comportando variações desde solos predominantemente caulínicos, com relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ da fração argila (Ki) mais altos, em torno de 2,0, admitindo o máximo de 2,2, até solos oxidícos de Ki extremamente baixo (SANTOS *et al.*, 2013a). Variam de fortemente a bem drenados,

embora ocorram solos que têm cores pálidas, de drenagem moderada ou até mesmo imperfeitamente drenados, o que é indicativo de formação em condições atuais ou pretéritas com certo grau de gleização. São normalmente muito profundos, sendo a espessura do *solum* raramente inferior a 1m. Têm sequência de horizontes A, B e C com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições usualmente difusas ou graduais. Em distinção às cores mais escuras do A, o horizonte B tem cores mais vivas, variando desde amarelas ou mesmo bruno - acinzentado até vermelho-escuro-acinzentadas, nos matizes 2,5YR a 10YR, dependendo da natureza, forma e quantidade dos constituintes minerais – normalmentedos óxidos e hidróxidos de ferro –, segundo condicionamento de regime hídrico e drenagem do solo, dos teores de ferro no material de origem e se a hematita é herdada ou não. No horizonte C, comparativamente menos colorido, a expressão cromática é bem variável, mesmo heterogênea, dada a sua natureza mais saprolítica. O incremento de argila do A para o B é pouco expressivo ou inexistente, e a relação textural B/A não satisfaz aos requisitos para B textural. De modo geral, os teores da fração argila no *solum* aumentam gradativamente com a profundidade ou permanecem constantes ao longo do perfil. A cerosidade, se presente, é pouca e fraca. Tipicamente, é baixa a mobilidade das argilas no horizonte B, ressalvados comportamentos atípicos de solos desenvolvidos de material com textura mais leve (de composição arenoquartzosa), de interações com constituintes orgânicos de alta atividade ou de solos com delta pH positivo ou nulo. O Latossolo Amarelo distrófico no nível de classificação apresenta matiz de 7,5YR ou mais amarelo e saturação por bases baixa ($V < 50\%$) na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B (inclusive B/A).

Os Latossolos, em geral, são fortemente ácidos, com baixa saturação por bases, distróficos ou alumínicos. Ocorrem, todavia, solos com saturação por bases média e até mesmo alta. Esses últimos são encontrados geralmente em zonas (semi)áridas ou não) que apresentam estação seca pronunciada, ou ainda que apresentem influência de rochas básicas ou calcárias. Esses solos são típicos das regiões equatoriais e tropicais, ocorrendo, também, em zonas subtropicais, distribuídos, sobretudo, por amplas e antigas superfícies de erosão, pedimentos ou terraços fluviais antigos, normalmente em relevo plano e suave ondulado, embora possam ocorrer em áreas mais acidentadas, inclusive em relevo montanhoso. São originados a partir das mais diversas espécies de rochas e sedimentos sob condições de clima e tipos de vegetação os mais diversos (SANTOS *et al.*, 2013a).

Segundo KER (1998), os Latossolos experimentaram diferentes situações climáticas ao longo de sua formação. Isso tende a homogeneizar características químicas, morfológicas e mineralógicas. Assim, são considerados solos de mineralogia relativamente simples. Na sua fração grosseira prevalece quartzo, com menores quantidades de muscovita e alguns feldspatos potássicos quando derivados de rochas ácidas. Magnetita e ilmenita com pequena proporção de quartzo prevalecem quando os solos se desenvolvem a partir de rochas básicas, com destaque para o basalto, no caso do Brasil.

Os Latossolos encontram-se amplamente distribuídos pelo Brasil (Tabela 3.1) ocupando em torno de 31,49% da área relativa do país (SANTOS *et al.*, 2013a). Como unidade dominante, ocupa cerca de um terço da superfície do território nacional, ocorrendo praticamente em todas as regiões sob diferentes condições climáticas, relevo e material de origem (KER, 1998; SCHAEFER *et al.*, 2008).

A maior parte dos Latossolos é pobre em nutrientes vegetais por causa do intemperismo intenso a que são submetidos. Durante muito tempo, foram considerados “solos problemáticos” para a agricultura, devido à baixa fertilidade natural dos mesmos. Contudo, atualmente esses solos são muito procurados para atividades agrícolas, devido aos avanços tecnológicos relacionados ao emprego adequado de corretivos da acidez do solo, da adição de quantidade e tipos de fertilizantes.

Dessa forma, requerem um manejo apropriado, sobretudo nos solos de textura média, que são os mais pobres e susceptíveis à erosão. No bioma Cerrado, os Latossolos são representativos e apresentam a tendência de formar crostas superficiais, possivelmente devido à flocculação das argilas que passam a se comportar funcionalmente como silte e areia fina (SANTOS *et al.*, 2013a).

Tabela 3.1 - Distribuição por área dos solos no Brasil.

Classes	Área absoluta (km ²)	Área relativa (%)
Argissolos	2.28589,16	26,84
Cambissolos	448.268,08	5,26
Chemossolos	37.206,29	0,44
Espodossolos	160.892,69	1,89
Gleissolos	397.644,27	4,67
Latossolos	2.681.588,69	31,49
Luvissolos	241.910,74	2,84
Neossolos	1.122.603,82	13,18
Nitossolos	96.533,02	1,13
Organossolos	2.231,33	0,03
Planossolos	226.561,75	2,66
Plintossolos	594.599,98	6,98
Vertissolos	17.630,98	0,21
Afloramentos de rochas, dunas, águas e outros	201.815,77	2,37
Brasil	8.514.876,60	100,0

Fonte: SANTOS *et al.*, (2013a).

Na fração argila dos Latossolos, as quantidades de caulinita, gibbsita, goethita e hematita são variadas, a depender do tipo de material de origem, da intensidade do intemperismo e drenagem do sistema, entre outros fatores. Menores proporções de vermiculita com hidroxila entre camadas, ilita, anatásio, rutilo, magnetita e mesmo haloisita, também são constatados com frequência em determinados Latossolos. Assim, o conceito central dos Latossolos prevê o domínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, com menores proporções de outros componentes na fração argila (KER, 1998).

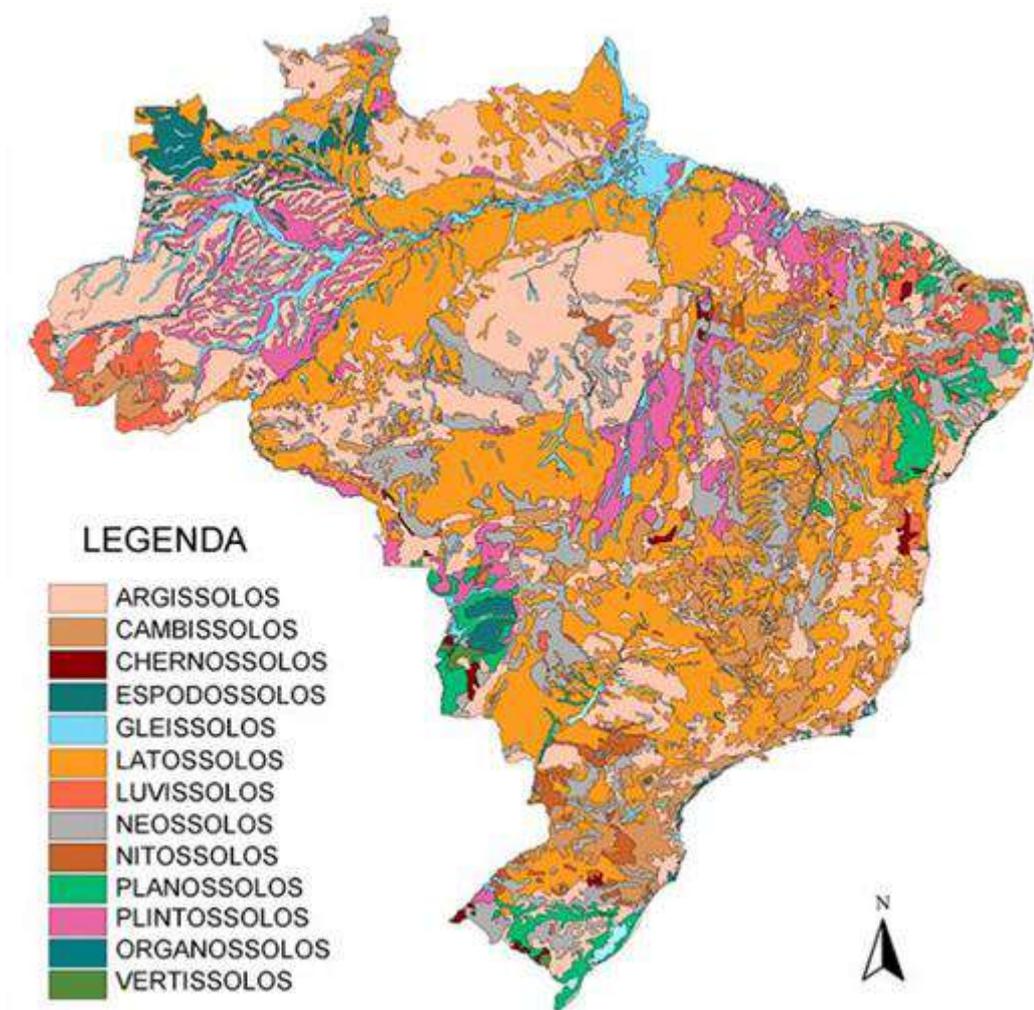


Figura 3.1 - Representação esquemática da distribuição de solos no Brasil. Fonte: SANTOS *et al.*, (2013a).

Dentro da classe dos Latossolos, especificamente os Latossolos Amarelos, apresentam-se teores medianos de óxidos de ferro e teor de alumínio trocável frequentemente alto. São profundos ou muito profundos, bem drenados, de ácidos a muito ácidos com textura argilosa, muito argilosa ou média (SANTOS *et al.*, 2013a).

Segundo SANTOS *et al.* (2011b), os Latossolos Amarelos encontram-se distribuídos em muitas áreas do Brasil. Sua maior expressividade e continuidade de área encontram-se nos platôs litorâneos e amazônicos, onde normalmente desenvolvem-se a partir de sedimentos do grupo Barreiras (Plio-pleistoceno) e formação Altér do Chão (Cretáceo).

Os Latossolos Amarelos distróficos que ocorrem na Amazônia são, geralmente, profundos e homogêneos, com matizes do horizonte B entre 7,5YR e 10YR, caulíníticos, com quantidades de caulinita superiores a 80% na fração argila, a textura variando de 15 a 95% de argila (RODRIGUES *et al.*, 1996). Possuem baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio. Os teores de Fe total situam-se entre 1,5 a 7% e o valor de Ki (relação sílica/alumina) é normalmente maior do que 1,5, refletindo sua natureza caulínítica (SANTOS *et al.*, 2013a). Os solos possuem caráter ácido sem muita variação entre os horizontes. O teor de matéria orgânica decresce em profundidade, sendo o seu maior conteúdo encontrado na superfície devido à incorporação de resíduos vegetais provenientes da floresta. A condutividade hidráulica desse solo apresenta grande homogeneidade ao longo do seu perfil, sendo mais sensível à variação da porosidade (MARQUES *et al.*, 2004).

3.2.2 Ferro

O ferro (Fe) é um elemento relativamente abundante em muitos solos cultivados sua concentração total comum é, em média, de 20 a 40 g/kg⁻¹ (CORNELL e SCHWERTMANN, 2003). No estado ferroso (Fe²⁺), o Fe está presente principalmente em minerais filosilicatos. A oxidação para a forma férrica (Fe³⁺) leva a mudanças importantes nos processos pedogenéticos (TORRENT e CABEDO, 1986; ADRIANO, 2001; STUCKI *et al.*, 2002), resultando na formação de uma série de "bases conjugadas" nas quais o Fe é coordenado com água e hidróxidos (SPOSITO, 1989).

Entre as formas pedogenéticas de Fe, (hidro) óxidos, goethita (α -FeOOH) e hematita (α -Fe₂O₃) são os minerais mais abundantes em solo bem drenado. Outros óxidos de Fe podem existir em solos mal drenados como minerais cristalinos (lepidocrocita, maghemita e magnetita), ou minerais cristalinos de curto alcance (ferrihidrita e ferroxita) ou precipitados não cristalinos (SCHWERTMANN, 1991; CORNELL e SCHWERTMANN, 2003). As regras gerais que regem o comportamento de Fe são o potencial redox (isto é, condições oxidantes ou redutoras) e pH. As condições neutras de pH (pH =7) promovem a precipitação de minerais de Fe mal ordenados (ferrihidrita), enquanto o pH em condições ácida promovem a mobilização de minerais de Fe (COLOMBO *et al.*, 2013). Goethita (Gt) e hematita (Hm) apresentam diferentes concentrações e características físico-químicas (GHIDIN *et al.*, 2006), sendo caracterizados pela alta estabilidade (baixa solubilidade) em condições de Eh-pH neutras. Para um valor específico de pH, os óxidos de Fe (hematita) e os hidróxidos (goethita) produzem a mesma concentração de Fe numa solução, enquanto que o ferrihidrita somente com uma Eh muito mais baixo.

No entanto, apesar da sua menor estabilidade, as formas metaestáveis tais como lepidocrocita e ferrihidrita ocorrem frequentemente em muitos solos, particularmente em solos mais jovens caracterizando o estado de não equilíbrio no ambiente como o clima frio e solos ácidos (SCHWERTMANN, 1991). Pequenas quantidades de Fe mineral também podem ser encontradas em condições de redução em solo ácido como pirita (FeS₂) ou em solo alcalino como siderita (FeCO₃).

Muitas espécies de Fe cristalino e mal ordenado podem interagir com componentes do solo, tais como colóides inorgânicos e orgânicos para formar agregados ainda mais complexos com novas superfícies (COLOMBO e TORRENT, 1991). A solubilização de Fe a partir de fontes minerais do solo é um processo lento, regulado pelo pH e pelos fenômenos de dissolução-precipitação de minerais de hidróxido de Fe, tanto cristalinos quanto mal ordenados (MENGEL, 1994; LINDSAY, 1988). O produto de solubilidade de carbonatos de Fe é $3,2 \times 10^{-11}$, enquanto que o produto de solubilidade de Fe(OH)₃ é 4×10^{-38} (LINDSAY e SCHWAB, 1982). Portanto, as espécies de Fe no ambiente do solo podem ser resumidas a seguir: (1) Fe²⁺ em minerais primários; (2) Fe³⁺ em minerais secundários, como minerais cristalinos de Fe e óxidos (hidro) óxidos cristalinos mal ordenados; (3) Fe solúvel e permutável; e (4) Fe ligado à matéria orgânica em formas solúveis ou insolúveis (Figura 3.2).

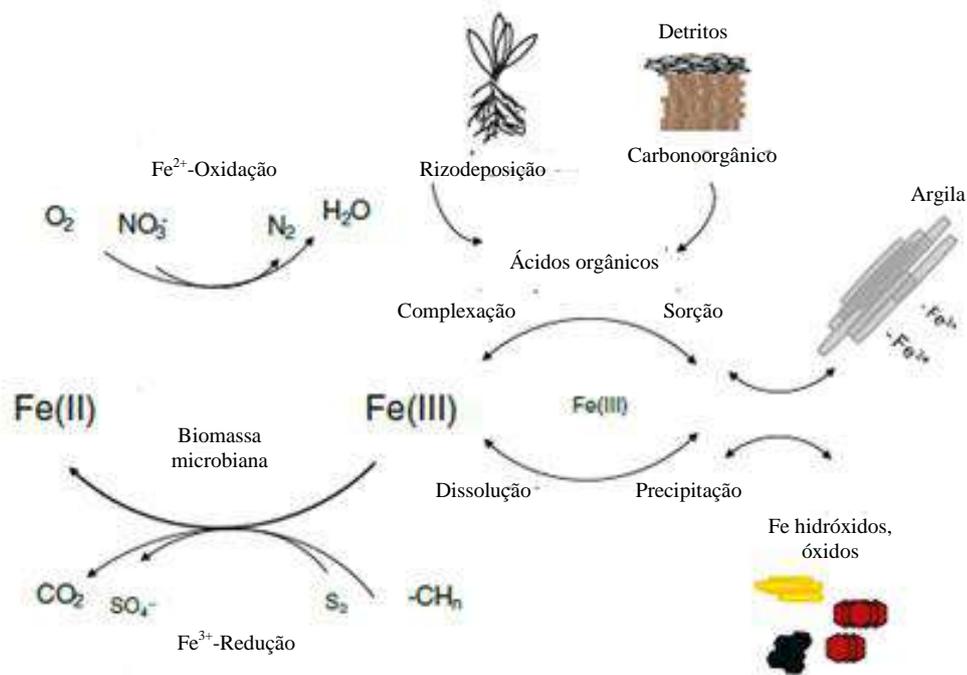


Figura 3.2 - Biogeoquímica do ferro no solo. Fonte: Adaptado de COLOMBO *et al.* (2013).

À medida que o Fe participa em alguns processos de sustentação da vida de micro-organismos e plantas, é considerado um micronutriente essencial e sua disponibilidade é crucial para seu crescimento. Em condições arejadas e valores de pH acima de 7, estima-se que a concentração total de espécies inorgânicas de Fe na solução do solo é de cerca de 10^{-10} M (BOUKHALFA e CRUMBLISS 2002), isto é, 104-105 vezes inferior à requerida para um crescimento ótimo das plantas (RÖMHELD e MARSCHNER, 1986). Portanto, a deficiência de Fe é um problema frequente em solos calcários (MENGEL *et al.*, 2001).

A geoquímica do Fe está estritamente ligada à física e aos processos biológicos e químicos que ocorrem no solo (Figura 3.8). Os fatores que influenciam esses processos podem afetar significativamente a presença relativa das diferentes formas de Fe e, por sua vez, a disponibilidade de micronutrientes para os organismos (micro-organismos e plantas).

Os micro-organismos e os óxidos de Fe coexistem nos solos, e sua estreita associação proporciona amplas oportunidades para interações mútuas, nas quais os minerais primários podem fornecer Fe e muitos outros nutrientes importantes como P e S, além de *habitats* apropriados para micro-organismos, enquanto os microorganismos

podem influenciar a intemperização mineral (LOVLEY *et al.*, 2004). Os minerais primários contendo ferro são especificamente dissolvidos por bactérias (por exemplo, *Thiobacillum* e *Metallogenium* sp.). Esses processos são estritamente dependentes de bactérias e conhecidos como "sorção, solubilização (quelação), acumulação, transformação, precipitação" dentro da rizosfera. Esses mecanismos são ainda mais complexos devido à presença de plantas. De fato, estas podem afetar os microorganismos (abundância, diversidade e atividade), disponibilidade de Fe e as interações entre minerais de Fe e microorganismos como consequência da atividade radicular (exsudação e absorção de nutrientes) para satisfazer sua necessidade desse micronutriente essencial. Portanto, a baixa oferta de Fe³⁺ para a solução do solo e a alta demanda de plantas e microorganismos com crescimento populacional, pode induzir um nível considerável competição de Fe na rizosfera (LOPER e BUYER, 1991; GUERINOT e YI, 1994).

3.2.3 Solução do solo

A solução do solo pode ser definida como sendo a fase aquosa do solo e seus solutos que se encontram dissolvidos em um dado momento, dentre eles os solutos minerais (Fe²⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, NH₄⁺, Cl⁻, Na⁺, SO₄⁻ etc.) e orgânicos (aminoácidos, ácidos húmicos, enzimas etc.) provenientes dos processos químicos e bioquímicos do solo e da troca com a hidrosfera e biosfera (BLANCO, 2006).

Esse meio transporta espécies químicas para as partículas do solo, mantendo um contato íntimo entre este e os solutos do solo. Existe uma condição de equilíbrio entre os componentes da solução do solo e a fase sólida, pela ocorrência de importantes reações químicas com transferência de espécies entre as fases. Além da fase sólida, a solução do solo ainda interage com a fase gasosa, com as plantas e fauna do solo (MEURER, 2006).

O estudo e a caracterização da composição da solução do solo podem ser utilizados para prever transformações e reações de absorção, adsorção, dissolução e precipitação que podem ocorrer no solo, sendo que a análise química das soluções pode identificar as formas e quantidades dos elementos que estão sendo adicionados ao solo e transferidos para outros compartimentos do ambiente através do lençol freático (MACEDO, 2012)

A composição química da solução do solo varia em função do material de origem, pH, teor de matéria orgânica, adição de produtos químicos, das condições de oxirredução, do manejo do solo e também do clima (MEURER, 2006).

O diagrama de Eh-pH (Figura 3.3) é amplamente utilizado na geoquímica por fornecer importantes informações relacionadas à distribuição de espécies de diferentes elementos e minerais em sistemas distintos. Tais diagramas são limitados, tendo em vista que assumem processos em equilíbrio que, em alguns casos, não ocorrem em processos naturais, principalmente, em ambientes de baixa temperatura (LINDBERG e RUNNELLS, 1984). Entretanto, são extremamente úteis para a geoquímica na determinação da paragenese mineral, servindo como base para melhorar a compreensão do comportamento de metais em diversos sistemas. A Figura 3.3 mostra a relação entre as fases de um sistema simples, assumindo o Fe_2O_3 como fase estável para a precipitação de Fe^{3+} . Esse diagrama é caracterizado por um enorme campo de Fe_2O_3 e Fe^{2+} e, em uma condição redutora de pH básico, por um campo de Fe_3O_4 . Devido às razões termodinâmicas, as concentrações de Fe livre dissolvido são extremamente baixas em ambientes oxidantes de pH neutro (MULHOLLAND *et al.*, 2012).

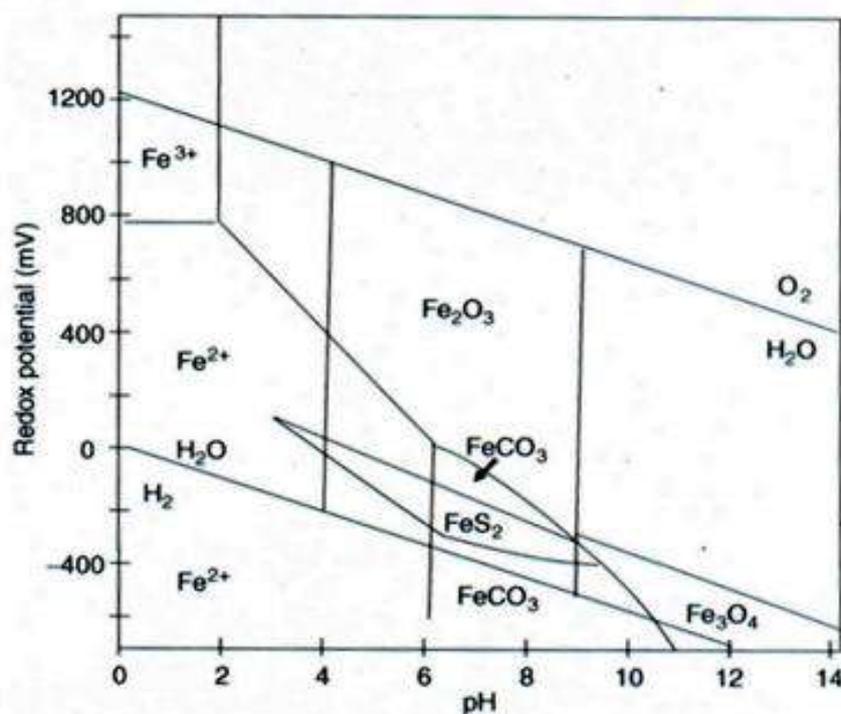


Figura 3.3 - Diagrama Eh-pH para par redox $\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$. Fonte: adaptado de LINDSAY (2001).

A reação do Fe^{2+} com oxigênio é rápida e, segundo MILLERO *et al.* (1987), é inversamente proporcional à concentração de prótons H^+ na solução, demonstrando a importância do pH. Ou seja, quanto mais baixo o pH da solução, menor é a taxa de oxidação do Fe. Sendo assim, em uma solução de ferro ferroso com um baixo pH, a reação de oxidação é tão lenta que pode demorar semanas, sob o ar atmosférico. Em condições de pH neutro a reação de oxidação do Fe^{2+} é tão rápida que se a água permanecer aerada, em 10 minutos ou menos, o Fe será totalmente removido da solução na forma de oxihidróxidos. A cinética dessas reações é descrita de acordo com Equação 3.1 a seguir (MILLERO *et al.* 1987; SINGER e STUMM, 1970; MULHOLLAND, 2014) na forma (3.1).

$$\frac{-d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} = k[\text{Fe}^{2+}][\text{O}_2][\text{OH}]^2 \quad (3.1)$$

onde, $k = \log k_0 - 3,29 \times I^{0.5} + 1.52 \times I$, $\log k_0 = 21,56 - 1545/T$, I é a força iônica, e T é a temperatura em graus Kelvin. Através dessa equação, pode-se observar que a taxa de oxidação acelera com o aumento da concentração de Fe^{2+} , O_2 e pH.

Segundo MULHOLLAND (2014), as fases de Fe precipitadas de soluções são denominadas de oxihidróxidos de Fe. Do ponto de vista da interpretação mineralógica (*e.g.*, difração de raio-X, infravermelho espectroscopia Mössbauer), o precipitado de Fe pode ser completamente amorfo, na forma de gel férrico, ou fracamente cristalizado, como, por exemplo, os hidretos de Fe (hidróxido de Fe^{3+} amorfo)

De acordo com MENGEL *et al.* (2001), a dinâmica dos íons na solução do solo é dependente de vários fatores, tais como textura do solo, quantidade de nutriente aplicada, intensidade de chuva ou lâmina de água aplicada na irrigação, forma química do nutriente aplicado, entre outros. MACEDO (2012) acrescenta que o movimento de íons no solo está relacionado com a intensidade de percolação da água e com o comportamento de cada um em relação às condições de fixação, adsorção e lixiviação, que é função de cada íon e do tipo de solo em que se encontra.

Segundo NEU (2005), os maiores teores de Fe^{2+} estão associados com os maiores teores de argila dos Latossolos e Argissolos, no qual apresentaram maiores concentrações na profundidade de 20cm. Por outro lado, essa autora verificou decréscimo significativo desses metais na profundidade de 100cm, fato esse acompanhado de aumento significativo dos teores de carbono orgânico dissolvido, demonstrando a existência de correlação negativa entre esses teores e os de Fe^{2+} .

MIRANDA (2006) mostrou que a concentração de Fe^{2+} na solução do solo foi bastante variável ao longo do ano, diminuindo em profundidade em diferentes coberturas vegetais. Ainda, esse autor verificou que a concentração média mensal de Fe^{2+} na solução do solo em um Latossolo sob pastagem foi superior à dos demais solos sob diferentes coberturas vegetais ($129,15 \mu\text{mol/L}^{-1}$).

3.3 Material e métodos

A área de estudo está localizada no município de Moju, a 264 km de Belém (PA), sob cultivo de palma de óleo do Grupo Marborges S.A. (Figura 3.4). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo, distrófico, textura média.

Na área de estudo foram testados tratamentos para reduzir a formação do íon ferroso na solução do solo com aumento do pH em combinação com um aumento do potencial redox do solo. Os tratamentos utilizados na área foram:

_Drenagem Vertical (DV): foram realizadas drenagens verticais nas projeções de cinco copas de palmas de óleo;

_Adubação e Calagem (AC): foram realizadas adubações e calagens nas projeções de cinco copas de palmas de óleo;

_Seca Dendê (SD): foram realizadas coberturas do solo para reduzir a precipitação efetiva e a umidade do solo de cinco palmas de óleo.

_Área sem vegetação (AF): foram observados três pontos sem vegetação na área;

_Palma de óleo (SAA): foram observadas três palmas de óleo sem nenhum tratamento na área.

Maiores detalhes sobre os tratamentos estão descritos no Anexo I



Figura 3.4 – Área sob cultivo de palma de óleo do Grupo Marborges S.A.

A amostra de solo para a caracterização química dos diferentes tratamentos foi coletada de 0 a 50cm de profundidade, conforme SANTOS *et al.* (2013b).

A caracterização química foi realizada no laboratório de solos da Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus (AM). Os parâmetros analisados foram: pH (H₂O), Ca²⁺ + Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, (Al³⁺+H⁺), P, N, C, Fe total, Si total, Mn total, Cu total, Fe ditionito, Fe oxaloacetato. As análises foram realizadas de acordo com as metodologias descritas por DONNAGEMA *et al.* (2011).

As amostras de solução do solo foram coletadas em cada tratamento (em triplicata) através de extratores de cápsula porosa, que consistem de um tubo de PVC com uma cápsula de cerâmica porosa na extremidade que fica em contato com o solo, na profundidade de 10 e 50cm do solo. Essa cápsula coleta solução do solo através da diferença de pressão, produzida com bomba de vácuo manual (Figura 3.5). A coleta das amostras da solução do solo seguiu os procedimentos descritos por Blanco (2006).

O período de amostragem foi realizado a cada 15 dias no período de 442 dias, totalizando 30 coletas. A determinação de pH e condutividade da solução do solo de diferentes tratamentos foi obtida no campo através do equipamento multiparâmetro

portátil, modelo Orion Star III (*THERMO*, EUA). No mesmo período, houve o monitoramento, diário, de precipitação através de um pluviômetro presente na área.

As amostras da solução do solo utilizadas para determinação de ferro receberam ainda no campo 200 µl de HNO₃ como preservante e em seguida, foram armazenadas em tubos de polipropileno (tubos Falcon) sob refrigeração até serem analisadas. As análises de ferro foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos e Plantas da Embrapa Solos, Rio de Janeiro-RJ, onde foi aplicada a técnica de espectrometria de emissão por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Para isso, utilizou-se equipamento Perkin-Elmer modelo OPTIMA 3000. O sistema de nebulização ultrassônico foi utilizado a partir de equipamento CETAC modelo U-5000AT+. A concentração do ferro foi determinada com base em curva analítica obtida por diluição adequada do padrão analítico multielementar IV da Merck (diluído em HNO₃ 1mol/L⁻¹) e pelas respectivas áreas do pico da linha de emissão selecionada, a qual foi 238,199 nm (Ferro).



Figura 3.5 – Extratores de cápsula porosa para amostragem da solução do solo (Foto: Wenceslau Teixeira).

Os dados de pH, condutividade elétrica (CE) e ferro obtidos na solução do solo, em diferentes tratamentos, foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado, e o modelo da análise considerou as palmas (locais de coleta) e as interações entre as palmas como fontes de medida do erro experimental. Quando significativo o efeito de tratamentos, foram feitas comparações usando teste de Tukey ($p > 0,05\%$). Para descrever os efeitos das épocas de amostragem e das interações com o tempo, são apresentados gráficos de médias dos tratamentos ou das profundidades. Os ajustes deste modelo foram realizados com o modelo misto usando a biblioteca lme4 do programa R (*R DEVELOPMENT CORE TEAM*, 2016). Para as comparações múltiplas de médias entre os tratamentos e profundidades, foram utilizadas as bibliotecas multcomp e lmerTest.

3.4 Resultados e discussão

A acidez é mais acentuada em valores de pH (em água) inferiores a 5,0 em todo o perfil (Tabela 3.2), o que pode ser resultante de um intenso processo de lixiviação, da idade e características dos sedimentos, do grau de distrofismo e da rápida e contínua decomposição da matéria orgânica (LIMA, 2001).

Os teores de nutrientes (Ca, Mg, K e P) são baixos (Tabela 3.2). Essas características químicas assemelham-se àquelas descritas pelo projeto RadamBrasil (1977) para os Latossolos Amarelos dessa área em particular, bem como para a região Amazônica como um todo por VIEIRA e SANTOS (1987), LIMA (2001) e SCHAEFER (2007).

Atribui-se a baixa fertilidade desses solos à pobreza mineral do material de origem e à intensa lixiviação de bases decorrente da alta precipitação pluviométrica da região (RADAMBRASIL, 1977; LIMA, 2001).

O solo possui baixos teores de carbono orgânico total (SANTOS *et al.*, 2013a) semelhante aos encontrados por MARQUES *et al.* (2004).

Comparando a análise química realizadas por MARQUES *et al.* (2010) em um Latossolo Amarelo distrófico sob cobertura vegetal de capoeira e floresta densa e as análises químicas deste trabalho (Tabela 3.2), observou-se que todos os tratamentos apresentaram menores teores de carbono orgânico total (C_{org}) e saturação por alumínio (m) em comparação ao Latossolo Amarelo com cobertura de capoeira e floresta densa.

A capacidade de troca de cátions (T) de todos os tratamentos é menor do que floresta densa, mas semelhante a do Latossolo com cobertura de capoeira.

Tabela 3.2 - Características químicas do solo nos diferentes tratamentos.

TRAT	pH		Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB	Al ³⁺	H ⁺	T	V	m	P	C _{org}	N	C/N
	H ₂ O	KCl	+ Mg ²⁺	-----cmolc kg ⁻¹ -----					----- % -----		----- g kg ⁻¹ -----				
TENS	4,8 ±0,3	4,0 ±0,1	1,2 ±0,6	0,1 ±0,1	0,01 ±0,0	1,3 ±0,7	0,3 ±0,2	2,8 ±0,7	4,4 ±1,2	28 ±7	24 ±15	37 ±49	7,0 ±4,1	0,7 ±0,3	9,1 ±1,4
AF	4,6 ±0,3	4,0 ±0,1	1,1 ±0,5	0,1 ±0,1	0,01 ±0,0	1,2 ±0,5	0,4 ±0,2	2,9 ±1,0	4,5 ±1,2	26 ±10	28 ±18	41 ±53	7,1 ±2,7	0,8 ±0,3	8,7 ±1,0
AC	4,5 ±0,3	3,9 ±0,1	0,6 ±0,2	0,06 ±0,03	0,01 ±0,0	0,6 ±0,2	0,7 ±0,2	2,8 ±0,7	4,1 ±0,3	15 ±6	53 ±15	6 ±7	5,9 ±2,3	0,7 ±0,2	8,1 ±1,2
SD	4,6 ±0,3	3,9 ±0,1	0,7 ±0,3	0,1 ±0,03	0,01 ±0,0	0,7 ±0,4	0,7 ±0,1	3,1 ±1,1	4,5± 1,3	16 ±4	51± 14	10 ±13	5,7 ±2,6	0,7 ±0,2	8,1 ±1,8
DV	4,6 ±0,3	3,9 ±0,1	0,7 ±0,3	0,1 ±0,02	0,01 ±0,0	0,8 ±0,3	0,6 ±0,2	2,9 ±0,8	4,4 ±1,0	18 ±5	44 ±15	12 ±15	5,8 ±2,5	0,7 ±0,2	4,6 ±1,4

Obs: valores médios ± desvio-padrão (n=5); C_{org} – carbono orgânico total; P, K e Na – Mehlich 1; Ca, Mg e Al trocáveis – KCl 1 mol L⁻¹; SB – soma de bases; T - capacidade de troca de cátions (SB+H⁺+Al³⁺); m - saturação por alumínio (Al³⁺/SB+H⁺).100; V - saturação por bases (100.SB/T); * - repetições apresentaram o mesmo valor.

Os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, Fe_o e Fe_d (Tabela 3.3) apresentaram-se semelhante em todos os tratamentos, indicando que os tratamentos aplicados não afetaram os teores desses elementos no solo.

O teor de ferro total (Fe₂O₃) encontrado nos tratamentos indica que o solo apresenta um caráter mesoférico, ou seja, possui teor médio de ferro total no solo (SANTOS *et al.*, 2013a), e o valor encontrado em todos os tratamentos é maior comparado a trabalhos com Latossolos Amarelos distróficos na Amazônia (MARQUES *et al.*, 2004 e 2010). Os teores de zinco, cobre e manganês são baixos e menores em comparação a trabalhos como o de MARQUES *et al.* (2004).

Tabela 3.3 – Concentrações desilício, alumínio, ferro, titânio e manganês totais e ferro extraídos por oxalato ácido de amônio e ditionito-citrato de sódionos diferentes tratamentos.

TRAT.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (Fe _t)	TiO ₂	MnO	Fe _o	Fe _d	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / R ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃	Fe _o / Fe _t	Fe _o / Fe _d	Fe _d / Fe _t
----- g kg ⁻¹ -----								(Ki)	(Kr)				
TENS	85,1 ±17,7	77,3 ±23,4	13,6 ±4,1	6,2 ±1,1	0,1 ±0,0	1,5 ±0,3	6,5 ±2,5	1,9 ±0,2	1,7 ±0,2	9,0 ±1,2	0,10 ±0,04	0,24 ±0,08	0,48 ±0,13
AF	86,2 ±21,6	77,9 ±29,6	12,5 ±4,1	6,2 ±1,6	0,0 ±0,0	1,2 ±0,2	5,7 ±2,4	2,0 ±0,3	1,8 ±0,2	9,8 ±2,4	0,10 ±0,04	0,24 ±0,12	0,44 ±0,06
AC	82,3 ±14,7	88,6 ±17,3	20,7 ±4,0	9,0 ±1,1	0,1 ±0,0	1,5 ±0,2	8,8 ±1,6	1,6 ±0,1	1,4 ±0,1	6,7 ±0,5	0,07 ±0,02	0,17 ±0,04	0,43 ±0,04
SD	84,7 ±15,5	87,2 ±20,5	21,3 ±4,0	8,6 ±1,3	0,1 ±0,0	1,5 ±0,3	8,2 ±1,9	1,7 ±0,1	1,4 ±0,1	6,4 ±0,8	0,07 ±0,02	0,19 ±0,07	0,38 ±0,03
DV	83,6 ±14,7	85,1 ±18,1	20,9 ±4,2	8,8 ±1,2	0,1 ±0,0	1,6 ±0,2	8,3 ±1,7	1,7 ±0,1	1,5 ±0,1	6,4 ±0,5	0,08 ±0,02	0,20 ±0,06	0,40 ±0,06

Obs: valores médios ± desvio-padrão (n=5); SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e MnO – elementos totais extraídos por ácido sulfúrico; Fe_o – Fe extraído por oxalato ácido de amônio; Fe_d – Fe extraído por ditionito-citrato de sódio; Fe_t – Ferro total.

A precipitação acumulada durante todo o período monitorado (Figura 3.6) foi de 3.018mm, sendo que as maiores precipitações se concentraram entre os períodos 1 a 6, 13 a 15 e 17 a 27, com uma precipitação média diária de 12mm. As menores precipitações estão concentradas nos períodos de 6 a 13, 15 a 17 e 27 a 30, tendo uma precipitação média diária de 4mm. Houve três precipitações diárias superiores a 100mm, sendo essas antes do período 2, entre os períodos 12 e 13 e após o período 20.

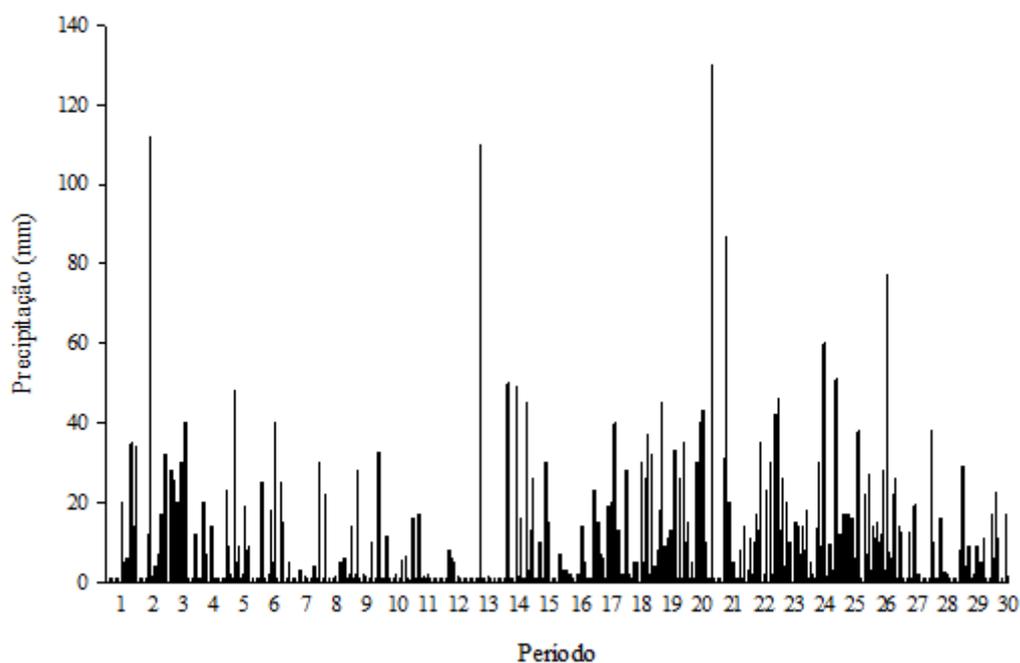


Figura 3.6– Precipitação ao longo do período de monitoramento.

Para os dados de condutividade elétrica na solução do solo, não houve efeito de tratamento, profundidade e tempo efeito com relação à profundidade ao longo do tempo.

Não houve efeito do manejo químico com a utilização de adubação e calagem (AC) e o manejo físico (DV e SD) sobre a condutividade elétrica da solução do solo.

Não houve diferença na condutividade elétrica da solução do solo entre a área sem vegetação (AF) e a área com cultivo de palma de óleo (SAA). A intensidade das precipitações durante o monitoramento (Figura 3.6) não alterou significativamente a condutividade elétrica da solução do solo.

Para os dados de pH não houve efeito de tratamento, somente efeito da profundidade de avaliação e interação entre a profundidade e o tempo (Figura 3.7). A profundidade de 10cm se manteve mais básica ao longo do tempo em comparação da profundidade de 50cm.

Na profundidade de 10cm, o pH decresceu a partir do sétimo período, quando ocorreu uma menor precipitação na área e voltou a aumentar a partir da coleta 17, na qual os valores de pH na profundidade de 10cm atingiram valores próximos da neutralidade. Essa elevação de pH é uma característica de solos que sofreram alagamentos (CAMARGO *et al.*, 1999; LOVLEY *et al.*, 2004).

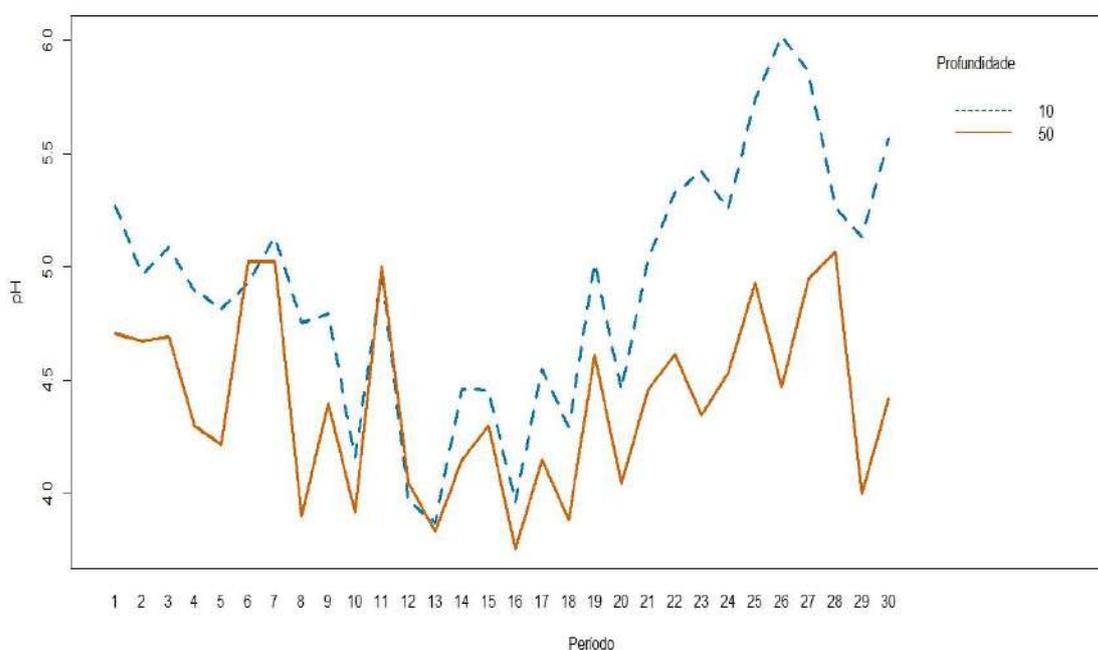
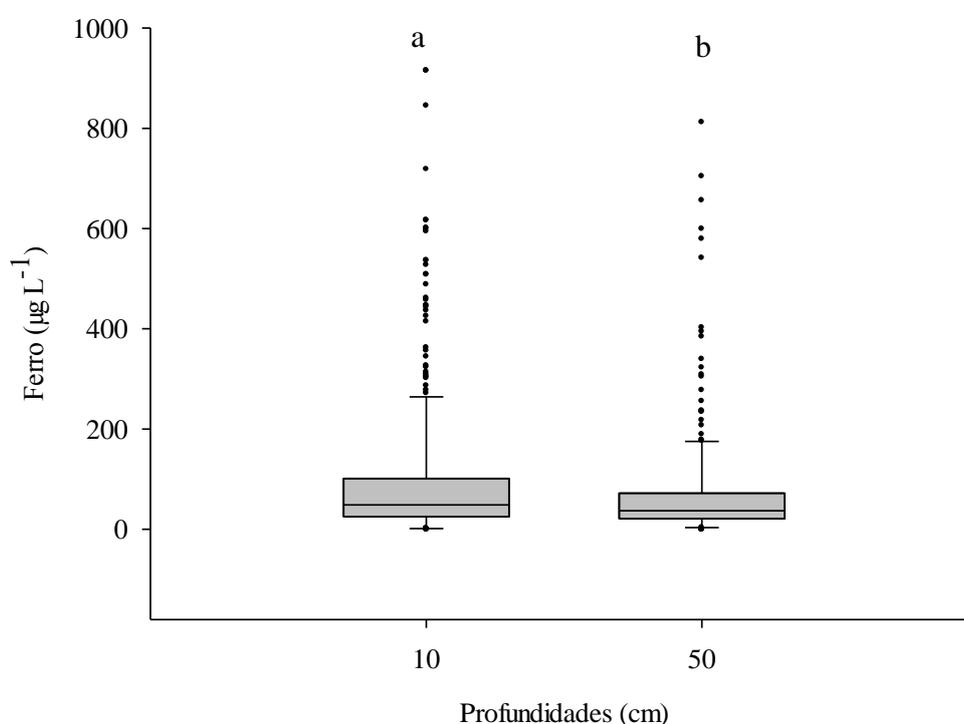


Figura 3.7- Predição da evolução do pH da solução do solo em diferentes profundidades.

Osteores de ferro na solução do solo apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que houve efeito do manejo químico com a utilização de adubação e calagem (AC) e o manejo físico (DV e SD) sobre os teores de ferro na solução do solo. Não houve diferença significativa no teor de ferro na solução do solo entre a área sem vegetação (AF) e a área com cultivo de palma de óleo (SAA). Os tratamentos, provavelmente, não interferiram na forma do ferro no solo (cristalinidade), nos teores de matéria orgânica (Tabela 3.2), potencial de oxirredução, potencial hidrogeniônico (pH) e população de microrganismos (PONNAMPERUNA, 1979; LINDSAY, 2001; LOVLEY *et al.*, 2004).

Os teores de ferro nas profundidades de 10 e 50cm (Figura 3.8) apresentaram diferenças significativas, indicando ambientes diferentes com relação à evolução do teor de ferro na solução do solo nessas profundidades. O teor de ferro na profundidade de 10cm apresentou média de $100\mu\text{g.L}^{-1}$ e picos de até $915\mu\text{g.L}^{-1}$ de ferro em comparação a profundidade de 50cm, que apresentou média de $76\mu\text{g.L}^{-1}$ e picos de até $800\mu\text{g.L}^{-1}$ de ferro na solução do solo (Figura 3.8). Essa diferença é devida possivelmente à profundidade de 10cm possuir o teor de matéria orgânica maior em comparação a profundidade de 50cm, pois a adição de matéria orgânica aumenta o suprimento de

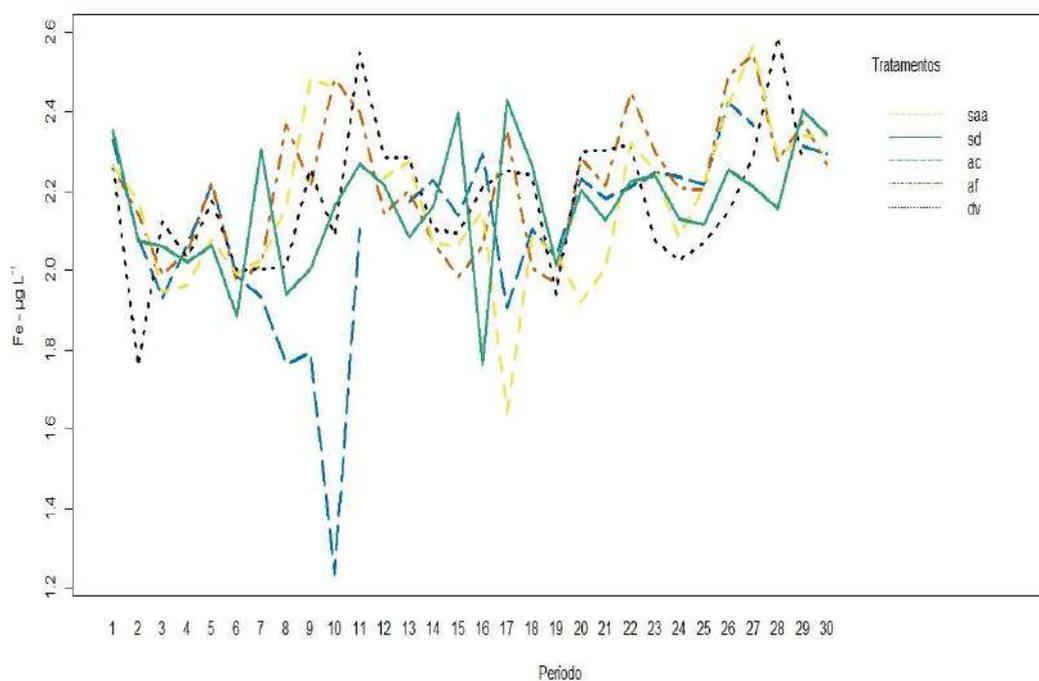
elétrons na solução do solo e, conseqüentemente, reduzindo componentes oxidantes como o ferro (LINDSAY, 2001). Os valores médios nas duas profundidades apresentaram-se menores em comparação ao valor médio de $230\mu\text{g.L}^{-1}$ de ferro na solução do solo em um Latossolo sob cultivo cafeeiro e sem vegetação (MIRANDA *et al.* 2006) e semelhantes à solução do solo em solos bem drenados, onde os valores de ferro variam de 10 a $80\mu\text{g.L}^{-1}$ (ELKHATIB *et al.*, 1987). Apesar de terem valores médios semelhantes, seus picos próximos de $1000\mu\text{g.L}^{-1}$ indicam um ambiente propício à redução e à locomoção do ferro para a solução do solo, como os ambientes alagados (PONNAMPERUNA, 1979; LOVLEY *et al.*, 2004).



Obs: letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 3.8 - Representação BoxPlot dos dados de ferro da solução do solo em diferentes profundidades.

Os teores de ferro da solução do solo nos tratamentos ao longo do tempo (Figura 3.9) apresentaram interação significativa, indicando que as médias dos tratamentos variam ao longo do tempo. Os teores de ferro apresentaram grande variação em períodos de menores precipitações (período de 8 a 10 e período de 27 a 30) e picos de concentração de ferro chegando a valores próximos de $600\mu\text{g.L}^{-1}$. Isso provavelmente é devido a algumas áreas do solo estarem saturadas, propiciando um ambiente redutor e, conseqüentemente, à redução do ferro e sua migração para a solução do solo.



Obs: saa – sem nenhum tratamento; sd –cobertura do solo; ac –adubação e calagem; af – sem vegetação; dv – drenagem vertical;

Figura 3.9 - Representação dos dados preditivos de ferro da solução do solo em função do tempo (Período).

3.5 Conclusões

Não houve efeitos significativos dos tratamentos e da profundidade nos valores da condutividade elétrica do solo

Os valores de pH são menores na profundidade de 50cm em todos os tratamentos. Esses valores variaram no tempo, entretanto, o pH da solução na superfície permaneceu mais alto na maior parte do tempo.

Houve uma interação significativa entre os tratamentos e os tempos de coleta, mostrando uma variação dos teores de ferro ao longo do tempo. Essa variação se acentua no período seco, quando os teores de ferro preditivos na solução do solo atingiram valores de até 2,6µg/L.

CAPITULO 4 EFEITO DO ALAGAMENTO DO SOLO NO POTENCIAL REDOX, pH, CE, TEORES DE FERRO E NA ESTABILIDADE DE AGREGADOS

4.1 Resumo

Em solos alagados ocorre a redução do potencial de oxirredução e dos elementos oxidados, em especial, a redução de íons ferrosos (Fe^{3+}) responsáveis pela cimentação da estrutura dos Latossolos Amarelos. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do alagamento nas propriedades da solução do solo e na estabilidade dos agregados do solo. As amostras de um Latossolo Amarelo foram coletadas numa área de cultivo de palma de óleo, em Moju (PA) no ano de 2016. As amostras foram submetidas a análises químicas e mineralógicas e a diferentes períodos de submersão de 0, 11, 22, 33, 60 e 95 dias. As avaliações foram feitas periodicamente quanto ao pH, condutividade elétrica, potencial redox e teores de ferro total na solução do solo; teores de carbono total e da estabilidade dos agregados do solo. Após 33 dias de submersão, a solução do solo apresentou teor de ferro total de $11,95\text{mg/L}^{-1}$, o pH atingiu valor próximo da neutralidade e condutividade elétrica no valor de $800\mu\text{S/cm}^{-1}$. Houve uma diminuição do potencial de oxirredução para -400mv , redução dos teores de carbono total e de 56% do diâmetro geométrico dos agregados. O alagamento por onze dias já reduz a estabilidade dos agregados, o que pode aumentar a susceptibilidade do solo à compactação.

4.2 Fundamentos e estado da arte

4.2.1 Formação da estrutura dos Latossolos

A estrutura do solo é considerada como uma de suas mais importantes propriedades. Ela consiste no tamanho, forma e arranjo de partículas em unidades identificáveis chamadas de agregados do solo, definindo a porosidade total do solo e a distribuição relativa entre macro e microporos (LAL e SHUKLA, 2004). Solos bem agregados possuem maior porosidade e conectividade entre os poros do que os solos pobres em agregação, o que resulta numa mais rápida penetração e percolação da água da chuva, além de favorecer a troca gasosa entre o solo e a atmosfera. Mais do que exercer grande controle sobre o ambiente físico do solo, a estrutura influencia substancialmente a atividade biológica.

A formação da estrutura do solo envolve processos diferentes, porém complementares. O pré-requisito para a agregação é que a argila esteja floclada. Entretanto, a floclação é uma condição necessária, mas não suficiente. A organização das partículas em unidades estrutural ou agregada requer a presença de substâncias cimentantes como óxidos de ferro e alumínio e matéria orgânica coloidal (húmus). O tipo de estrutura particular de determinado solo é consequência dos processos gerais de seu desenvolvimento. Assim sendo, os fatores de formação do solo - material de origem, clima, organismos e relevo - podem todos influenciar o aparecimento de uma dada estrutura (FERREIRA *et al.*, 1999).

Os óxidos de Fe, principalmente hematita e goethita, estão intimamente relacionados com os fenômenos de estruturação e agregação dos solos tropicais, podendo conferir-lhes características desejáveis, tais como maior permeabilidade à água e maior resistência à erosão. Podem, ainda, estar vinculados à outras propriedades dos solos, como a cor, as capacidades de troca catiônica e aniônica (CTC e CTA), fixação de P e de metais pesados, dentre outras. Dentre essas, a cor mostra-se a mais visível e utilizada para caracterizar e diferenciar os solos, em que as cores vermelhas e amarelas resultam da presença de hematita e goethita, respectivamente (CORREA *et al.*, 2008). No caso específico de Latossolos da Amazônia, as substâncias cimentantes são os óxidos de ferro (LEHMANN *et al.*, 2001).

A formação dos agregados do solo começa pela união de partículas individuais, formando um domínio de argila, que, por sua vez, unem-se formando microagregados ($= 0,250\text{mm}$) e assim sucessivamente até a formação dos macroagregados ($>0,250\text{mm}$) (Figura 4.1). Com base nisso, FERREIRA *et al.* (2007) observaram o comportamento dos agregados do solo em relação ao tamanho e comprovaram que os óxidos de ferro são os principais responsáveis pela formação e estabilização estrutural do solo (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Arranjos de partículas de quartzo, caulinita (A), óxidos de Fe (B) e matéria orgânica (C) em agregado de Latossolo caulinitico. Fonte: FERREIRA *et al.* (1999)

A estabilidade desses agregados é um indicador dos processos envolvidos na degradação do solo, pois influencia a infiltração, retenção de água, aeração e resistência à penetração de raízes, selamento e encrostamento superficial de erosão hídrica e eólica; é também o parâmetro que melhor se correlaciona com a erodibilidade do solo. A manutenção de agregados estáveis permite minimizar o salpicamento de partículas e é essencial no manejo do solo. Portanto, o conhecimento da estabilidade de agregados é importante na definição dos indicadores da qualidade do solo (SÁ *et al.*, 2000).

Segundo trabalho realizado por NUNES e CASSOL (2011), sobre a produção de sedimentos entre sulcos de três Latossolos (Latosolo Vermelho alumino férrico, Latossolo Vermelho distroférico e Latossolo Vermelho distrófico). O Latossolo Vermelho distrófico apresentou índice de estabilidade de agregados menor do que os outros solos devido ao maior teor de areia, sobretudo areia muito fina, menor teor de carbono orgânico e menor concentração de Fe_o (baixa cristalinidade) do que os outros solos estudados. O óxido de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o) apesar de estar presente em menores concentrações do que o Fe_d (alta cristalinidade) contribui mais para o aumento da estabilidade dos agregados, pois tem área superficial muito maior e mais reativa do que os óxidos de Fe cristalinos (DÜIKER *et al.*, 2003). Um trabalho de referência sobre a estabilidade dos agregados de Latossolos Amarelos na Amazônia Central é o de LEHMANN *et al.* (2001). Em que ele observou que o principal agente da cimentação e, conseqüentemente, da agregação dos Latossolos Amarelos são os óxidos de ferro e não a matéria orgânica.

Segundo diversos estudos, a questão da estrutura dos solos encontra-se relacionada à formação e estabilidade de agregados. Inclusive, a definição convencional da estrutura do solo como "o arranjo de partículas primárias em agregados", poderia ser substituída por outra mais abrangente envolvendo todos os atributos que afetam os processos do solo, como "as propriedades do solo que regulam e reflete um conjunto contínuo de vários tamanhos de poros interconectados, sua estabilidade, capacidade para reter e transmitir fluidos" (CASSEL e LAL, 1992). A rede de poros que existe entre e dentro dos agregados afeta o movimento de fluidos nos solos, incluindo a infiltração e aeração, bem como o crescimento das raízes e as atividades biológicas, além do acúmulo e decomposição da matéria orgânica (HILLEL, 2003). Nos horizontes mais superficiais do solo, normalmente encontramos a formação de agregados subdivididos em macroagregados (com diâmetros de 0,25 a 5mm) e microagregados (2 a 250 μ m) (HILLEL, 2003; BRADY e WEIL, 2013). Os sesquióxidos, grupo de hidróxidos de ferro e alumínio constituintes da fração argila, são os responsáveis pela coloração predominantemente avermelhada ou amarelada dos solos de regiões tropicais e subtropicais. E a quantidade desses óxidos associada às propriedades de carga de superfície está relacionada à formação de microagregados estáveis, servindo como agentes cimentantes. Em especial, a microagregação prevalece em Nitossolos (Alfisol) e Latossolos (Oxisol). Em geral, os Oxisols contendo argilas cauliníticas, hidróxidos de Fe e Al, e Al trocável tendem a ter estrutura estável e são menos sujeitos à formação de crostas (CASSEL e LAL, 1992; HILLEL, 2003; COELHO, 2016).

Nesses solos, as fontes de cargas variáveis mais importantes são os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), os quais são encontrados em grande quantidade nesses solos por serem produtos finais do processo de intemperismo. As superfícies anfóteras dessas partículas são capazes de adsorver e de servir prótons, dependendo do pH e força iônica da solução, resultando em cargas de superfícies positiva ou negativamente carregadas, ou ainda de carga neutra. Os óxidos de Fe e Al podem possuir dimensões nanométricas e altas superfícies específicas. Mesmo os óxidos cristalizados, como a goethita, podem ter superfície específica de várias dezenas. E quando há substituição de Al por Fe, muito comum em solos tropicais, o baixo grau de cristalinidade desses óxidos gera um aumento na superfície específica e, conseqüentemente, na capacidade de sorção. Goethita e hematita são os mais importantes óxidos de ferro de solos bastante intemperizados.

Em condições ácidas, típicas de solos tropicais, esses óxidos tendem a apresentar cargas de superfície positivas. A matéria orgânica, que pode estar presente em solos superficiais, também pode ser uma fonte de carga variável (SÉGALEN, 1971; QAFOKU *et al.*, 2004).

No balanço final desse sistema, as cargas de superfície positivas geradas nos óxidos de Fe e Al podem ser atraídos eletrostaticamente pelas cargas negativas permanentes das camadas dos argilominerais de filossilicatos (QAFOKU e SUMNER, 2002). A formação de pontes eletrostáticas entre os óxidos e os filossilicatos promove a agregação desses solos, especialmente em solos de cargas variáveis bastante intemperizados (MILLER *et al.*, 1990; QAFOKU e SUMNER, 2002; COELHO, 2016). Dessa forma, a relação entre as forças eletrostáticas das partículas dos minerais e a influência do pH e o potencial de oxirredução da solução do solo pode interferir na estabilidade dos agregados desses solos.

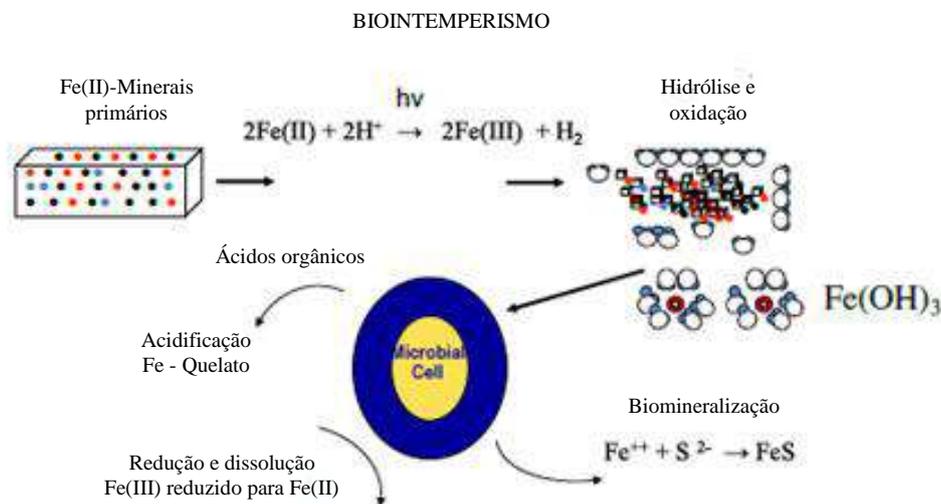
4.2.2 Reação redox em solos alagados

Nas reações de oxirredução, o potencial elétrico está associado com cada uma das semirreações de redução e de oxidação e o potencial medido é aquele obtido no equilíbrio de todos os pares redoxes ativos presentes numa dada amostra. No entanto, para o caso de águas naturais ou sedimento, sabe-se que este equilíbrio dificilmente é atingido, e os valores do potencial são influenciados pelos pares que estão em concentrações mais elevadas (JARDIM, 2014).

Nos solos, ocorrem alterações eletroquímicas após a inundação. Entre as alterações observadas, as mais pronunciadas verificam-se sobre o sistema oxirredutor, no qual o potencial de oxirredução (Eh) apresenta-se como o indicador mais importante do estado de oxidação ou redução desses solos, refletindo a posição de equilíbrio dinâmico ("*steady state*") existente entre os vários sistemas redox (oxigênio, ferro, manganês, nitrogênio, enxofre e carbono) e determinando a direção das reações desses sistemas quando fora do equilíbrio. Esse potencial caracteriza-se através de uma ampla faixa de variações, as mudanças químicas ocorridas no solo e os efeitos sobre o desenvolvimento de cultivos em ambientes anóxicos (CAMARGO *et al.*, 1999). Essas mudanças eletroquímicas servem de partida para o deslocamento do processo de redução resultante da diminuição do oxigênio, levando a alterações significativas no potencial redox, no pH e na condutividade elétrica.

Associados às alterações do Eh, verificam-se aumentos no pH de solos ácidos devido à sua redução, enquanto que, em solos alcalinos, observa-se o decréscimo do pH devido à acumulação mais intensa de CO₂, fazendo com que a maioria dos solos inundados se encontre em valores próximos à neutralidade (CAMARGO *et al.*, 1993). Em decorrência dessas condições, constata-se o aumento do conteúdo de eletrólitos na solução do solo, conduzindo à liberação de cátions presentes nos sítios de troca da matriz coloidal. Desse modo, alguns íons, macro e micronutrientes como o ferro, potássio, o amônio, o zinco e o cobre aumentam a sua concentração no meio e, conseqüentemente, a sua absorção pelas culturas, podendo, em alguns casos de excesso, atingir níveis de toxidez em culturas como o arroz irrigado (CAMARGO *et al.*, 1999).

A liberação de ferro por intemperismo de fontes minerais do solo (Figura 4.2) como os óxidos de ferro, é um processo muito lento, regulado pelo pH e concentração de O₂ e pelos fenômenos de dissolução-precipitação (LINDSAY, 2001). Uma vez mobilizado nos processos de intemperismo, o destino do Fe²⁺ é largamente dependente tanto da reação redox como das condições de pH no ambiente do solo. Em particular, sob condições aeróbicas e a valores de pH entre 5 e 8, o Fe²⁺ (liberado a partir de minerais primários do solo) é facilmente oxidado.



Figuras 4.2 - Diferentes vias de óxidos de ferro e interações com bactérias. Fonte: adaptado de COLOMBO *et al.* (2013).

Sob condições anóxicas, o Fe^{3+} é facilmente reduzido por reações químicas inorgânicas ou por processos microbianos. A intemperização de fontes minerais do solo com uma libertação subsequente de Fe pode ser afetada pelos microrganismos do solo através do seu envolvimento no processo redox, complexação e acidificação. A extensão desses fenômenos depende muito da disponibilidade de moléculas orgânicas (carbono orgânico) das quais os microrganismos obtêm o sustento (COLOMBO *et al.*, 2013). As bactérias podem reduzir Fe^{3+} tanto direta quanto indiretamente (FORTIN e LANGLEY, 2005). No primeiro caso, a redução enzimática de Fe^{3+} em Fe^{2+} gera energia; em contraste, na segunda, a modificação das condições de pH e Eh podem promover a solubilização do ferro a pH baixo e/ou a sua precipitação em condições alcalinas (COLOMBO *et al.*, 2013). Na ausência de oxigênio no solo, óxidos de Fe^{3+} podem ser utilizados como acceptor terminal de elétrons (TEA) durante a respiração microbiana (LOVLEY *et al.*, 2004). Neste processo, as bactérias utilizam hidrogênio e a oxidação do carbono orgânico para a redução de Fe^{3+} . As bactérias redutoras podem utilizar a partir de Fe^{3+} uma grande variedade de óxidos de Fe e minerais de argila.

Os solos alagados com alta concentração de carbono e ferro reduzido tendem a atingir pH acerca de 6,5 em poucas semanas. O aumento de pH em solos ácidos com baixo teor de carbono ou ferro reativo é muito lento, e não tende a chegar a pH 6. A adição de matéria orgânica aumenta o suprimento de elétrons, favorecendo o aumento do pH do solo e, conseqüentemente, reduzindo componentes oxidantes (LINDSAY, 2001). Em condições de anoxia, indo de 0 a -300mV, por exemplo, os receptores de elétrons serão Fe^{3+} , depois SO_4^{-2} e finalmente a matéria orgânica e CO_2 , gerando como produtos de redução o íon Fe^{2+} , sulfeto e metano, respectivamente (JARDIM, 2014).

Em condições de aeração, a oxidação microbiana de minerais contendo Fe^{2+} pode ser acelerada por uma ampla gama de bactérias oxidantes de Fe sob condições de pH ácido / neutro. Os microrganismos que são capazes de oxidar o Fe^{2+} são, geralmente, divididos em dois grupos em função do pH: as bactérias acidófilas e neutrofílicas. Muitos microrganismos aerófilos acidófilos são capazes de acoplar a oxidação de Fe^{2+} à redução do nitrato (Figura. 4.2). Os microrganismos acidófilos tais como *Acidithiobacillus ferrooxidans* têm sido observados como sendo capazes em respiração aeróbia acoplar tanto em Fe^{2+} como em enxofre reduzido (BAKER e BANFIELD, 2003). Em pH neutro, Fe^{2+} está sujeito à rápida oxidação química em relação à concentração de O_2 , e o Fe^{3+} produzido dessa oxidação é rapidamente hidrolisado e precipitado como hidróxido de Fe ou oxihidróxido. Devido à rapidez dessa reação

espontânea, a atividade das bactérias neutrofílicas tem sido geralmente considerada muito lenta (SOBOLEV e RODEN 2004). Recentemente, a presença de precipitados de Fe^{3+} associados à atividade de muitas bactérias neutrofílicas (espécies de *Gallionella* e *Leptothrix*) observadas em uma variedade de solo e água, sugere que a oxidação microbiana de Fe^{2+} compete com a oxidação abiótica de Fe^{2+} (DUCKWORTH *et al.*, 2009).

Segundo MENDONÇA *et al.* (2005), a oxidação do ferro pode ocorrer biologicamente ou quimicamente. A oxidação biológica do ferro ocorre rapidamente em valores de pH entre 2,0 e 4,5, enquanto que a oxidação química nessa faixa de pH é muito lenta, apresentando o seu pH ótimo perto da neutralidade.

Após a oxidação, o íon férrico, que é muito menos solúvel, precipita na forma de hidróxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Em solos oxidados (não alagados) os valores de Eh ($>300\text{mV}$), fazem com o que o oxigênio (O_2) seja o principal receptor de elétrons nos processos de respiração do solo. Quando o valor de Eh situa-se entre $+100$ e $+300\text{mV}$, após o oxigênio ter sido consumido os principais receptores de elétrons serão respectivamente NO_3^- e Mn^{+4} , Fe^{+3} (JARDIM *et al.*, 2014).

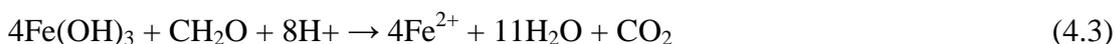
As bactérias obtêm energia a partir de moléculas orgânicas, muitas vezes fornecidas pelas raízes das plantas e derivados da decomposição de matéria orgânica do solo. Portanto, a atividade das bactérias é estritamente dependente da disponibilidade de carbono orgânico. Neste contexto, a interação entre as bactérias e os minerais de ferro parece ser sustentada pela ação de plantas, especificamente exsudação de compostos orgânicos utilizados pelas bactérias como fonte para o seu sustento. A decomposição da matéria orgânica é um dos processos mais importantes relacionados com o ciclo de Fe no ambiente do solo (COLOMBO *et al.*, 2013) e devido à sua baixa taxa de mineralização em condições reduzidas, solos inundados tendem a acumular altos teores de carbono orgânico. Esses teores elevados de matéria orgânica têm forte influência sobre o comportamento estrutural do solo (TABOADA, 2004; 2006).

Em regiões com significativo aporte de matéria orgânica proveniente da vegetação, diversas reações entre a matéria orgânica, o oxigênio, o dióxido de carbono e o Fe podem causar a redução do Fe estabilizado na forma de oxihidróxidos ou complexado com a matéria orgânica (LOVLEY, 2004). Os mecanismos de oxidação da matéria orgânica podem ser realizados através de processos químicos e biológicos. As

Equações 4.1 e 4.2 demonstram os processos de oxidação dos oxihidróxidos de Fe. A matéria orgânica, neste caso, representada na forma de carboidrato (CH₂O), interage com o oxigênio, produzindo dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O). Em seguida, os oxihidróxidos de Fe estabilizados nos solos na forma Fe (OH)₃ são reduzidos através da oxidação da matéria orgânica, liberando o Fe em sua forma reduzida (Fe²⁺), bicarbonato (HCO₃⁻) e água (H₂O). Esse processo é responsável pela transformação do Fe sólido estabilizado Fe (OH)₃ em Fe ferroso, que apresenta grande mobilidade (MULHOLLAND, 2014).



Os processos de oxidação da matéria orgânica contribuem com a formação de um ambiente tipicamente anóxico. Em tais condições, um mecanismo considerado de extrema importância geoquímica na mobilidade do Fe em solos, sedimentos aquáticos e demais ambientes subsuperficiais é a redução dissimilatória do Fe (LOVLEY, 2004). Nesse processo, os microrganismos oxidam compostos orgânicos (*e.g.*, processo de fermentação) através da transferência de elétrons ao ferro férrico externo, reduzindo-o a sua forma ferrosa, sem que ocorra sua assimilação, porém com a geração de energia para o organismo (MULHOLLAND, 2012). Entre as diversas formas de Fe capazes de reduzir por tais processos destacam-se a hematita, goethita, os óxidos de Fe amorfos ou fracamente cristalizados e o Fe complexado a ligantes orgânicos (Figura 4.2). Primeiramente, a matéria orgânica é hidrolisada em componentes menores como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos, e compostos aromáticos através da atividade de enzimas hidrolíticas que são produzidas por uma grande variedade de microrganismos. Subsequentemente, esses produtos intermediários podem ser utilizados para a redução dissimilatória do Fe férrico (LOVLEY, 2004). De maneira geral, a redução dissimilatória do Fe mediada por microrganismos pode ser expressa pela Equação 4.3 (RAINSWELL e CANFIELD, 2012).



Foi realizado um trabalho por MUNIZ *et al.* (2011) sobre dinâmica do potencial redox em condições de alagamento no solo da área de estudo. Esse trabalho apresentou uma estabilização do potencial redox no 11^a dia até o 58^a dia de experimento, quando

foram adicionados 10 gramas de glicose reduzindo o potencial redox para valores abaixo de -200mV, indicando que o solo pode apresentar valores reduzidos e o teor de carbono é o fator limitante para diminuição da potencial oxirredução neste solo.

Existe uma sequência de processos redutivos em solo inundado, como uma função da diminuição do potencial redox do solo (Eh), e o par redox predominante participa de cada fase de redução (TABOADA, 2004). Esta sequência é descrita na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Sequência do processo redutivo.

Intervalos de Eh (mV)	Condições de oxirredução	Reações
400 < Eh	Oxidado	Predomínio de O ₂ e materiais na forma oxidada
400 ≥ Eh ≥ 200	Fracamente reduzido	O ₂ , NO ₃ ⁻ e Mn ⁴⁺ reduzido
200 ≥ Eh ≥ -100	Moderadamente reduzido	Fe ²⁺ reduzido e presença de substâncias orgânicas redutoras.
-100 > Eh	Fortemente reduzido	CO ₂ e H ⁺ reduzido

Fonte: CAMARGO *et al.* (1999).

Em solos mal drenados, nos quais as condições anóxicas são frequentes e presentes por longos períodos de tempo, a drenagem da água após um período de submersão, pode resultar em um aumento da disponibilidade de oxigênio com uma oxidação rápida de Fe²⁺. Essa reação redox favorece, por sua vez, a formação de um hidróxido ordenado, como o ferrihidrita ou óxidos cristalinos como lepidocrocita, goethita e magnetita (LIU *et al.*, 2006). As diferenças de redutibilidade entre os vários óxidos de Fe³⁺ (Figura 4.3) podem ser explicadas por diferenças na área superficial reativa e seguem a mesma ordem que a ordem de reatividade desses minerais com relação aos processos de sulfidicação, que é ferrihidrita (amorfo) > lepidocrocita > magnetita > goethita > hematita. Embora a redutibilidade dos óxidos de Fe³⁺ cristalinos seja muito menor que a dos óxidos de Fe³⁺ amorfos, a contribuição das fases cristalinas para a redução total do Fe pode ser altamente significativa, até 10-20% em alguns solos (JAKOBSEN e POSTMA, 1999).

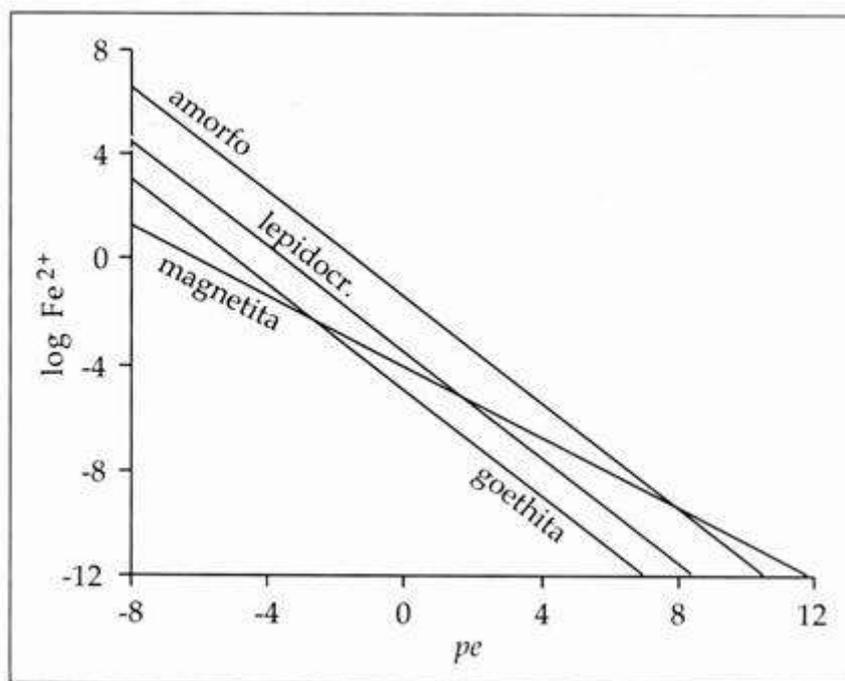


Figura 4.3- Atividade do Fe^{2+} em solução de equilíbrio com diferentes óxidos na fase sólida, em função do potencial redox. Fonte: adaptado de LINDSAY (2001).

As alterações das propriedades físico-químicas que acompanham a inundação do solo são determinantes para o manejo e sustentabilidade deste ambiente. As mudanças são produzidas através de processos de redução biológica resultantes da depleção de oxigênio, com conseqüente diminuição no potencial "redox". Em solos ácidos e alcalinos, verificam-se o aumento e diminuição do pH, respectivamente, bem como um aumento na condutividade elétrica e reações de troca iônica.

Muitos solos alagados são o resultado de práticas agrônômicas específicas de manejo do solo. Essa mudança induzida pelo manejo transforma um ambiente oxidante (óxico) em hipóxico ou mesmo anóxico, que resulta em variações temporais e espaciais (verticais e horizontais) das reações redox que, por sua vez, afetam a dinâmica de constituintes orgânicos e minerais (CHENG *et al.*, 2009). A translocação do Fe também pode ocorrer em várias direções e por diferentes processos (incluindo o eluviação e iluviação) a partir da redução de Fe^{3+} (MULHOLLAND *et al.*, 2014). Nesta última reação, também o Fe^{3+} nas estruturas cristalinas de minerais primários pode ser reduzido pela atividade microbiana (COLOMBO *et al.*, 2013).

4.3 Material e Métodos

O local de coleta das amostras foi no mesmo município de Moju (PA), numa área sob cultivo de palma de óleo no ano de 2015. O solo do local foi classificado como Latossolo Amarelo, distrófico, textura média. As amostras de solo foram coletadas de 0 a 20cm de profundidade em 20 diferentes pontos aleatórios e homogêneas para constituírem uma amostra composta. Essas amostras foram transportadas em caixas rígidas para se manter a estrutura dos agregados.

A caracterização química do solo consistiu na determinação dos parâmetros: pH (H₂O), teores de Ca, Mg², Al³⁺, (Al³⁺+H⁺) trocáveis, teores disponíveis dos elementos P, Na, K, Fe, Zn, Mn, Cu extraídos com solução extratora Melich I e Fe. Foram também determinadas às frações areia, silte e argila e a caracterização mineralógica da fração argila por difração de raios-X (DRX). As análises foram realizadas de acordo com as metodologias descritas por CALDERANO *et al.* (2009) e DONAGEMMA *et al.* (2011).

O experimento sobre os efeitos do alagamento foi conduzido nos laboratórios da Embrapa Solos localizado no Rio de Janeiro – RJ. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em malhas de 4,00 e 2,00mm de abertura, sendo que a porção que fica retida entre essas duas malhas foram utilizadas para o ensaio de estabilidade de agregados.

Foram pesados 25g de agregados, que foram colocados em béqueres nos quais foram adicionados 75ml de água destilada até a completa submersão dos agregados. Os tratamentos foram constituídos por seis períodos de alagamento: 0, 11, 22, 33, 60 e 95 dias.

A avaliação da condutividade elétrica (CE), pH e potencial de oxirredução (Eh) foi realizada na solução que estavam os agregados submersos (solução do solo), totalizando 19 medições na suspensão agregado-solução das amostras estudadas. Para medição da condutividade elétrica, utilizou-se um eletrodo de platina (THERMO, USA) calibrado com solução-padrão de 1.412μS/cm¹. Para a medição de pH, utilizou-se eletrodo combinado de Ag/AgCl calibrado com as soluções padrão de pH 4, pH 7 e pH 10. Para a medição do potencial de oxirredução, utilizou-se potenciômetro com eletrodo de metal combinado e calibrado com solução-padrão de 229mV.

Foram determinados os teores de carbono total dos agregados submetidos ao período de alagamento. Para a análise, os agregados foram divididos em dois grupos de amostras com granulometria diferentes, sendo classificadas como microagregado

(0,125mm-0,25mm) e macroagregado (0,5mm-2,0mm). As amostras foram analisadas em 0, 11, 22, 33 e 95 dias de alagamento. A determinação do carbono total foi realizada em 3g da amostra de agregados, sendo realizada através do analisador elementar de carbono, modelo multi EA 2000 Elemental Analyzer (Analytik Jena Ag, Alemanha).

O método empregado para a análise quantitativa de ferro total na suspensão agregado-solução foi o colorimétrico, usando o reagente 1,10-fenantrolina (phen), seguindo os procedimentos descritos por APHA (2005).

A análise dos agregados foi realizada no aparelho de oscilação vertical por um período de 15 minutos com 27 oscilações por minuto. Foi utilizado um conjunto de peneiras de malha de 4,00; 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125mm. O material retido em cada peneira foi colocado em estufa a 105°C durante 48 horas e posteriormente pesado, seguindo a metodologia descrita por CESÁRIO *et al.*, 2012.

Os resultados da estabilidade de agregados foram expressos em diâmetro médio geométrico (DMG), estimados através da Equação 4.4 na forma:

$$DMG = e^{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m} \cdot \ln(D_i)} \quad (4.4)$$

onde: n é o número de classes de tamanho de agregados, m_i é a massa da classe i, m é a massa total e D_i é a média aritmética dos limites inferior e superior da classe.

Os resultados foram submetidos ao teste de Bartlett para análise de homogeneidade de variância e ao teste Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos; quando atendidas as condições de homogeneidade de variância e normalidade, foram realizadas análise de variância e testes de médias (teste de Tukey). Foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre os teores de carbono total, ferro total e o DMG. Para todas as inferências estatísticas, considerou-se nível de significância de <5 % para considerar uma diferença significativa. As análises estatísticas foram realizadas no programa R 3.13 (*R Development Core Team*, 2016).

4.4 Resultados e Discussão

O solo estudado apresentou textura média, com acidez elevada e reduzidos teores de nutrientes (Tabela 1). O fracionamento do ferro mostrou teores de 2,80g/kg⁻¹ de Fe₂O₃ cristalino (62% de Fe) e 1,69g/kg⁻¹ de Fe₂O₃ amorfo (38% de Fe). A composição granulométrica (Tabela 4.2) mostrou predomínio da fração areia e baixos teores de silte e argila, apresentando uma relação silte/argila em torno de 0,5.

Tabela 4.2 - Propriedades químicas e granulométricas na camada de 0-20cm de Latossolo Amarelo, distrófico, textura média em Moju (PA).

pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	t	T	V	m
H ₂ O	(mg dm ⁻³)					(cmol _c dm ⁻³)					(%)
4,6	19	37	4,4	0,30	0,16	0,84	4,70	1,41	5,26	10	61
C	M.O.	Fe	Zn	Mn	Cu	Fe _d	Fe _o	Fe _o /Fe _d	AR	SI	AG
(g kg ⁻¹)		(mg dm ⁻³)			(g kg ⁻¹)					(%)	
11,4	19,7	249	2	5	1	4,49	1,69	0,38	76	8	16

Obs: V - Índice de saturação por bases; m - Índice de saturação por alumínio; t - CTC efetiva; T - CTC potencial; Matéria Orgânica (M.O) = C (carbono orgânico) x 1,724 - Método - Walkley-Black, Fe_o - ferro extraído por oxalato de amônio; Fe_d - ferro extraído por ditionito; AR - Teor de areia; SI - Teor de silte; AG - Teor de argila.

A assembleia mineralógica da fração argila revelou predominância da caulinita e traços de vermiculita com hidróxi-Al entre as camadas, quartzo e mica. Entre os óxidos, há predomínio da goethita (Figura 4.4B). Essa assembleia mineralógica é característica de solos de terra firme da região amazônica brasileira (LIMA *et al.*, 2005; MARQUES *et al.*, 2004).

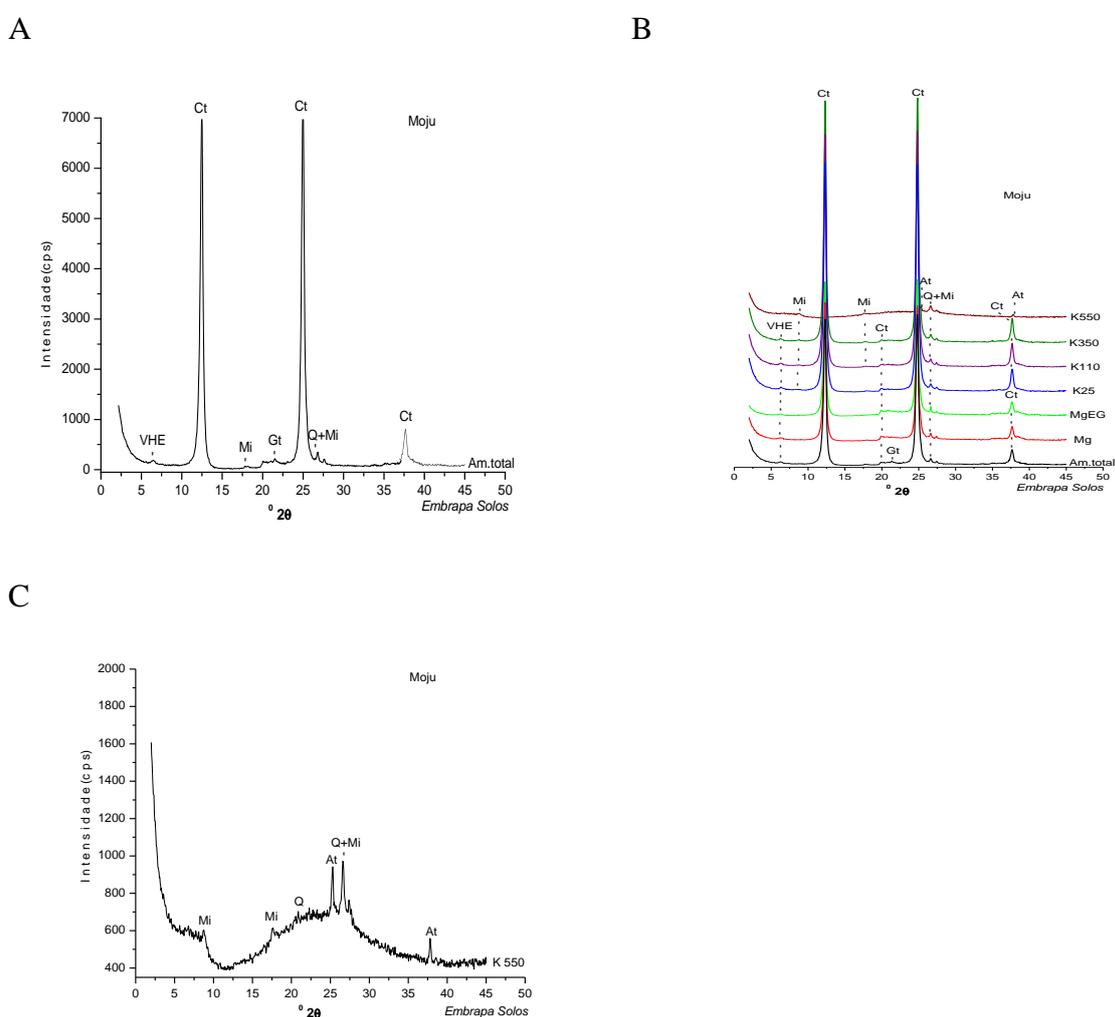
Não foi detectada a presença de gibsitita na fração argila (Figura 4.4C). A ausência de gibsitita pode ser devido ao conteúdo elevado de silício na solução do solo (IRION, 1984). ROSE *et al.* (1983) e LUCAS *et al.* (1993) observaram que a floresta Amazônica recicla quantidades significativas de elementos químicos, particularmente silício e alumínio. Essa reciclagem, segundo esses autores, seria um dos responsáveis para manter a estabilidade da caulinita no solo. Por outro lado, a ausência de gibsitita pode ser atribuída a um processo de dessilicificação desse solo, com consequente concentração de alumínio e ferro (CORNU *et al.*, 1998).

Não foi detectada presença de hematita (Figura 4.4A), provavelmente devido ao clima tropical úmido e vegetação de floresta, estando o solo submetido a processos de hidratação, redução e lixiviação, com transformação da hematita em goethita

(BEAUVAIS e TARDY, 1993). Grande parte dos Latossolos Amarelos da região Amazônica é desprovida de hematita na fração argila (IRION, 1984; LIMA *et al.*, 2005).

A goethita é o mineral de ferro predominante, sendo formada por processos abióticos e bióticos, e representa os óxidos de ferro típicos de pedoambientes anaeróbicos sazonais (SCHWERTMANN e KÄMPF, 1983).

O ferro presente na goethita apresenta alta estabilidade, sendo pouco solúvel em comparação ao ferro amorfo, determinado pelo oxalato (Tabela 4.2), que possui baixa estabilidade e alta solubilidade que rapidamente migra para a solução do solo na forma de Fe^{+2} (PONNAMPERUMA *et al.*, 1972; COLOMBO *et al.*, 2013).



Obs: VHE-vermiculita com hidróxi-Al entre camadas; Mi-mica; Ct-caulinita; Gt-goethita; Q-quartzo; At-anatásio.

Figura 4.4 - Difratoogramas de Raios-X da fração argila da amostra total (A), amostra total e amostras submetidas aos tratamentos (B) e amostra desferri-ficada e saturada com potássio aquecida a 550 °C (C).

A evolução da CE em função do tempo de submersão (Figura 4.5A) mostrou um aumento de CE até valores próximos de $1200 \mu\text{Scm}^{-1}$ ao fim de experimento (95 dias).

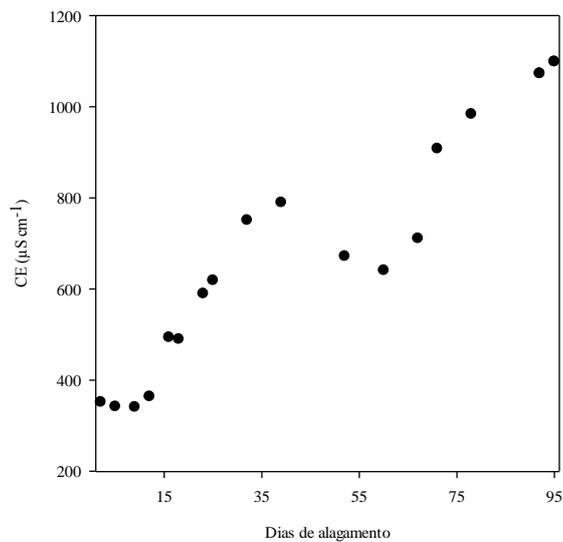
O aumento da CE deve-se a mineralização da matéria orgânica e solubilização de minerais presentes, como o Fe nos agregados do solo para a solução através de microrganismos anaeróbios obrigatórios e facultativos (LOVLEY *et al.*, 2004; COLOMBO *et al.*, 2013).

A evolução do pH em função do tempo de submersão em agregados (Figura 4.5B) mostrou um aumento do pH até valores próximos da neutralidade (7,0) no 35° dia de experimento. Isso provavelmente ocorre devido às bactérias utilizarem o hidrogênio para a redução de Fe^{3+} contido nos agregados do solo (LOVLEY *et al.*, 2004). Após o 35° dia de experimento, houve uma diminuição do pH. Isso, provavelmente, deve-se ao efeito de tamponamento do solo, em que os sistemas reduzidos do ferro, manganês e do ácido carbônico, cujas reações de oxirredução envolvem a produção dos íons OH^- (PONNAMPERUMA *et al.*, 1972).

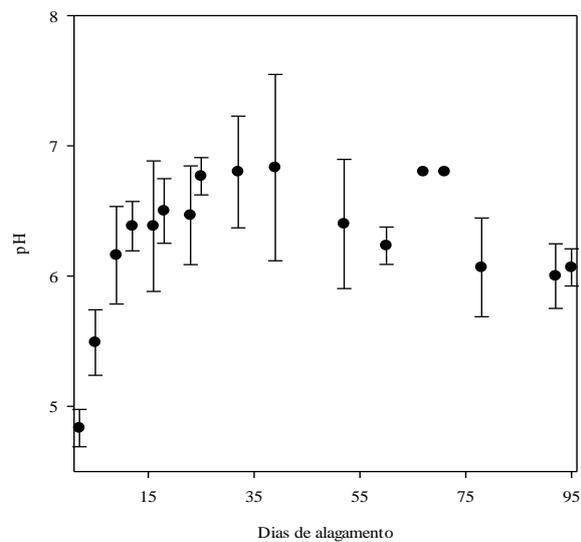
A evolução do potencial de oxirredução em função do tempo de submersão em agregados ao longo do tempo (Figura 4.5C) mostrou uma diminuição do potencial de oxirredução ao valor próximo de -200mv ao final do experimento, indicando um ambiente altamente redutor (CARLOS *et al.*, 2015).

Esse aumento no pH ocorre por causa de um efeito de tamponamento do solo, onde a alta concentração de Fe^{+2} e o pH próximo da neutralidade devem ter provocado um aumento do potencial de oxirredução (JARDIM *et al.*, 2014).

A



B



C

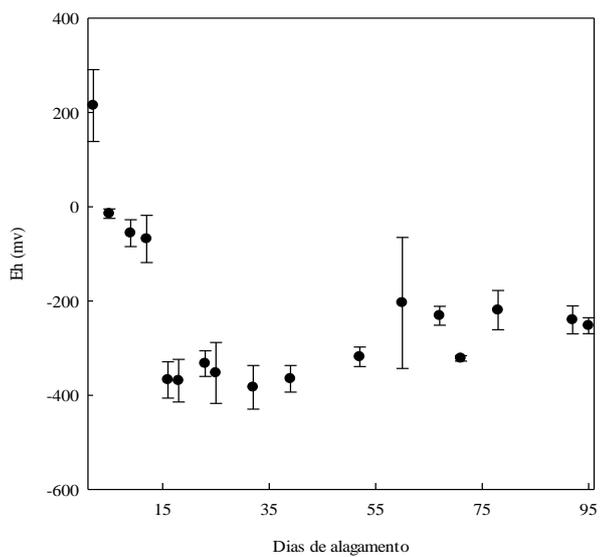


Figura 4.5 - Representação dos dados de condutividade elétrica (A), pH (B) e potencial de oxirredução (C) em função de 95 dias de alagamento em agregados de um Latossolo Amarelo, textura média (Moju – Pará).

Os teores de carbono total, durante o período de alagamento, indicaram que houve somente diminuição significativa de carbono total até o 11^a dia de alagamento (Tabela 4.3), isso, provavelmente, é devido ao carbono do macroagregado ser mais suscetível a ação microbiana e estar em maior concentração em comparação aos microagregados (SMITH *et al.*, 2014). A diminuição do teor de carbono se deve a sua utilização das bactérias anaeróbias facultativas e obrigatórias em condições anaeróbias (LOVLEY, 2004), influenciando a diminuição do potencial de oxirredução no meio (FIA *et al.*, 2017).

Tabela 4.3 - Teores de carbono total nos agregados de um Latossolo Amarelo, distrófico, textura média em Moju(PA).

Dias de alagamento	Microagregado	Macroagregado
	(%)	
0	3,61 Ba	12,76 Aa
11	3,52 Ba	5,66 Ab
22	3,58 Ba	6,26 Ab
33	3,29 Ba	5,50 Ab
95	3,44 Ba	6,38 Ab

Obs: Os valores médios (n = 3). Letras seguidas de mesma letra (maiúsculas na linha e minúsculas na coluna) não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p <0,05).

Os dados dos teores de ferro total (FT) atenderam as pressuposições quanto à homogeneidade de variância e normalidade dos resíduos, possibilitando serem submetidos à análise da variância e teste de comparação de médias.

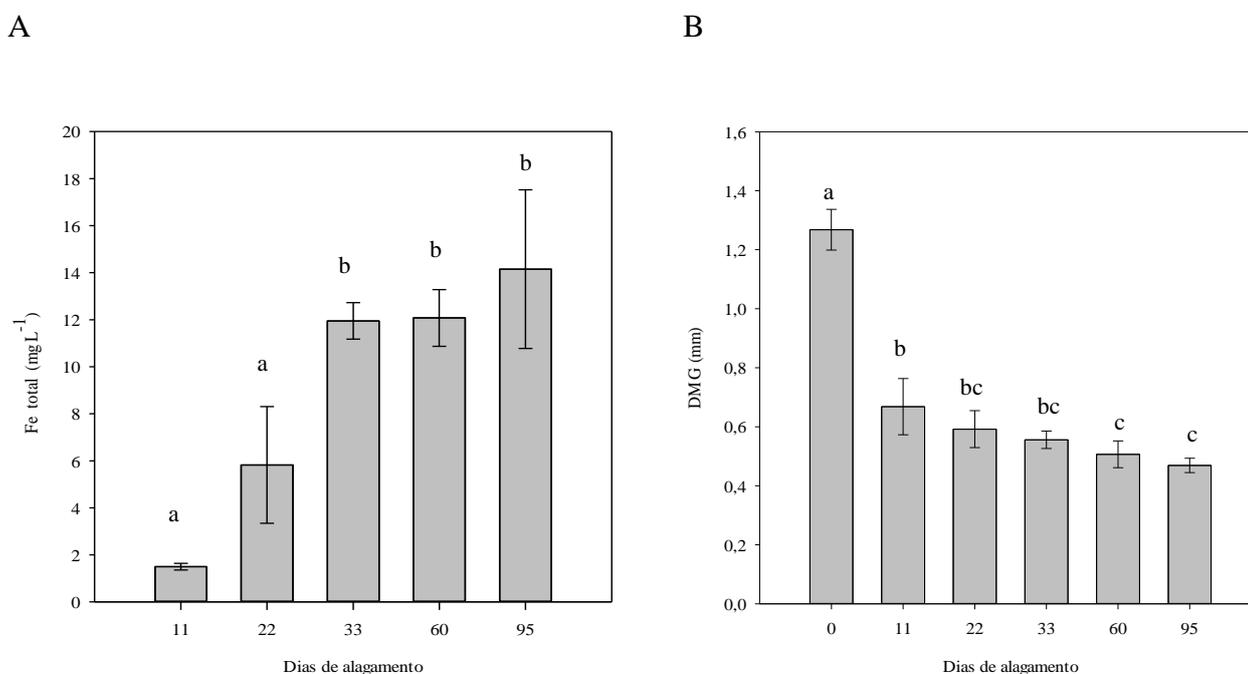
Não houve diferença entre os teores de FT entre o 11^o e 22^o dia de alagamento (Figura 4.6A). Posteriormente, houve um aumento significativo dos teores de FT no sobrenadante a partir do 33^o dia de alagamento, obtendo o valor médio de 11,9mgL⁻¹. Após esse período, houve uma estabilização nos teores de ferro total até o final do experimento.

LIMA *et al.* (2005), também estudando Latossolos Amarelos distróficos da Amazônia, verificou que aos 183 dias de inundação a concentração de ferro se estabilizou em valores próximos de 20mgL⁻¹. Entretanto, esses autores observaram uma grande elevação da concentração no período inicial do alagamento. Esse aumento dos teores de ferro no período inicial não foi observado neste estudo, podendo estar

relacionado com alguma diferença mineralógica entre os minerais de ferro ou a disponibilidade de outros minerais a ser reduzidos.

Os dados das avaliações do diâmetro médio geométrico (DMG) atenderam as pressuposições quanto à homogeneidade de variância e normalidade dos resíduos, possibilitando serem submetidos à análise da variância e teste de comparação de médias.

O DMG reduziu significativamente para o valor médio de 0,67mm, aproximadamente metade do diâmetro inicial (1,27mm) com onze dias de alagamento (Figura 4.6). Entre o 11º e 33º dia de alagamento, o DMG manteve-se estável com o valor de 0,6mm, no período final do experimento, o DMG apresentava o valor de 0,47mm.



Obs: Os valores médios (n = 4) ± erros padrão. Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Figura 4.6-Teores de ferro total na solução (A) e a estabilidade de agregados (B) por um período de 95 dias de um Latossolo Amarelo submerso em condições de laboratório

O DMG e o teor de ferro total apresentaram uma forte correlação negativa ($r = -0,96$), o que corrobora a hipótese que a migração do ferro para a solução desestabiliza os agregados. Isso, provavelmente, deve-se a redução do Fe^{3+} nas estruturas cristalinas de mineral primário reduzido pela atividade microbiana (COLOMBO *et al.*, 2013).

Segundo o trabalho realizado por LEHMANN *et al.* (2001), o principal agente cimentante dos agregados do Latossolo Amarelo estudo são os óxidos de ferro. Os dados encontrados neste trabalho parecem corroborar esta afirmativa.

O DMG e o carbono total apresentaram uma forte correlação positiva ($r = 0,95$), indicando que a diminuição do carbono afeta a agregação dos Latossolos Amarelos Amazônicos.

Os microrganismos oxidam compostos orgânicos (*ex.*, fermentação) através da transferência de elétrons, ao ferro férrico externo, reduzindo-o a sua forma ferrosa (JARDIM *et al.*, 2014). Entre as diversas formas de Fe capazes de serem reduzidos por tais processos, destacam-se a goethita, e os óxidos de ferro amorfos ou fracamente cristalizados (COLOMBO *et al.*, 2013).

4.4 Conclusões

O solo da região estudada apresentou em sua caracterização: uma elevada acidez e textura média e na sua fração argila uma predominância de caulinita, e goethita como mineral de ferro. Não foram detectadas a presença de hematita e gibsitita.

A condutividade elétrica aumenta durante o período de alagamento (95 dias), indicando que íons dos agregados migram para a solução.

O pH do solo aumenta após o período inicial do alagamento, atingindo valores próximos a neutralidade, com uma posterior redução, mas acima dos valores encontrados no solo aerado.

O potencial redox do solo diminui durante o período de alagamento, formando um ambiente altamente redutor.

O alagamento por um período de 11 dias promove a diminuição do carbono total contido nos macroagregados.

O ferro contido nos agregados de Latossolos Amarelos com textura média migra para a solução do solo em condições de alagamento.

Há uma elevada correlação negativa entre o ferro na solução do alagamento e o DMG dos agregados nos Latossolos Amarelos.

O alagamento por um período de 11 dias promove a desestabilização dos agregados dos Latossolos Amarelos com textura média goethíticos.

CAPITULO 5 MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO HÍDRICO DO SOLO EM TRÊS SISTEMAS DE USOS

5.1 Resumo

O estudo consiste na modelagem da dinâmica do potencial da água no solo de forma direta e inversa utilizando o programa HYDRUS-1 D. Teve como objetivo parametrizar um modelo contínuo para avaliar a dinâmica da água no solo (potencial) em três sistemas de uso da terra em um Latossolo Amarelo, distrófico, textura média, localizado no município de Mojú – PA. O foco na discussão dos resultados foi realizado na dinâmica do potencial de água no solo, em que há dados avaliados no campo para comparação como as previsões do modelo na área sem vegetação e com cobertura de palma de óleo. A modelagem da dinâmica do potencial de água no solo em áreas sem vegetação e com cultivo de palma de óleo no Latossolo Amarelo apresentou um bom desempenho quando o solo se apresenta próximo da saturação. Entretanto, valores de potenciais mais elevados observado nos períodos secos o modelo não conseguiu representar satisfatoriamente o observado no campo. Não houve diferenças de desempenho entre a modelagem direta e inversa. No período estudado o solo tanto na área com cultivo de palma de óleo como na área sem vegetação permaneceu com baixos potenciais (próximos da saturação) por longos períodos.

5.2 Fundamentos e estado da arte

Segundo SCORZA JUNIOR (2010), a interação de todos os processos que influenciam o fluxo de água no solo é bastante complexa, e uma maneira de superar essa complexidade e integrar todos os processos é a utilização de ferramentas de modelagem e simulação. Ele também menciona duas importantes vantagens do uso de modelagem em comparação com as avaliações experimentais isoladas, que são: I) possibilidade de investigar o efeito das condições climáticas por meio de simulações de vários anos e, assim, evitando experimentos de longa duração, que são caros e demorados; II) a modelagem permite a integração do conhecimento real dos processos e, assim, pode ser útil na identificação de lacunas e prioridades de pesquisa.

A obtenção de estimativas da dinâmica da umidade volumétrica, assim como do potencial de água na zona vadosa e nas respectivas taxas de fluxos e recarga de água subterrânea, é crítica em muitas aplicações hidrológicas, ambientais e agrícolas, como o

manejo de águas superficiais e subterrâneas, remediação de solos contaminados irrigação e drenagem e manejo de solos com má drenagem (água estagnada).

A zona vadosa é definida como a camada entre a superfície da terra e o lençol freático permanente (sazonal). Enquanto os poros entre os grãos de sólidos estão totalmente preenchidos com água na zona saturada (águas subterrâneas), os poros na zona não saturada (vadosa) são apenas parcialmente preenchidos com água, com a parte restante do espaço dos poros ocupado pela fase gasosa. A zona vadosa normalmente só é parcialmente saturada, embora possa haver regiões saturadas, por exemplo, quando ocorre uma acumulação de água acima de uma camada de textura-fina (argila) de baixa permeabilidade ou uma zona saturada por trás de uma frente de infiltração durante ou após um evento de precipitação de alta intensidade (ŠIMŮNEK e VAN GENUCHTEN, 2008; COELHO, 2016)

As previsões de fluxo de água na zona vadosa do solo que contribuem para a recarga de água subterrânea dependem da disponibilidade de conjuntos de dados relacionados com a estrutura, composição do solo e do clima e vegetação no ambiente. Os dados climáticos são frequentemente obtidos de estações meteorológicas em escalas de tempo diárias, semanais, mensais ou mesmo anuais. As simulações que utilizam frequência mensais ou anuais não consideram eventos de precipitação de alta intensidade (ALLAN e SODEN, 2008) e, como tal, podem subestimar as taxas de recarga de água subterrânea (PORTMANN *et al.*, 2013; WADA *et al.*, 2014; BATALHA, 2016).

Embora existam muitos métodos para calcular a recarga (SCANLON *et al.*, 2002, NGATCHA *et al.*, 2007), uma abordagem cada vez mais comum demodelar o fluxo de água no solo variavelmente saturado é através de dados de precipitação, escoamento, evaporação, captação de água pelas raízes, armazenamento de água no solo, drenagem e recarga (JIMÉNEZ-MARTINEZ *et al.*, 2009; ASSEFA e WOODBURY, 2013; LETERME *et al.*, 2012; BATALHA, 2016), como é mostrado na figura 5.1.

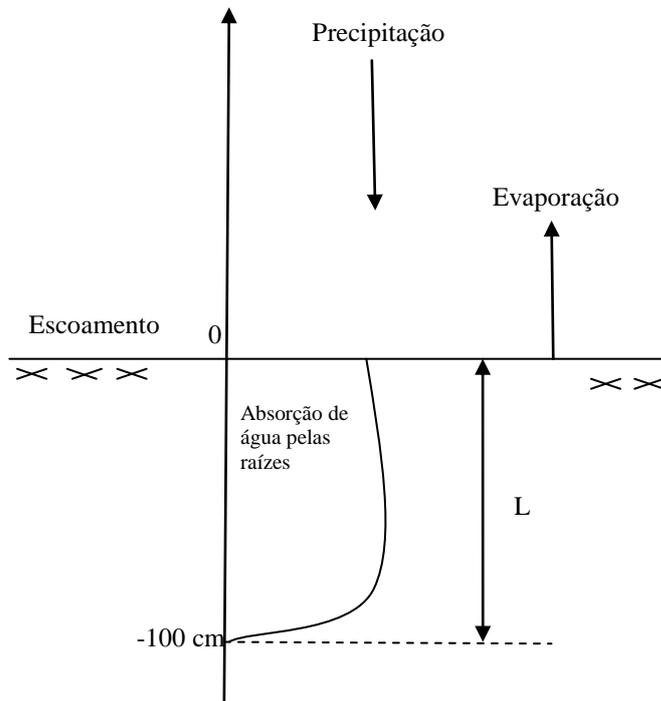


Figura 5.1 - Esquema do modelo conceitual unidimensional utilizado para calcular o fluxo para a zona vadosa e recarga.

O fluxo de água no solo, em meio poroso rígido variavelmente saturado, é geralmente formulado em termos da Equação de continuidade, na forma (Equação 5.1):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial J_w}{\partial z} - S \quad (5.1)$$

onde:

θ - conteúdo volumétrico de água (L^3L^{-3});

t - tempo (T);

z - coordenada espacial (L);

J_w - fluxo volumétrico (LT^{-1});

S - fonte/sumidouro ($L^3L^{-3}T^{-1}$), para explicar a absorção de água pelas raízes das plantas (evapotranspiração).

Para a formulação das equações governantes para diferentes tipos de fluxo de água (uniforme ou preferencial), combina-se a equação de continuidade com uma ou várias equações que descrevem a densidade do fluxo volumétrico (J_w). Tradicionalmente, a equação de RICHARDS (1931) descreve o fluxo variavelmente

saturado em solos, combinando a equação de Darcy-Buckingham para o fluxo de fluido com a equação de balanço de massa (MALLANTS *et al.*, 2011). A equação de Darcy-Buckingham (Equação 5.2) que descreve o fluxo de água para um solo com saturação variável, pode ser representada na forma:

$$J_w = -K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \quad (5.2)$$

onde:

K - condutividade hidráulica não saturada do solo (LT^{-1});

H - potencial de água no solo (L);

Dessa forma, a equação de Richards (Equação 5.3) que descreve o fluxo de água na zona variavelmente saturada é expressa:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(h) \quad (5.3)$$

onde:

Θ - umidade volumétrica do solo (L^3L^{-3});

S - termo fonte ou sumidouro de água no solo ($L^3L^{-3}T^{-1}$);

T - tempo (T);

Z - distância na direção do fluxo (L);

A absorção de água pelas raízes foi acrescentada na equação de Richards, caracterizada pelo termo “S”, sendo definido como o volume de água retirado de um volume unitário de solo por unidade de tempo. FEDDES *et al.* (1978) definiu S pela Equação 5.4:

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (5.4)$$

Onde a resposta ao estresse hídrico pela absorção da água pela raiz é em função de α (h), que é uma função adimensional prescrita pela pressão ($0 \leq \alpha \leq 1$), e S_p é a taxa de captação potencial de água (T^{-1}).

Segundo FEDDES *et al.* (1978) a absorção de água é assumida como sendo zero próximo à saturação. Para $h < h_4$ (pressão do ponto de murcha), a absorção de água é também assumida como sendo zero. A captação de água é considerada ótima entre as pressões h_2 e h_3 , enquanto que, para a pressão entre h_3 e h_4 (ou h_1 e h_2), a absorção de água diminui (ou aumenta) linearmente com h (Figura 5.2). A variável S_p é igual à taxa de captação de água durante períodos sem estresse hídrico quando $\alpha(h) = 1$.

van GENUCHTEN (1987) expandiu a formulação de Feddes incluindo o estresse osmótico como se segue na Equação 5.5

$$S(h, h_\phi) = \alpha(h, h_\phi) S_p \quad (5.5)$$

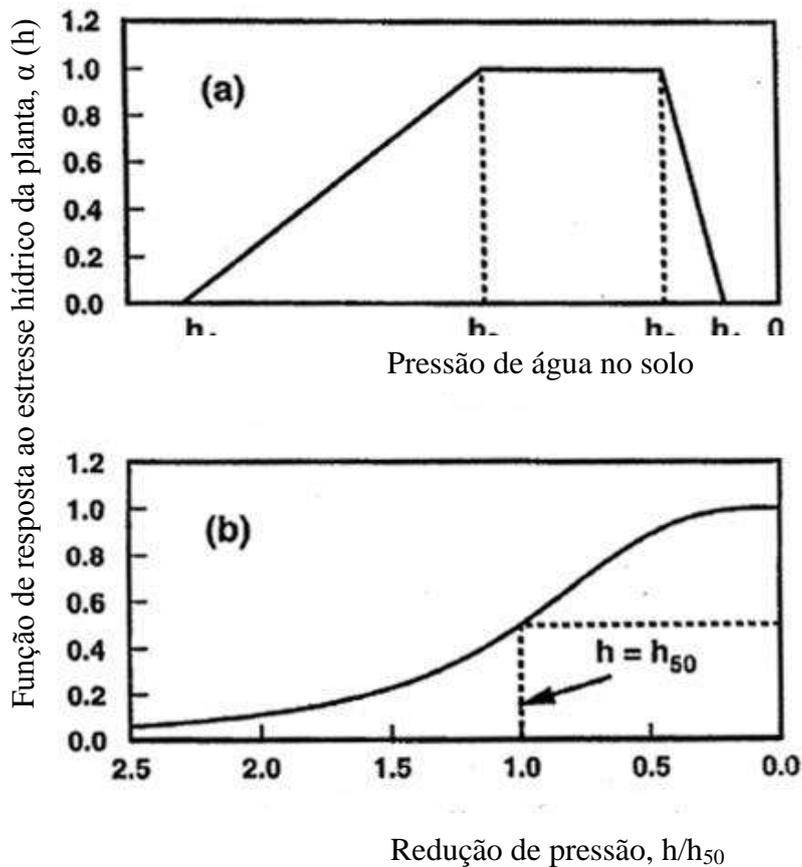


Figura 5.2 - Esquema da função de resposta ao estresse hídrico da planta, $\alpha(h)$, conforme utilizado por a) FEDDES *et al.* (1978) e b) VAN GENUCHTEN (1987).

A solução da equação de Richards requer o conhecimento das funções hidráulicas de solo não saturado, a relação entre o conteúdo volumétrico (θ) e o potencial (h) da água no solo, que é determinada experimentalmente, sendo denominada de curva de retenção de água (SWCC – *Soil Water Characteristic Curve* em inglês). O potencial da água no solo (h) é expresso em coluna de água (cm) em estudos hidrológicos e pela pressão de sucção equivalente (kPa) em estudos de engenharia geotécnica.

A relação entre a condutividade hidráulica (K) e o potencial (h) também é uma propriedade do solo, geralmente expressa por uma função teórica. É obtida da SWCC (Mualen), sendo raramente determinada experimentalmente devido à dificuldade operacional dessas determinações.

Um dos modelos mais utilizados para ajustar os dados que relacionam (θ) em função de (h) é o proposto por van GENUCHTEN (1980), que é um modelo de distribuição unimodal dos poros e condição de equilíbrio físico. Existem modelos mais

complexos considerando distribuição bimodal dos poros (DURNER *et al.*, 1994) e condição de não equilíbrio tanto físico (água móvel - imóvel) quanto químico.

O modelo matemático comumente usado para a curva de retenção são as equações de van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980) para sistemas de porosidade unimodal (Equação 5.6):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m \quad (5.6)$$

onde:

S_e - coeficiente de saturação efetiva;

θ - conteúdo volumétrico de água no solo ($L^3.L^{-3}$);

θ_r - conteúdo volumétrico de água residual do solo ($L^3.L^{-3}$);

θ_s - conteúdo volumétrico de água na saturação do solo ($L^3 L^{-3}$);

h - carga de pressão hidráulica (L);

α , n e m - parâmetros de ajuste da curva ou coeficientes empíricos.

A equação de retenção de van GENUCHTEN (1980) é acoplada ao modelo de MUALEM (1976), resultando na equação de predição da condutividade hidráulica (K) em função de (h) (Equação 5.7):

$$K(h) = K_s S_e^1 \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad m = 1 - 1/n, \quad n > 1 \quad (5.7)$$

onde:

S_e , m - definidos anteriormente;

L - parâmetro de conectividade de poros normalmente adotado com o valor de 0.5, conforme MUALEM (1976).

A solução numérica das equações de fluxo de água no solo precisa da condição inicial do solo e das condições de contorno.

A condição de contorno ao longo da superfície do solo pode ser determinada por condições variáveis ou fixas de pressão, fluxos ou condições meteorológicas variáveis.

A condição de contorno na parte inferior do perfil do solo pode ser assumida como sendo uma condição de drenagem livre, fluxo variável do lençol freático e “seepage”.

5.2.1 Estimativa das taxas de evapotranspiração

A estimativa das necessidades hídricas das culturas é feita com base nas perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera através dos processos de evaporação e transpiração. De acordo com ALLEN *et al.* (1998); BEZERRA *et al.* (2009) a evaporação e a transpiração ocorrem na natureza, simultaneamente, não sendo fácil distinguir o vapor d'água produzido por cada processo separadamente. Deste modo, o termo evapotranspiração é usado para descrever o processo total de transferência de água na forma de vapor de superfícies vegetais e do solo para a atmosfera.

A evapotranspiração da cultura pode ser calculada através do cálculo da taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, onde não há deficiência de água, esta evapotranspiração é chamada de evapotranspiração de referência e é denominada como ET_0 .

A superfície de referência é uma cultura de referência (grama hipotética com características específicas). Assim ET_c depende das condições meteorológicas, expressas por meio da ET_0 , do tipo de planta (maior ou menor resistência à seca) e da área foliar (ALLEN *et al.*, 2006). A ET_c pode ser calculada através da equação 5.8.

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (5.8)$$

onde:

ET_c - evapotranspiração da cultura ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$);

K_c - coeficiente da cultura (adimensional);

ET_0 - evapotranspiração de referência ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$).

O coeficiente da cultura é influenciado pelo tipo e pela idade fenológica da cultura e pelas características climáticas do local. O coeficiente leva em conta as características de transferência do vapor d'água do solo e da planta para a atmosfera e, de acordo com ALLEN *et al.* (2006) e BEZERRA *et al.* (2009), representa a integração dos efeitos que distinguem a evapotranspiração da cultura de referência com a cultura em estudo: a altura da cultura que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; a resistência da superfície em função do sistema solo-planta, que é afetado pela área foliar (determinando o número de estômatos), pela fração da cobertura vegetal do solo, pela idade e condição das folhas e pelo conteúdo de umidade do solo; o albedo da superfície solo-planta, que, influenciado pela fração de cobertura vegetal e pela umidade do solo, influencia a radiação líquida disponível na superfície, que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e massa no processo de evaporação.

Os fatores que afetam a ET_0 são parâmetros climáticos e estes podem ser calculados a partir de dados meteorológicos. O método FAO Penman-Monteith é um dos mais utilizados e recomendados quando se dispõe dos parâmetros micrometeorológicos (ALLEN *et al.*, 1998). O método Penman-Monteith baseia-se fisicamente, e explicitamente incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (ALLEN *et al.*, 2006). A equação de Penman-Monteith (Equação 5.9) é expressa:

$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \left(\frac{\pi}{t + 273} \right) u_2 (e_s + e_a)}{\nabla + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (5.9)$$

onde:

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

R_n - saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

G - fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

t - temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 - velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s^{-1});

e_s - pressão de saturação do vapor média diária (kPa);

e_a - pressão atual de vapor média diária (kPa);

∇ - declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente à temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

5.2.2 Programa de simulação de fluxos hídricos no solo (Hydrus 1D)

O programa HYDRUS-1D é um modelo numérico que utiliza o método dos elementos finitos para a simulação da dinâmica de água, vapor, solutos e calor em meios porosos (SIMUNEK *et al.*, 2013), com grande aplicação nas Engenharias Civil e Agrônômica. O modelo foi desenvolvido para simular fluxo em meios não saturados e saturados (SIMUNEK *et al.*, 2009). O fluxo de água no solo considerado pelo programa HYDRUS 1D é descrito pela equação de Richards para o fluxo unidimensional para meio não saturado, incorporando o termo (S) relativo à extração de água pelas raízes, contemplando a evapotranspiração.

Os parâmetros de entrada exigidos nas simulações no programa HYDRUS 1D estão associados primeiramente aos processos principais de simulação: geometria (permite simular camadas diferentes de solo) e tempo de simulação. Este programa além da modelagem direta, utilizando os parâmetros hidráulicos das equações de retenção de

água no solo (Θ_r , Θ_s , α , l , n e K_s), permite também a modelagem inversa para determinar os parâmetros hidráulicos a partir de resultados medidos de potencial ou umidade volumétrica do solo, entre outros. Tal técnica consiste no ajuste dos parâmetros hidráulicos do solo seguindo o método da otimização, utilizando uma função objetiva para minimizar os desvios entre os resultados experimentais (dados observados) e os dados simulados (SIMUNEK *et al.*, 2008).

5.3 Material e métodos

A área de estudo está localizada no município de Moju (PA), num plantio de palma de óleo do Grupo Marborges S.A (Figura 5.3). O solo foi classificado como Latossolo Amarelo, distrófico, textura média.

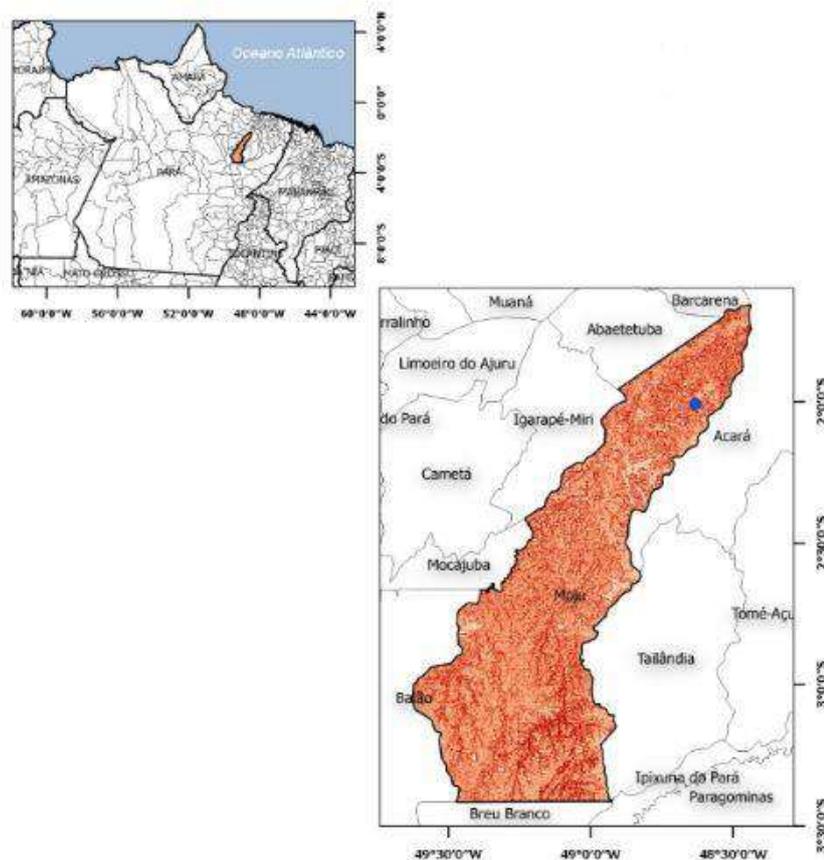


Figura 5.3 – Localização da área de estudo no município de Moju (PA).

Foi realizada a modelagem de forma direta e inversa no programa HYDRUS-1D com o objetivo de parametrizar um modelo contínuo para estimar a dinâmica da água no solo (umidade volumétrica e potencial) em três sistemas de uso da terra (Figura: 5.4). O

foco na discussão dos resultados será feito com base na dinâmica do potencial de água no solo, em que há dados para avaliação das previsões do modelo na área sem vegetação e com cobertura de palma de óleo:

Sistema de uso da terra1: solo sem cobertura vegetal (sem transpiração);

Sistema de uso da terra2: solo com cobertura vegetal de palma de óleo (*Elaeis guineensis Jacq*);

Sistema de uso da terra 3: solo com cobertura vegetal de floresta primária.

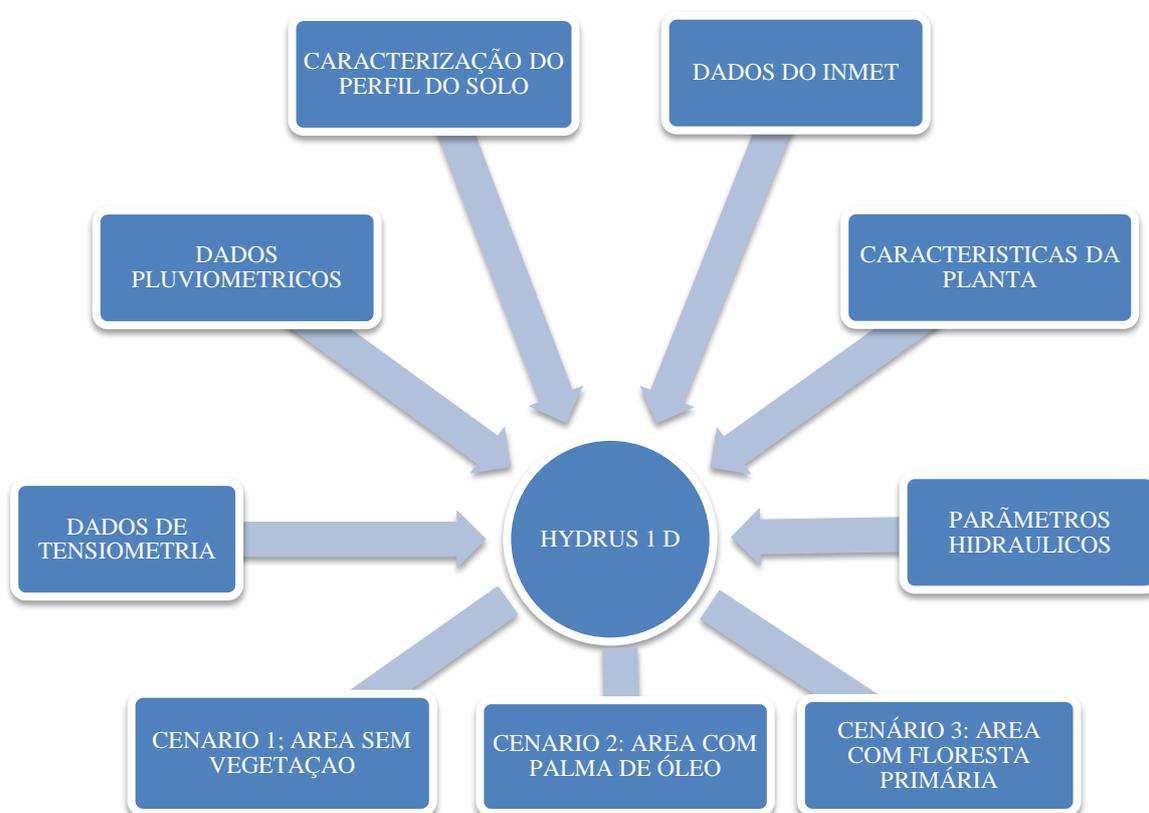


Figura 5.4 - Fluxograma de Modelagem pelo programa HYDRUS-1D.

A modelagem na forma direta foi realizada utilizando os parâmetros hidráulicos (θ_s , θ_r , α e n) que foram estimados através do software RETC (van GENUCHTEN *et al.*, 1991) dos dados de retenção de água do solo em função de diferentes potenciais obtidos nas áreas sem cobertura vegetal, com cobertura de palma de óleo e de floresta primária. O modelo da SWCC utilizado na modelagem de forma inversa e direta foi o modelo unimodal de van Genuchten-Mualem (van GENUCHTEN, 1980).

As amostras de solos indeformadas utilizadas para a obtenção da curva de retenção de água no solo foram coletadas nas áreas sem vegetação, com cobertura de palma de óleo e de floresta primária. A coleta das amostras foi realizada até a profundidade de 100cm.

Foram coletadas amostras indeformadas (três repetições) nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-100cm nas áreas sem vegetação, com cobertura de palma de óleo e de floresta primária. Para determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA), as amostras foram inicialmente saturadas e submetidas às tensões matriciais de 0, 10, 31.6 e 63.1cm de água no extrator de Richards (DONAGEMMA *et al.*, 2011). Para avaliar a retenção em elevados potenciais foi utilizado o equipamento um psicrômetro (WP4C *Dewpoint Potential Meter, Decagon, EUA*), quando foram obtidos valores de retenção de água em elevados potenciais, solo mais seco.

A simulação do potencial de água no solo de forma inversa foi realizada utilizando a média (triplicatas) dos dados de potencial da água no solo medidos com tensiômetros de mercúrio instalados nas profundidades de 10, 30 e 60cm. Esses tensiômetros foram instalados próximos a três palmas de óleo e a três locais sem vegetação na área de estudo (Figura 5.5).



Figura 5.5 - Tensiômetros de mercúrio na área de estudo em Moju[PA] (Foto: Rodrigo Muniz).

Os dados foram coletados diariamente num período de 373 dias, com início em 01 de agosto de 2009, finalizando em 08 de agosto de 2010. Não foram obtidas leituras em todos os dias em todos os tratamentos e profundidades (solo muito seco, entrada de

ar no equipamento etc), os dados obtidos totalizaram, para as três profundidades, 1.105 avaliações para área sem cobertura vegetal e 1.088 dados para a área com palma de óleo. Estes dados foram utilizados na validação dos dados preditos e na simulação inversa e estão apresentados no Anexo III.

O potencial da água no solo foi calculado, através de medições diárias, utilizando a equação 5.10 (YOUNG e SISSON, 2002):

$$T_{as} = -12,6h + h_1 + h_2 \quad (5.10)$$

onde:

T_{as} - potencial de água no solo (cm de H_2O);

H - elevação da coluna de mercúrio (cm);

h_1 - distância entre o nível do mercúrio do reservatório e a superfície do solo (cm);

h_2 - distância da superfície do solo.

A modelagem foi realizada considerando o mesmo período de coleta de dados, totalizando 373 dias. O perfil do solo foi subdividido em 3 camadas (0-20cm, 20-40cm e 40-100cm). Pontos de observação foram estabelecidos nas profundidades de 10, 30 e 60cm, coincidindo com as profundidades de instalação dos tensiômetros (Figura 5.6). Para as condições iniciais na simulação, estabeleceu-se que os potenciais matriciais de água no solo nas áreas sem vegetação com palma de óleo e floresta primária assumiram valor de -72cm H_2O (área sem cobertura vegetal), -104cm H_2O (palma de óleo) e -100cm H_2O (floresta primária) na camada superficial (0-20 cm), -73cm H_2O (área sem cobertura vegetal), -141cm H_2O (palma de óleo) e -100cm H_2O (floresta primária) na camada intermediária (20-40cm), -75cm H_2O (área sem cobertura vegetal), -69cm H_2O (palma de óleo) e -100cm H_2O (floresta primária) na camada inferior (40-100cm). A profundidade do sistema radicular foi considerada até 100cm para palma de óleo, com absorção de água em todo seu comprimento seguindo o que foi descrito por SCHROTH *et al.* (2000). Na área de floresta primária o sistema radicular foi considerado até 100cm com absorção de água em todo o perfil.

Como condições de contorno superior, estabeleceram-se as condições atmosféricas variáveis (evapotranspiração e precipitação) com camada superficial de

água podendo atingir até 10cm paras as áreas sem vegetação, palma de óleo e floresta primária.

Considerando o efeito do dossel na captação da precipitação, obteve-se a precipitação efetiva nas áreas de palma de óleo e floresta primária através das equações 5.11 e 5.12 (HENSON e HARUN, 2005).

$$P_{ep} = P_t - 0,54 \quad (5.11)$$

onde:

P_{ep} – precipitação efetiva da área de palma de óleo (mm.dia^{-1}), considerando índice de área foliar igual a 4 (CORLEY e TINKER, 2003).

P_t – precipitação total (mm.dia^{-1}), sendo que a precipitação total igual ou inferior à $0,54 \text{ mm dia}^{-1}$, considera $P_{ep}=0$;

$$P_{ef} = P_t - 0,80 \quad (5.12)$$

onde:

P_{ef} – precipitação efetiva da área de floresta primária (mm.dia^{-1}), considerando índice de área foliar igual a 6,5 (TANI *et al.*, 2003);

P_t – precipitação total (mm.dia^{-1}), sendo que a precipitação total igual ou inferior à $0,80 \text{ mm.dia}^{-1}$, considera $P_{ef}=0$;

Para as condições de fronteira inferiores, considerou-se a condição de drenagem livre.

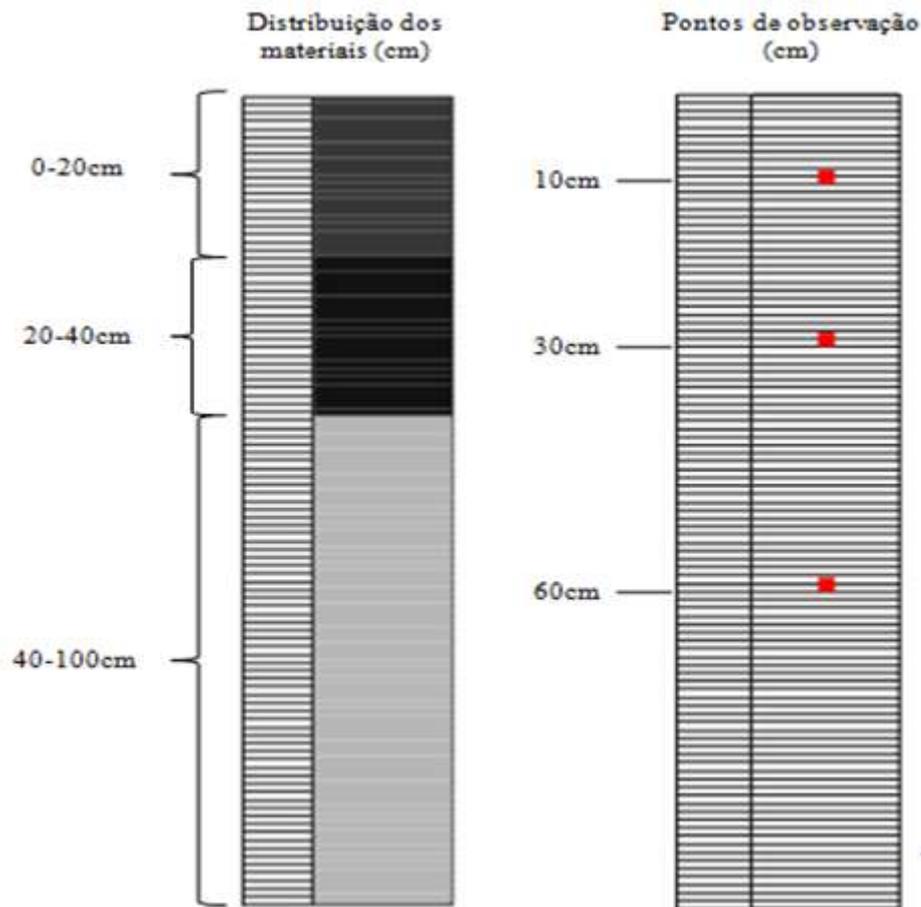


Figura 5.6 - Distribuição das camadas e pontos de observação inseridos no gráfico editor do Hydrus-1D.

O modelo da SWRC utilizado na modelagem de forma inversa e direta foi o modelounimodal de van Genuchten-Mualem (van GENUCHTEN, 1980). O parâmetro hidráulico da tortuosidade (l) foi fixado em 0,5 (MUALEM, 1976). Os parâmetros meteorológicos de entrada utilizados pelo modelo foram precipitação efetiva e para as estimativas da evapotranspiração do cultivo. Para o cálculo da evapotranspiração potencial foram utilizados dados de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar obtida de uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Tomé-Açu (PA) a cerca de 40km do local do experimento. Maiores detalhes sobre esta estação e as etapas do cálculo da evapotranspiração estão no anexo II.

Para o cálculo de evapotranspiração, utilizou-se a equação de Penman-Montheith (ALLEN *et al.*, 1998) e os resultados foram inseridos no HYDRUS 1D. Foi considerado K_c de 0,90 para a cultura de palma de óleo (CARR, 2011) e K_c de 1 para floresta primária (VILLA NOVA *et al.*, 1976; BELK *et al.*, 2007).

O modelo de Feddes foi utilizado para estimativas da absorção de água pelas raízes das plantas, considerando 0,0cm H₂O (h1), 0,0cm H₂O (h2), -500cm H₂O (h3), -15.000cm H₂O (h4) para palma de óleo (ASKRI *et al.*, 2014) e 0,0cm H₂O (h1), -101 cm H₂O (h2), -3.059cm H₂O (h3) e 15.295cm H₂O (h4) para floresta primária (MARKEWITZ *et al.*, 2010).

A análise de desempenho dos resultados obtidos na curva de retenção de água no solo (modelagem direta) e inversa (medições dos tensiômetros) foi o erro quadrático médio (RMSE - *Root Mean Square Error*, em inglês) O erro quadrado médio quantificou as diferenças entre os valores de potencial da água no solo observados (O_i) e os valores preditos (P_i). RMSE é expresso pela equação 5.11:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (5.11)$$

Uma análise gráfica da distribuição dos resíduos em função das datas de avaliação e também dos resíduos em função das médias dos valores avaliados são apresentados, para detecção de tendências.

5.4 Resultados e discussão

Ajuste da curva de retenção de água (van Genuchten – Mualen)

As curvas de retenção de água do solo nas três situações de uso no solo (área sem vegetação, palma de óleo e floresta primária), apresentaram um bom ajuste de dados, com RMSE variando entre 0,004 e 0,001 (Figura 5.7). Os parâmetros ajustados para o modelo de Van Genuchten estão apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Propriedades físico-hídricas do solo, parâmetros da equação unimodal de Van Genuchten, obtidas de forma inversa e direta para a área do plantio de palma de óleo e sem cobertura vegetal e direta (floresta primária).

Tratamento	Forma	Prof. (cm)	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	n	K_s (cm dia^{-1})
Sem cobertura vegetal	Inversa	10	0,005	0,40*	0,05207	1,220	16
		30	0,016	0,33*	0,01068	4,033	80
		60	0,119	0,36*	0,03425	1,215	187
Palma de óleo	Inversa	10	0,099	0,37*	0,02326	1,239	34
		30	0,032	0,34*	0,00768	2,794	576
		60	0,002	0,37*	0,04361	1,584	188
Sem cobertura vegetal	Direta	10	0,05	0,40	0,03904	1,467	16**
		30	0,04	0,33	0,01932	1,269	80**
		60	0,004	0,36	0,0658	1,0997	187**
Palma de óleo	Direta	10	0,04	0,37	0,03056	1,462	34**
		30	0,05	0,34	0,01683	1,302	576**
		60	0,004	0,37	0,03560	1,122	188**
Floresta primária	Direta	10	0,04	0,42	0,03504	1,469	73***
		30	0,01	0,41	0,07271	1,242	59***
		60	0,03	0,390	0,0850	1,142	23***

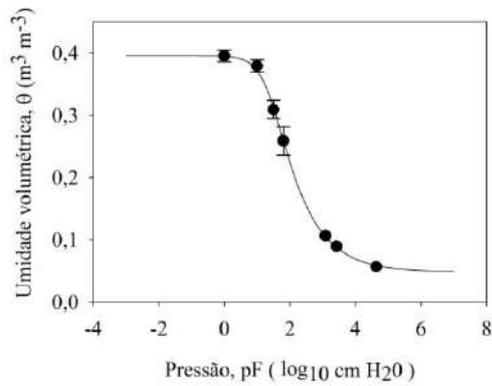
Obs: * - obtido na modelagem direta e fixado na simulação; ** - obtido na modelagem inversa; ***- obtido através do programa computacional ROSETTA (SCHAAP *et al.*, 2001).

A área sem vegetação e palma de óleo apresentou valores de Θ_r de $0,004\text{m}^3\text{m}^{-3}$ na profundidade 60cm (Figura 5.7).

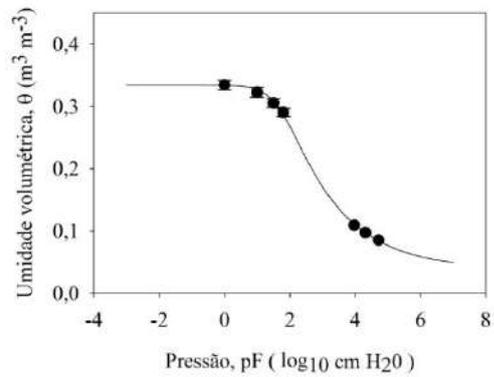
Os valores de Θ_s nas profundidades de 10, 30 e 60cm da área sem vegetação e a área com palma de óleo (Tabela 5.1) estão próximos da porosidade total do solo nessas profundidades (Tabela 2.3) e, conseqüentemente, da umidade de saturação em comparação a área com floresta primária, podendo ocasionar um ambiente redutor na incidência de alta precipitação.

ÁREA SEM VEGETAÇÃO

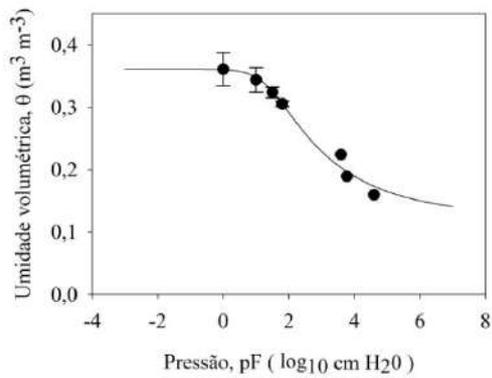
0-20cm RMSE = 0,0025



20-40cm RMSE = 0,0021

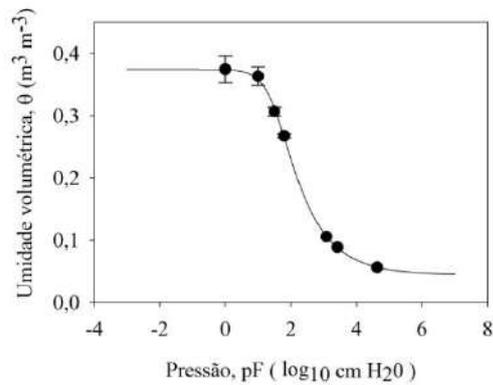


40-100cm RMSE = 0,0052

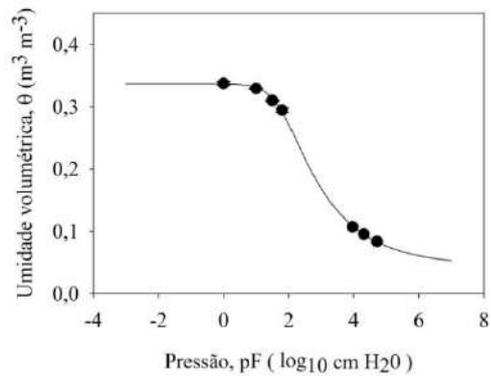


ÁREA COM PALMA DE ÓLEO

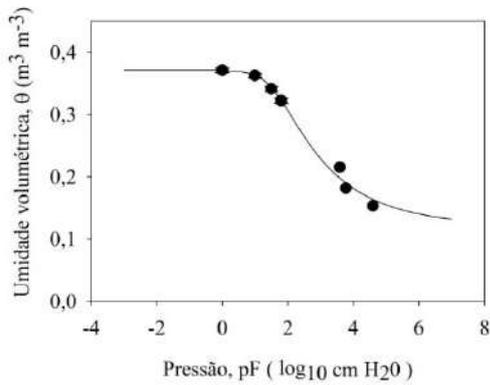
0-20cm RMSE = 0,0024



20-40cm RMSE = 0,0016

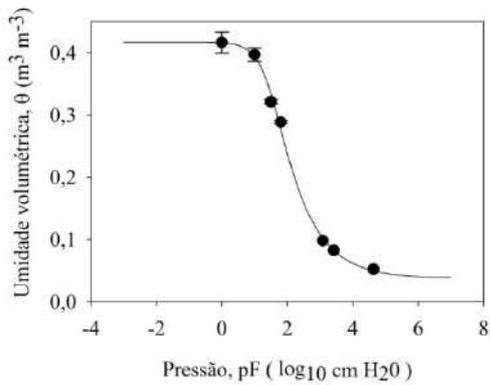


40-100cm RMSE = 0,0042

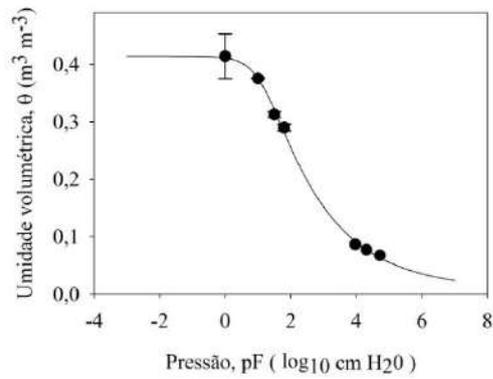


ÁREA COM FLORESTA PRIMÁRIA

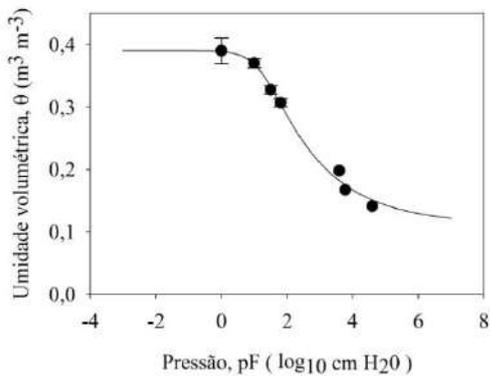
0-20cm RMSE = 0,00506



20-40cm RMSE = 0,00421



40-100cm RMSE = 0,00636



Obs: Barras representam o desvio padrão

Figura 5.7- Curvas de retenção de água no solo nas áreas sem vegetação, com palma de óleo e floresta primária nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-100cm.

5.4.1 Modelagem da dinâmica do potencial de água no solo nos diferentes sistemas de uso da terra

a) Área sem vegetação

Os dados estimados na modelagem direta e inversa pelo programa HYDRUS-1D e avaliados no campo do potencial da água na área sem cobertura vegetal nas profundidades de 10, 30 e 60cm estão apresentados nas figuras 5.8, 5.10 e 5.12

O valor máximo de potencial observado foi de -368cm de H₂O (Figura 5.8) na profundidade de 10cm da área sem vegetação. No período entre 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e o potencial se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial próximos de -200cm de água em períodos com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma inversa e direta superestimaram a umidade no período de menor precipitação (130 à 350 dias) e uma boa conformidade no período de menor precipitação (0 à 100 dias). Entretanto, o modelo não foi capaz de prever as grandes variações de potencial em alguns eventos do período chuvoso.

A modelagem de forma inversa apresentou um pico de -216cm de H₂O de maior, aproximando-se mais do valor medido (-368cm de H₂O) em comparação a modelagem de forma direta que apresentou potencial de -188cm de H₂O.

Apesar de os resíduos se distribuem em todo período estudado (373 dias) de forma semelhante (Figura 5.9), a modelagem de forma direta apresentou o valor de RMSE ligeiramente inferior a modelagem inversa (Tabela 5.2), indicando uma melhor conformidade com os dados observados no campo.

Tabela 5.2 – Desempenho dos resultados originados de forma inversa e direta através do modelo unimodal de Van Genuchten-Mualem para a área sem cobertura vegetal e cultivo de palma de óleo.

Tratamentos	Formas	Profundidades	RMSE 0-130 dias	RMSE 130-373 dias
Sem cobertura vegetal	Inversa	10 cm	61	46
		30 cm	65	18
		60 cm	26	17
	Direta	10 cm	51	39
		30 cm	96	37
		60 cm	76	43
Palma de óleo	Inversa	10 cm	104	46
		30 cm	127	51
		60 cm	99	25
	Direta	10 cm	75	35
		30 cm	135	58
		60 cm	105	37

Na profundidade de 30cm, o valor mínimo de potencial observado foi de -504cm de H₂O (Figura 5.10) no dia 122. No período entre os dias 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e o potencial da água no solo se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial que atingiram valores de -150cm de H₂O, em épocas com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma direta superestimou a umidade do solo (baixos potenciais) do potencial do solo no período de maior precipitação (130 a 373 dias), e a modelagem inversa teve um comportamento similar neste período (Figura 5.9).

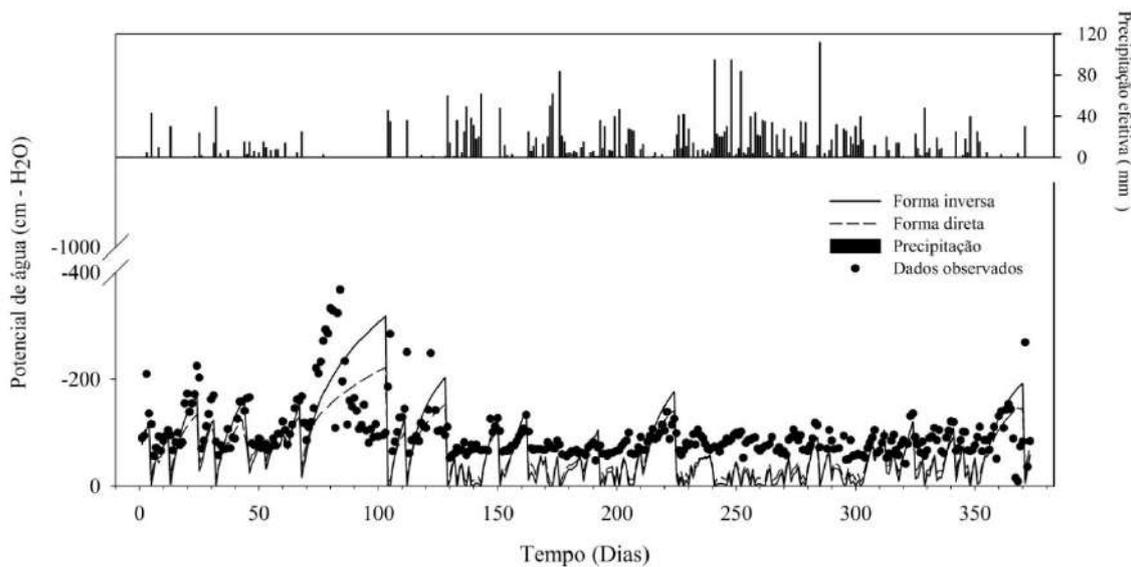


Figura 5.8– Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 10 cm.

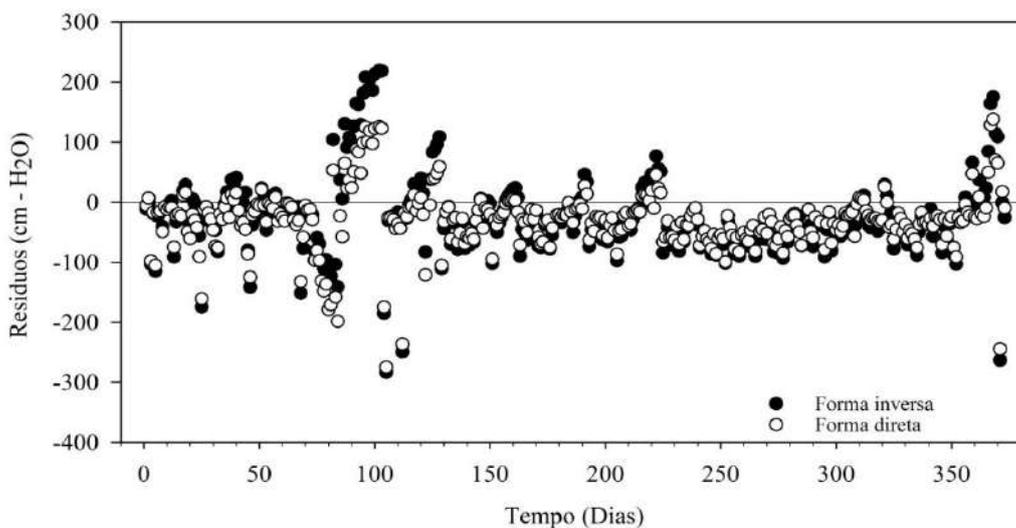


Figura 5.9 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 10 cm na área sem vegetação.

A modelagem de forma inversa teve uma maior conformidade com os dados observados no período (0 a 130 dias) apresentado potencial de -219cm de H₂O em comparação a modelagem de forma direta que apresentou potencial de -175cm de H₂O. O maior valor medido neste período foi de -498cm de H₂O (Tabela 5.2). Os RMSE apresentam valores distintos (Tabela 5.2) e os resíduos se distribuem ao longo do tempo

de coleta de forma semelhante (Figura 5.11), apenas com uma grade variação em ambos procedimentos (direto e inverso) no período mais seco.

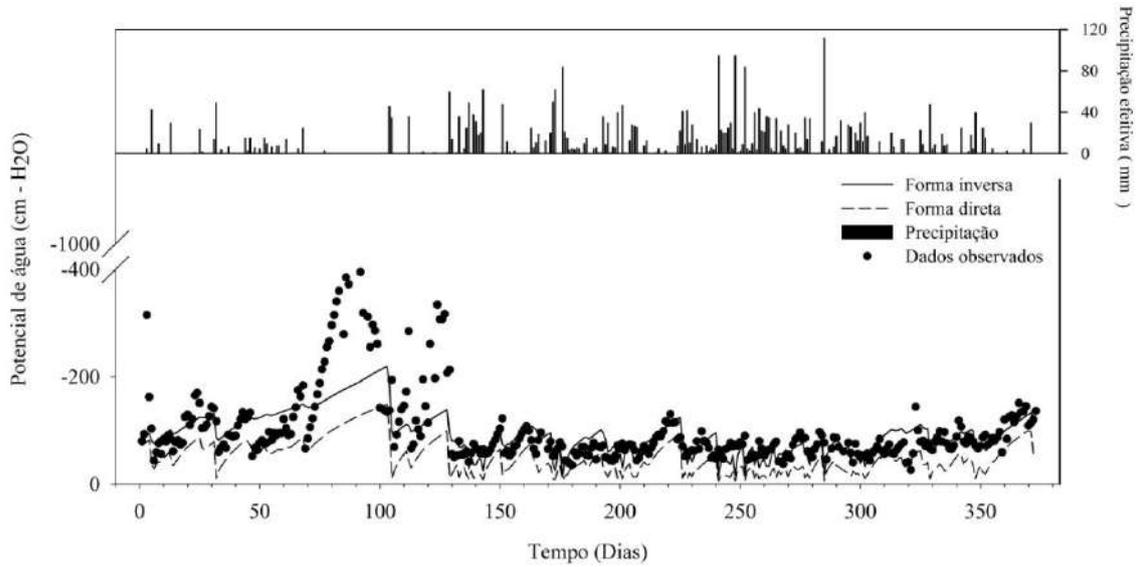


Figura 5.10 – Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 30cm.

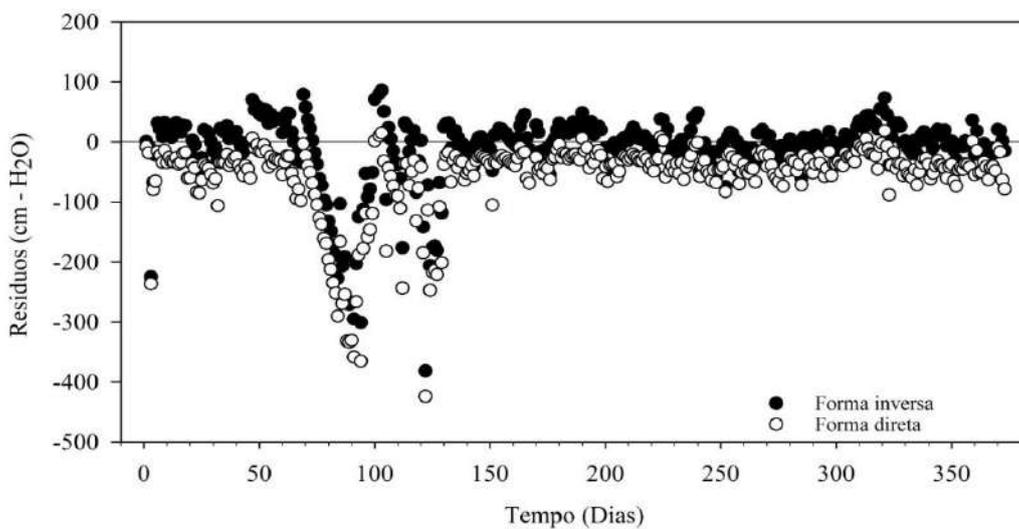


Figura 5.11- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 30cm na área sem vegetação.

Na profundidade de 60cm, o valor máximo de potencial observado foi de -393cm de H₂O (Figura 5.12) no período de 1 a 130 dias (agosto a novembro). No período de 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e os baixos valores de potencial mostram que o solo se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial próximos de -130cm de H₂O em períodos com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma direta superestimou (Figura 5.11) a umidade do solo no período de maior precipitação (130 a 350 dias) e a modelagem inversa teve uma boa conformidade neste período (Tabela 5.2)

A modelagem de forma inversa na profundidade de 60 cm, teve uma maior conformidade (Tabela 5.2) com os dados observados no período (0 a 130 dias), apresentado potencial mínimo de -213cm de H₂O em comparação a modelagem de forma direta que apresentou potencial mínimo de -167 cm de água. Os RMSE apresentam valores semelhantes (Tabela 5.2) e os resíduos se distribuem ao longo do tempo de coleta de forma semelhante (Figura 5.13) com a modelagem inversa sempre apresentando maior densidade de valores positivos em comparação com a modelagem inversa.

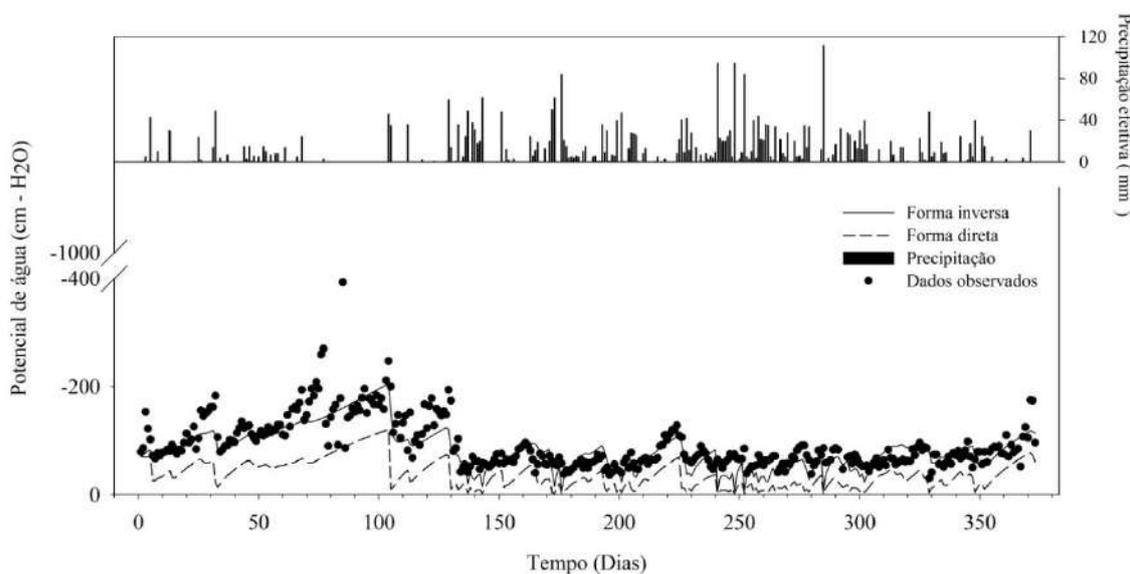


Figura 5.12 - Precipitação e potencial de água no solo em área sem cobertura vegetal na profundidade de 60cm.

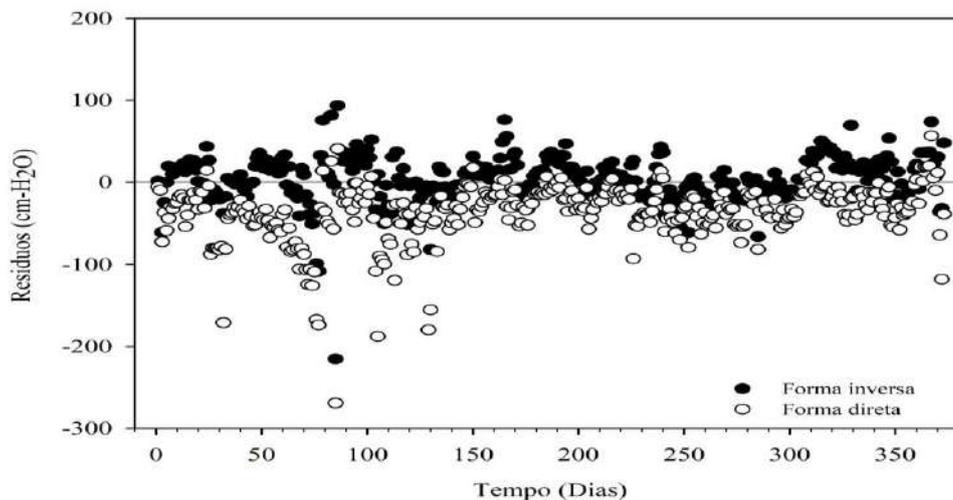


Figura 5.13- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 60cm na área sem vegetação.

b) Área com cultivo de palma de óleo

Os dados estimados na modelagem direta e inversa pelo programa HYDRUS-1D e avaliados no campo do potencial da água na área com cultivo de palma de óleo nas profundidades de 10, 30 e 60cm estão apresentados nas figuras 5.14, 5.16, 5.18

O valor mínimo de potencial observado foi de -785cm de H₂O (Figura 5.14) no período de 1 a 130 dias (agosto a novembro) na profundidade de 10cm. É importante observar que em alguns dias o solo pode ter ultrapassado este valor, mas não foi possível registrar pelo limite de operação dos tensiômetros ($> \sim 800$ cm de coluna de água). No período de 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e o potencial se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial próximos de -200cm de H₂O em períodos com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma direta subestimou a umidade do solo (baixos potenciais) no período de maior precipitação (130 a 350 dias) e a modelagem inversa teve uma melhor previsão neste período, indicado pelo menor RMSE de 39 em comparação com 67 com a direta (Tabela 5.2).

A modelagem inversa teve uma maior conformidade com os dados observados no período de 1 a 130 dias, apresentando potencial mínimo de -469cm de H₂O em comparação a modelagem de forma direta, que apresentou menor conformidade, apresentando potencial mínimo de -428cm de H₂O na profundidade de 10cm na área

com cultivo de palma de óleo. Entretanto, os RMSE apresentam valores semelhantes (Tabela 5.2) e os resíduos se distribuem ao longo do tempo de coleta de forma semelhante (Figura 5.15).

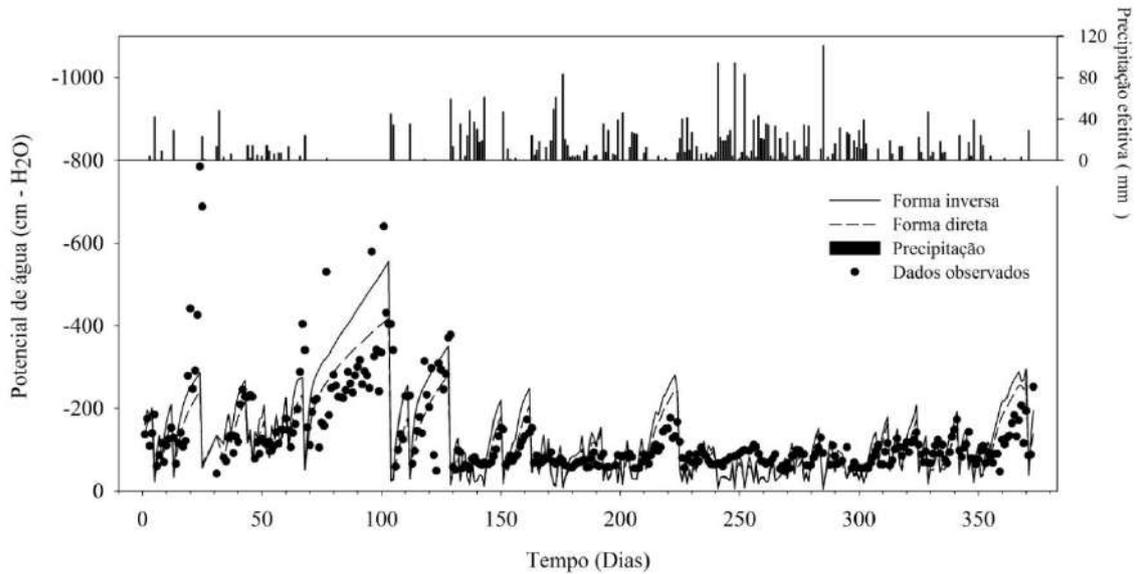


Figura 5.14 - Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju na profundidade de 10cm.

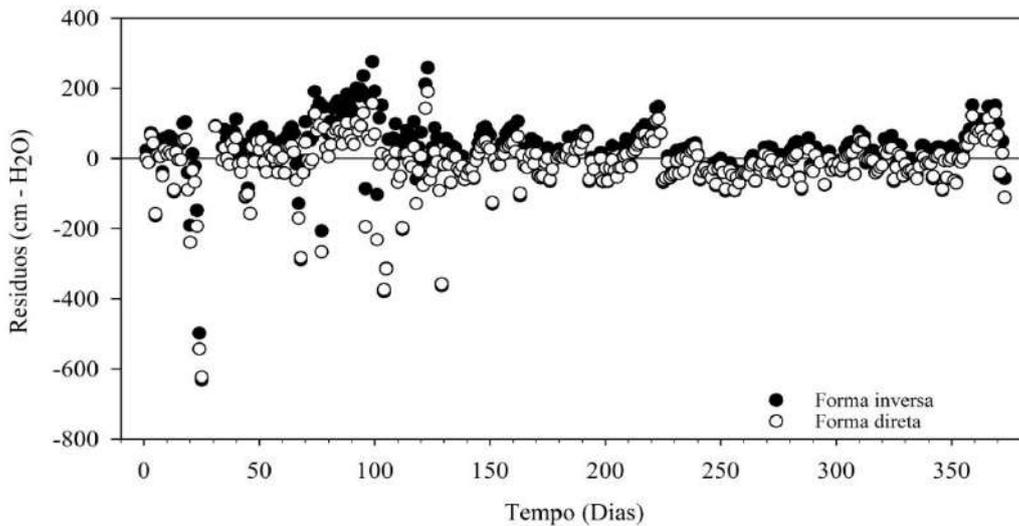


Figura 5.15- Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 10cm na área de palma de óleo

O valor mínimo de potencial observado foi de -785cm de H₂O (Figura 5.16) no período de 1 a 130 dias (agosto a novembro) na profundidade de 30cm na área com cultivo de palma de óleo. No período de 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e o potencial se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial próximos de -500cm de H₂O em períodos com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma direta subestimou a umidade do solo no período de maior precipitação (130 a 365 dias) e a modelagem inversa teve uma boa conformidade neste período (Tabela 5.2).

A modelagem inversa teve menor conformidade com os dados observados no período de 1 a 130 dias, apresentando o potencial mínimo de -365cm de H₂O em comparação a modelagem de forma direta, que apresentou maior conformidade, apresentando potencial mínimo de -413cm de H₂O na profundidade de 30cm na área com cultivo de palma de óleo. Os RMSE apresentam valores semelhantes (Tabela 5.2) e os resíduos se distribuem ao longo do tempo de coleta de forma semelhante (Figura 5.17).

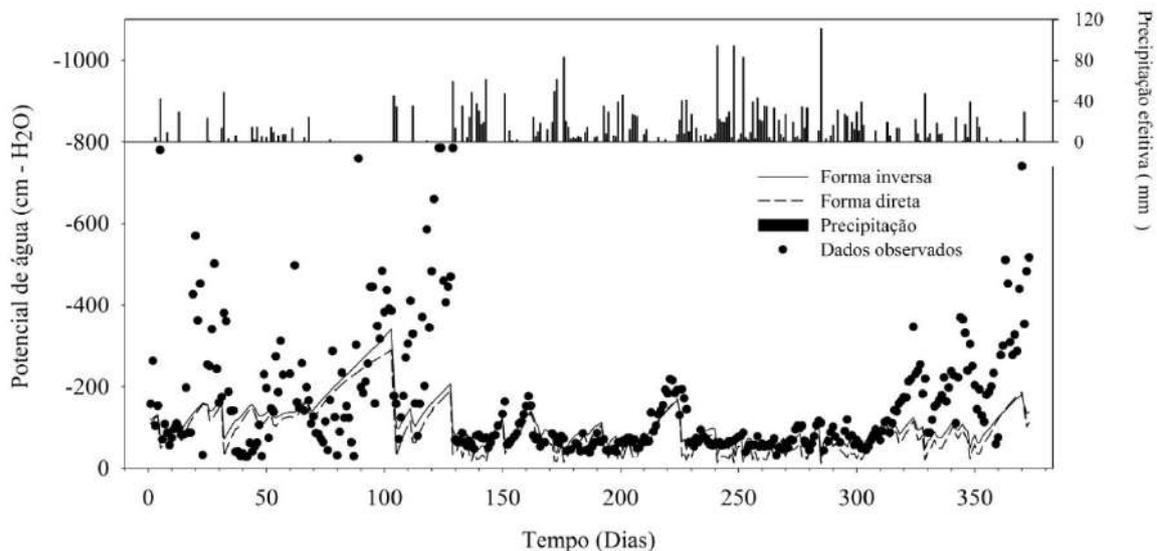


Figura 5.16 – Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju, na profundidade de 30cm.

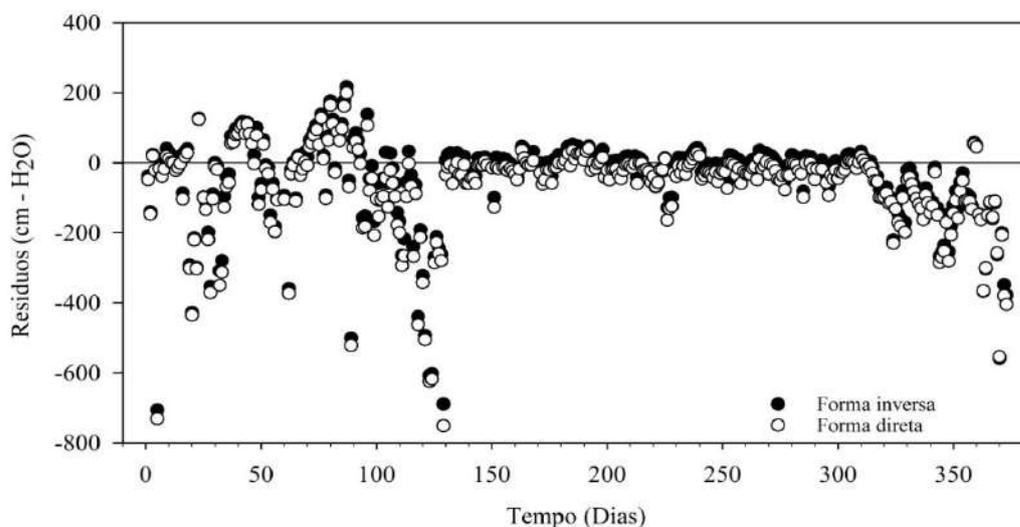


Figura 5.17 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 30cm na área de palma de óleo.

O valor mínimo de potencial observado foi de -785cm de H₂O (Figura 5.18) no período de 1 a 130 dias (agosto a novembro) na profundidade de 30 cm na área com cultivo de palma de óleo. No período de 130 a 373 dias (dezembro a julho) houve um grande volume de precipitação e o potencial se manteve próximo da saturação, com alguns picos de potencial próximos de -200cm de água em períodos com ausência ou eventos de baixos valores de precipitação. A modelagem de forma direta subestimou a umidade do solo no período de maior precipitação (130 a 373 dias) e a modelagem inversa teve uma boa conformidade neste período, apresentando RMSE de 19 em comparação a modelagem de forma direta que apresentou RMSE de 28 (Tabela 5.2).

A modelagem inversa apresentou menor conformidade com os dados observados no período (0 a 130 dias) com o potencial mínimo de -283cm de H₂O em comparação a modelagem de forma direta, que apresentou potencial mínimo de -393cm de H₂O na profundidade de 60cm na área com cultivo de palma de óleo. Entretanto, os RMSE apresentaram valores semelhantes (Tabela 5.2) e os resíduos se distribuem ao longo do tempo de coleta de forma semelhante (Figura 5.19).

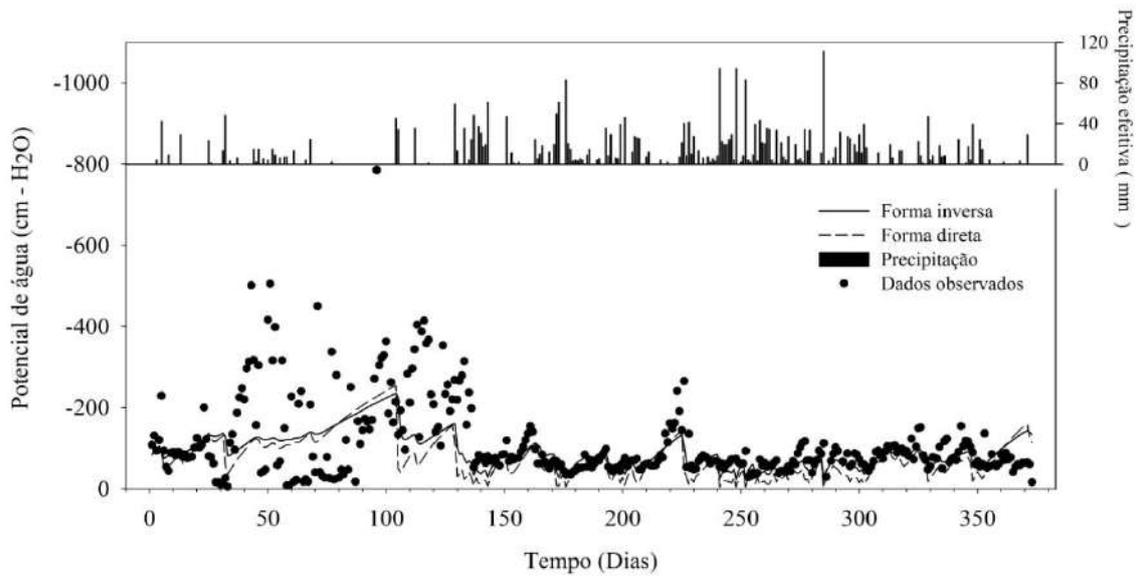


Figura 5.18 – Precipitação e potencial de água no solo em área em cultivo de palma de óleo, em Moju na profundidade de 60cm.

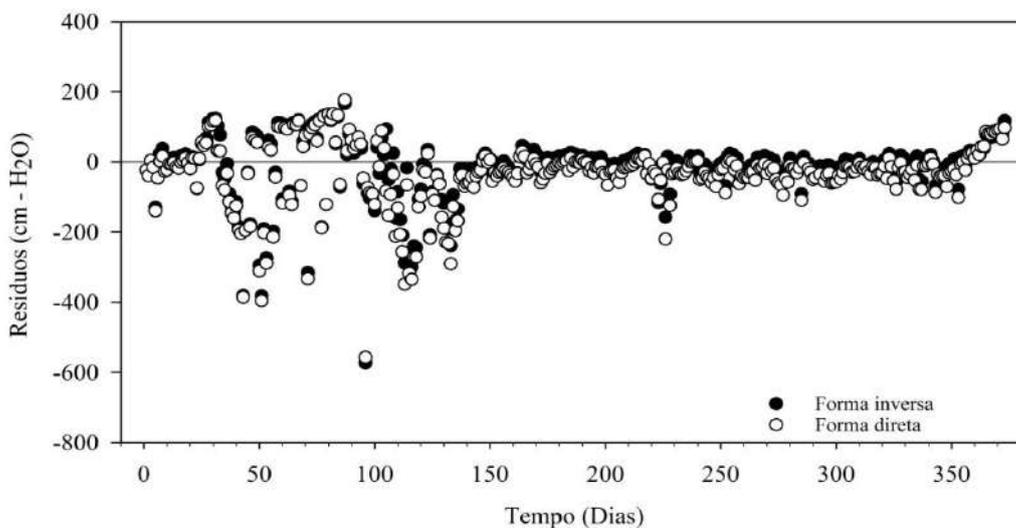


Figura 5.19 - Dispersão dos resíduos da modelagem inversa e direta em função do tempo na profundidade de 60cm na área de palma de óleo.

Os valores do potencial da água no solo na camada de 60cm sob cultivo de palma mostram uma dinâmica contrastante com a monotonia do potencial na área sem cobertura vegetal. Isto indica que provavelmente há uma considerável absorção de água nesta camada pelas raízes das palmas.

Observando os dois sistemas de uso estudados (área sem cobertura vegetal e área com palma de óleo), nota-se que no período de maiores precipitações entre 130 a 373 dias, o solo apresentou-se próximo a saturação (baixos valores de potencial) com comportamento semelhante em 10, 30 e 60cm de profundidades. A área com cultivo de palma de óleo apresentou uma maior variação do potencial de água no solo em comparação à área sem cobertura vegetal, provavelmente relacionada a uma absorção e transpiração da água pela palma de óleo (evapotranspiração). A palma de óleo apresenta raízes secundárias e terciárias, que absorvem água ocasionando uma elevação do potencial de água no solo (CORLEY e TINKER, 2003; RAMALHO FILHO *et al.*, 2010).

No período com menor precipitação (1 a 130 dias), a área com palma de óleo apresentou-se com menor potencial em comparação a área sem cobertura vegetal em todas as profundidades.

A modelagem da área sem cobertura vegetal e da área com palma de óleo tiveram os dados observados no campo e simulados nas profundidades de 10, 30 e 60cm. Por ser tratar de dados de campo, e não de laboratório, este tipo de comportamento é comum e observado em diferentes trabalhos de modelagem com dados de campo incluindo variável solo, planta e condições atmosféricas como o trabalho de SCHLEGEL *et al.*, 2004.

As discrepâncias entre os valores modelados e observados podem ser também a falta de acurácia dos valores obtidos pelos tensiômetros (AZEVEDO e DA SILVA 1999), o tensiômetro de mercúrio pode variar o erro de medição de potencial de 102 a 153cm de H₂O a um potencial próximo de -510cm de H₂O,

Após os ajustes com os dados observados e estimados nos dois sistemas de uso estudados (área sem vegetação e cultivo de palma de óleo) diferentes cenários (área sem cobertura vegetal, área com cultivo de palma de óleo, área com floresta primária) nas profundidades de 10, 30 e 60cm, tiveram-se como resultado os parâmetros de condutividade hidráulica saturada (K_s) e os parâmetros (θ_r , θ_s , α , n e K_s) nas situações de área sem cobertura vegetal e área com cobertura de palma de óleo nas profundidades de 10, 30 e 60cm (Tabela 5.1).

As profundidades de 10, 30 e 60cm na área sem cobertura vegetal e com palma de óleo apresentam valores semelhantes (Tabela 5.1) nos parâmetros hidráulicos calculados (θ_r , θ_s , α , n e K_s). Uma observação de campo, corroborada por outros trabalhos na região (MARQUES *et al.*, 2012; TEIXEIRA *et al.*, 2017) e por dados

apresentados no capítulo mostram condutividade hidráulica saturada e consequente aumento da água estagnada nas camadas mais superficiais deste solo. Os estudos de ELSENBEER *et al.*, (1999) mostraram uma redução da condutividade hidráulica saturada com a retirada da floresta primária na Amazônia.

Foi calculado o desempenho da modelagem de inversa e direta na área sem vegetação e a área com cultivo de palma de óleo em diferentes cenários (Tabela 5.2), utilizando o parâmetro erro quadrático médio (RMSE).

Notou-se que a modelagem de forma inversa nas profundidades estudadas (30 e 60cm) apresentou melhor ajuste em comparação à modelagem de forma direta com exceção a profundidade de 10cm. O melhor ajuste na área de vegetação foi na profundidade de 60cm, que apresentou RMSE de 26 no período de menor precipitação (0-130 dias) e RMSE de 17 no período de maior precipitação (130-373 dias). Na área de cultivo de palma de óleo, o melhor ajuste foi na profundidade de 10cm que apresentou RMSE de 75 e 35 nos respectivos períodos.

Não foi realizada uma comparação entre o potencial de água no solo na área sem cobertura vegetal, área com plantio de palma de óleo e a área com floresta primária nas profundidades de 10, 30 e 60cm (pontos de observação) durante o período de modelagem (373 dias). Na área com floresta primária não houve monitoramento com sensores e, conseqüentemente, não foi possível estimar os desvios entre os estimados e avaliados. Um novo projeto está fazendo a avaliação contínua do conteúdo de água volumétrica em área de floresta primária nesta região.

Nos trabalhos realizados por HODNETT *et al.* (1995) e TOMASELLA e HODNETT (1996), avaliando o armazenamento da água no solo quando da substituição da floresta primária por pastagem em um Latossolo Amarelo, na Amazônia central, foi observada maior umidade nas camadas subsuperficiais na área com pastagens em comparação a área de floresta, atribuída pelos autores à compactação. O mesmo processo ocorreu com a substituição da floresta primária por cultivo de palma de óleo neste estudo.

A supressão de floresta primária e o uso com sistemas agrícolas nos Latossolos Amarelos, textura média, do nordeste da Amazônia, ocasionam alterações no regime hídrico e no fluxo de água. Com ocorrência de áreas com água estagnada e o sistema poroso do solo saturado ou próximo da saturação por longos períodos.

5.5 Conclusões

A modelagem da dinâmica do potencial de água no solo em áreas sem vegetação e com cultivo de palma de óleo no Latossolo Amarelo apresentou um bom desempenho quando o solo se apresenta próximo da saturação. Entretanto, com valores de potenciais mais elevados e a maior dinâmica observada nos períodos secos, o modelo não conseguiu representar o observado no campo. Não houve grandes diferenças de desempenho entre a modelagem direta e inversa.

No período estudado, o solo tanto nas áreas com cultivo de palma de óleo como na área sem vegetação permaneceu com baixos potenciais (próximos da saturação).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O tema de estudo é de relevância prática para a região, tanto por contribuir na análise dos impactos de substituição da floresta primária por atividades agrícolas, quanto para subsidiar a melhoria destas atividades nas áreas destinadas a este fim na Amazônia.

As diferentes análises realizadas neste estudo evidenciaram que o Latossolo Amarelo estudado, sob cobertura de palma de óleo ou sem cobertura, permaneceu por diversos períodos próximo a saturação, com consequências na redução dos minerais de ferro que migram para a solução do solo, provocando uma desestabilização da estrutura, e isto poderá tornar este solo mais susceptível a compactação.

Os parâmetros ajustados para o modelo de simulação de fluxo permitirão fazer simulações para maiores períodos, e a determinação de períodos de baixa aeração do solo, que podem ser importantes nas questões da redução da estabilidade estrutural (Capítulo 4) e a na dinâmica do ferro na solução do solo (Capítulo 3). Estes estudos poderão ajudar a comprovar a hipótese abiótica (água estagnada e liberação de concentrações tóxicas de ferro para solução do solo) como agente causal do Amarelecimento Fatal do denzeiro (palma de óleo), TEIXEIRA *et al.* (2010)

Para futuros estudos, recomenda-se:

- Ensaio de alagamento utilizando amostras de agregados de cada área de uso do solo e com períodos pré-determinados de “submersão” e “secamento” dos agregados durante o ensaio;
- Análise microbiológica dos agregados de cada área de uso do solo para identificar os microorganismos capazes de realizar redução do ferro em ambiente anaeróbico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIANO, A.D. 2001. *Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. Springer, New York Advances in Agronomy, v.99, pp.183-225.
- ALLAN, R.P., SODEN, B.J., 2008. *Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes*. Science 321, pp 1481–1484.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Rome, Italy, 1998.
- ALLEN, R. G., PRUITT, W. O., WRIGHT, J. L., HOWELL, T. A., VENTURA, F., SNYDER, R., SMITH, M., 2006. *A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method*. Agricultural Water Management, v. 81, n.1–2, pp.1-22.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION-APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005.
- ANDREOLA, F., COSTA, L. M., OLSZEWSKI, N., 2000. *Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.24, pp.857-865.
- ARAGAO, L.E.O.C., 2012. *Environmental science: The rainforest's water pump*. Nature, v. 489, n. 7415, pp. 217-218.
- ASKRI, B., AHMED, A. T., ABICHOU, T., BOUHLILA, R. 2014. *Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use*. Journal of hydrology, v. 513, pp. 81-90.
- ASSEFA, K.A., WOODBURY, A.D., 2013. *Transient, spatially varied groundwater recharge modeling*. Water Resources Research 49, n. 2, pp. 4593-4606.
- AZEVEDO, J. A., DA SILVA, E. M., 1999. *Tensiômetro: Dispositivo prático para controle da irrigação*. Embrapa Circular Técnica nº 1. Planaltina: Embrapa-CPAC, 37p.

BAKER, B.J., BANFIELD, B.J. 2003. *Microbial communities in acid mine drainage*. FEMS Microbiol Ecology. v.44, pp.139–152.

BATALHA, M.S. 2016. *Effects of temporal averaging of weather data on calculations of near surface water flow and recharge processes*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 126 p.

BEAUVAIS, A.; TARDY, Y. 1993. *Degradation and dismantling of iron crusts under climatic changes in Central Africa*. Chemical Geology, v.107 p.277-280.

BELK, E. L., MARKEWITZ, D., RASMUSSEN, T. C., CARVALHO, E. J. M., NEPSTAD, D. C., DAVIDSON, E. A., 2007. *Modeling the effects of throughfall reduction on soil water content in a Brazilian oxisol under a moist tropical forest*. Water Resources Research, v.43, n.8, 14p.

BEZERRA, J.R.C., AZEVEDO, P. V., SILVA, B.B., DIAS, J.M. 2010. *Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom, irrigado*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, pp. 625-632.

BLANCO, F. F. 2006. *Manual de construção e utilização de extratores de cápsula porosa para obtenção da solução do solo*. Teresina: Embrapa – Meio Norte, 18p.

BOUKHALFA, H., CRUMBLISS, A.L. 2002. *Chemical aspects of siderophore mediated iron transport*. Biometals, v.15, pp.325–339.

BRADY, N. C., WEIL, R. R. 2013. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. (Tradução Técnica: Lepsch, I.F.), 3 ed., Porto Alegre, Bookman, 685 p.

CALDERANO, S. B., DUARTE, M. N., GREGORIS, G., 2009. *Análise mineralógica das frações finas do solo por difratometria de raios-X: revisão e atualização da metodologia e critérios usados na Embrapa Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. (Embrapa Solos, Comunicado Técnico, 53).

CAMARGO, F.A.O., SANTOS, G.A., ROSSIELLO, R.O.P. 1993. *Produção de ácidos orgânicos voláteis pela planta de arroz sob condições anaeróbias*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, n. 3, p. 337-342, 1993.

- CAMARGO, F. A. D. O., SANTOS, G. D. A., ZONTA, E., 1999. *Alterações eletroquímicas em solos inundados*. *Ciência Rural*, v. 29, pp. 171-180.
- CARLOS, F. S., MARAFON, A. J. ANDREAZZA, R., ANGHINONI, I., TEDESCO, M. J., CAMARGO, F. A. D. O. 2015. *Electrochemical changes and nutrient dynamics in the solution of soil with rice irrigated with treated industrial leachate*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 2, pp.466-474.
- CARR, M.K.V. 2011, *The water relations and irrigation requirements of oil palm (Elaeis guineensis): A review*. *Experimental Agriculture*, v.47, pp. 629–652.
- CASSEL, D. K., LAL, R. 1992. *Soil physical properties of the tropics: common beliefs and management restraints*. Soil Science Society of America, Book Series, v.29, pp.61 – 89.
- CESÁRIO, F.V.; DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; BALIEIRO, F.C., 2012. *Estabilidade de agregados em água: Análise crítica e padronização*. Comunicado Técnico. Embrapa Solos, 12p.
- CHENG, Y.Q., YANG, L.Z., CAO, Z.H., YIN, S. 2009. *Chronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with nonpaddy soils*. *Geoderma*, v.151, pp.31–41
- COELHO, C.R.B. 2016. *Estudo Teórico e Experimental de Fluxo de Água e Transporte de Solutos em Equilíbrio e Não-Equilíbrio em Solos Tropicais*. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 139 p.
- COLOMBO, C., TORRENT, J. 1991. *Aggregation and iron oxides in Terra Rossa soils*. *Catena* v.18, pp.51–59.
- COLOMBO, C, PALUMBO, G., HE, J., PINTON, R., CESCO, S., 2013. *Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes*. *Journal of Soils Sediments*. Vol 14(3), pp. 538-548.
- CORLEY, R. H. V., TINKER, P. B., 2003. *The Oil Palm*. World Agriculture Series. Fourth edition. Ed.Blackwell, 562p.

- CORNELL, R.M., SCHWERTMANN, U. 2003. *The Iron Oxides – Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. 2^a ed. Wiley-VCH, Weinheim.
- CORNU, S., LUCAS, Y., AMBROSI, J.P., DESJARDINS, T., 1998. *Transfer of dissolved Al, Fe and Si in two Amazonian forest environments in Brazil*. European Journal of Soil Science, 49, pp.377-384.
- CORREA, M. M., KER, J. C., BARRÓN, V., FONTES, M.P.F., TORRENT, J., CURI N. 2008. *Caracterização de óxidos de ferro de solos do ambiente tabuleiros costeiros*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, pp. 1017-1031.
- D'ALMEIDA, C., VOROSMARTY, C., MARENGO, J., HURTT, G., DINGMAN, S., KEIM, B. 2006. *A water balance model to study the hydrological response to different scenarios of deforestation in Amazonia*. Journal of Hydrology, v. 331, 1, pp.125-136.
- DECAGON DEVICES, INC. 2010. *WP4C Dewpoint PotentiaMeter Operator's Manual, Version 2*. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA.
- DONAGEMMA, G.K., CAMPOS, D.V.B., CALDERANO, S.B., TEIXEIRA, W.G., VIANA, J.H.M (org.), 2011. *Manual de métodos de análises de solos*. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, documentos, 132, 230p.
- DUCKWORTH, O.W., HOLMSTROM, S.J.M., PENA, J., SPOSITO, G. 2009. *Biogeochemistry of iron oxidation in a circumneutral freshwater habitat*. Chemical Geology Journal, v.260, pp.149–158.
- DÜIKER, S.W., RHOTON, F.E., TORRENT, J., SMECK, N. E., LAL, R. 2003. *Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation*. Soil Science Society of America Journal, v.67, pp.606-611.
- DURNER, W. 1994. *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*. Water Resources Research, v.30 (2), 211 – 223.

- ELKHATIB, E.A., HERN, J.L., STANLEY, T.E. 1987. *A rapid centrifugation method for obtaining soil solution*. Soil Science Society of America Journal, v.51, pp.578-583.
- ELSENBEER, H., NEWTON, B. E., DUNNE, T., DE MORAES, J. M. *Soil hydraulic conductivities of latosols under pasture, forest and teak in Rondonia, Brazil*. Hydrological Processes, v. 13, n. 9, p. 1417-1422, 1999.
- FEDDES, R. A., KOWALIK, P. J., ZARADNY, H., 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. John Wiley & Sons, New York, 189p.
- FERREIRA, M., FERNANDES, B., CURI, N., 1999. *Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil*. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v 23. pp. 507-514.
- FERREIRA, F.P., AZEVEDO, A.C., DALMOLIN, R.S.D., GIRELLI, D., 2007. *Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul - Brasil*. Ciência Rural, v. 37, pp. 381-388.
- FIA, F. R. L., DE MATOS, A. T., FIA, R., BORGES, A. C., CECON, P. R. 2017. *Efeito da vegetação em sistemas alagados construídos para tratar águas residuárias da suinocultura*. Revista Brasileira de Eng. Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro , v. 22, n. 2, pp. 303-311.
- FORTIN, D., LANGLEY, S. 2005. *Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals*. Earth-Science Reviews, v.72, pp. 1–19.
- FREIRE ALLEMÃO, A.V., JANSEN, R.C., COELHO NETTO, A.L. 1997. *Caracterização dos sistemas radiculares arbóreos nas encostas florestadas do Maciço da Tijuca – RJ*. In: Anais do 7º SIMP. Geografia física aplicada, Curitiba.
- GHIDIN, A. A., MELO, V.F., LIMA, V.C., COSTA LIMA, J.M.J. 2006. *Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná: II - relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, pp. 307-319.
- GUERINOT, M.L., YI, Y. 1994. *Iron: nutritious, noxious, and not readily available*. Plant Physiol, v.104, pp.815–820.

- HAMBLIN, A. P., 1985. *The influence of soil structure on water movement, crop rot growth and water uptake*. Advances in Agronomy, San Diego, v. 38, pp. 95-158.
- HENSON, I. E., HARUN, M. H. 2005. The influence of climatic conditions on gas and energy exchanges above a young oil palm stand in north Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research* v.17, pp.73–91.
- HILLEL, D., 2003. Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press, 494p.
- HODNETT, M. G., DA SILVA, L. P., DA ROCHA, H. R., SENNA, R. C., 1995. *Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture*. Journal of hydrology, v. 170, n. 1-4, pp. 233-254.
- IRION, G., 1984. *Clay minerals of Amazonian soils*. In: *The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. SIOLI, H (Ed). Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, (Monographiae biologicae, v. 56). pp.537-579.
- JAKOBSEN, R., POSTMA, D. 1999. *Redox zoning, rates of sulfate reduction and interactions with Fe-reduction and methanogenesis in a shallow sandy aquifer*. Romo, Denmark. Geochimica et Cosmochimica Acta, v.63, pp.137–151.
- JARDIM, W. F. 2014. *Medição e interpretação de valores do potencial redox (E H) em matrizes ambientais*. Química Nova, v.37, n.7, pp.1233-1235 .
- JIMÉNEZ-MARTINEZ, J., SKAGGS, T.H., VAN GENUCHTEN, M.TH., CANDELA, L., 2009. *A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas*. Journal of Hydrology, v. 367, n. 1, pp. 138-149.
- JUÁREZ, R. I. N., HODNETT, M.G., FU, R., GOULDEN, M.L., RANDOW, C.V. 2007. *Control of Dry Season Evapotranspiration over the Amazonian Forest as Inferred from Observations at a Southern Amazon Forest Site*. Journal of Climate, v. 20, n. 12, pp. 2827-2839.
- KER, J.C., 1998. *Latossolos do Brasil: Uma revisão*. Geonomos, 5, pp.17-40.
- KRAMER, P.J., BOYER, J.S., 1995. *Water relations of plants and soils (Chapter 5)*. In: *Roots and root systems*. Academic Press, pp.115-166.

KUNERT, N., APARECIDO, L.M.T., BARROS, P., HIGUCHI, N., 2015. *Modeling Potential Impacts of Planting Palms or Tree in Small Holder Fruit Plantations on Ecohydrological Processes in the Central Amazon*. *Forests*, v. 6, n. 8, pp. 2530-2544.

KUNERT, N., APARECIDO, L. M. T., WOLFF, S., HIGUCHI, N., DOS SANTOS, J., DE ARAUJO, A. C., TRUMBORE, S., 2017. *A revised hydrological model for the Central Amazon: The importance of emergent canopy trees in the forest water budget*. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 239, pp. 47-57.

LAL, R., SHUKLA, M. K., 2004. *Principles of Soil Physics*. Taylor & Francis. 716p.

LEHMANN, J., CRAVO, M.S., ZECH, W., 2001. *Organic matter stabilization in a Xanthic Ferralsol of the central Amazon as affected by single trees: chemical characterization of density, aggregate and particle size fractions*. *Geoderma*, v. 99, n. 1, pp. 147-168.

LETERME, B., MALLANTS, D., JACQUES, D., 2012. *Sensitivity of groundwater recharge using climatic analogues and HYDRUS-1D*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp. 2485–2497.

LIMA, H.N., 2001. *Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da amazônia ocidental*. Tese de doutorado. Viçosa: UFV, 176p.

LIMA, H.N., MELLO, J.W. V., SCHAEFER, C.E.G.R., KER, J.C. 2005. *Dinâmica da mobilização de elementos em solos da Amazônia submetidos à inundação*. *Acta Amazonia* [online], 25, pp.317-330.

LINDBERG, J.W., RUNNELS, D.D. 1984. *Ground water reactions. An analysis of equilibrium state applied to Eh measurements and geochemical modeling*. *Science*, v.225, pp.925-927.

LINDSAY, W.L, SCHWAB, A.P. 1982. *The chemistry of iron in soils and its availability to plants*. *J Plant Nutr*, v.5, pp.821–840.

LINDSAY, W. L. 1988. *Solubility and redox equilibria of iron compounds in soils*. In: *Stucki JW(ed) Iron in soils and clay minerals*. Reidel Publ. NATO, Dordrecht, pp 37–60.

- LINDSAY, W. L. 2001. *Chemical Equilibria in Soils*. Blackburn Press. 450p.
- LIU, W., X.U. X., WU, X., YANG, Q., LUO, Y., CHRISTIE, P. 2006. *Decomposition of silicate minerals by Bacillus mucilaginosus I liquid culture*. Environ Geochem Health v.28, pp.133–140.
- LOPER, J.E., BUYER, J.S. 1991. *Siderophores in microbial interactions on plant surfaces*. Mol Plant Microbe Interact, v.4, pp.5–13.
- LOVLEY, D.R., HOLMES, D.E., NEVIN, K.P. 2004. *Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) Reduction*. In: (Ed.). *Advances in Microbial Physiology*: Academic Press, v. 49, pp.219-286.
- LUCAS, Y., LUIZÃO, F.J., CHAUVEL, A., ROUILLER, J., NAHON, D., 1993. *The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils*. Science, v.260, pp.521-523.
- MACEDO, A.G.S. 2012. *Caracterização e variação temporal da solução do solo em argissolo amarelo com horizonte a moderado e a antrópico (terra preta de índio) no município de Iranduba - AM*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 84 p.
- MALLANTS, D., VAN GENUCHTEN M., SIMUNEK J., JACQUES D., EETHARAM S. 2011. *Leaching of Contaminants to Groundwater, Chapter 18*. In: Swartjes, F.A. (Ed.), *Dealing with Contaminated Sites, From theory to practical applications*, Dordrecht, Netherlands, Springer Science Business Media B.V, pp.787 – 850.
- MARKEWITZ, D., DEVINE, S., DAVIDSON, E. A., BRANDO, P., NEPSTAD, D. C. 2010. *Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake*. New Phytologist, v. 187, n. 3, pp. 592-607.
- MARQUES, J.D.O., LIBARDI, P.L., TEIXEIRA, W.G., REIS, A.M., 2004. *Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo, na região Amazônica*. Acta Amazonica, v. 34, pp.145-154.

- MARQUES, J.D.O., LUIZÃO, F.J., TEIXEIRA, W.G., FERREIRA, S.J.F., 2012. *Variações do carbono orgânico dissolvido e de atributos físicos do solo sob diferentes sistemas de uso da terra na Amazônia Central*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, pp. 611-622.
- MENDONÇA, C.C.T.N., PACCOLA, A.A., SARGENTELLI, V., 2005. *Influência do pH na liberação de íons de ferro para a solução de solo de um Latossolo vermelho escuro tratado com sacarose I*. Revista Energia e Agricultura. Botucatu-SP, v.20, pp.30-40.
- MENGEL, K. 1994. *Iron availability in plants tissues-iron chlorosis on calcareous soils*. Plant Soil, v.165, pp.275–283.
- MENGEL, K., KIRKBY, E., KOSEGARTEN, H., APPEL, T. 2001. *Iron*. In: Mengel K, Kirkby EA (eds) Mineral nutrition, 5th edn. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.553–571.
- MEURER, E.J. 2006. *Fundamentos de Química do solo*. 3. ed. Porto Alegre: Evangraf. 285p.
- MILLER, W.P., FRENKEL, H., NEWMAN, K.D. 1990. *Flocculation concentration and sodium/calcium exchange of kaolinitic soil clays*. Soil Science Society of America Journal, v.54, pp.346 – 351.
- MILLERO, F.J., SOTOLONGO, S., IZAGUIRRE, M. 1987. *The oxidation kinetic of Fe(II) in seawater*. Geochimica Cosmochimica Acta, v.51, pp.793-801.
- MIRANDA, J., COSTA, L.M., RUIZ, H.A., EINLOFT, R. 2006. *Composição química da solução do solo sob diferentes coberturas vegetais e Análise de carbono orgânico solúvel no deflúvio de pequenos cursos de água*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.30, pp.633-647.
- MUALEM, Y. 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resource Research, v.12 (3), pp. 513 – 522.

MULHOLLAND, D.S., BOAVENTURA, G.R., ARAUJO, D.F. 2012. *Geological and anthropogenic influences on sediment metal composition in the upper Paracatu River Basin, Brasil*. Environmental Earth Science.v.67 (5), pp. 1307–1317

MULHOLLAND, D.S., POITRASSON, F., BOAVENTURA, G.R., ALLARD, T., VIEIRA, L.C., SANTOS, R.V., MANCINI, L., SEYLER, P., 2014. Insights on iron sources and pathways in the Amazon River provided by isotopic and spectroscopic studies. Geochim. Cosmochim. Acta. v.377, pp. 1-11.

MUNIZ, R.S. TEIXEIRA, W. G., BUENO FILHO., J. S. S., PÉREZ, D. V., BOARI, A., PINA, A. J. A. 2011. *Dinâmica do potencial redox em condições de alagamento em amostras de Latossolo Amarelo, textura média do nordeste paraense*. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Uberlândia-MG.

NEPSTAD, D. C., DE CARVALHO, C. R., DAVIDSON, E. A., JIPP, P. H. 1994. *The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures*. Nature, v. 372, n. 6507, pp. 666-669.

NEPSTAD, D. C., P. MOUTINHO, M. B. DIAS-FILHO, E. DAVIDSON, G. CARDINOT, D. MARKEWITZ ,R. FIGUEIREDO, N. VIANNA, J. CHAMBERS, D. RAY, J. B. GUERREIROS, P. LEFEBVRE, L. STERNBERG, M. MOREIRA, L. BARROS, F. Y. ISHIDA, I. TOHLVER, E. BELK, K. KALIF AND K. SCHWALBE 2002. *The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest*. Journal of Geophysical Research 107(D20): 8085,pp.1-18.

NEU, V. *Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus-AM*. 2005. Dissertação de mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba/SP, 93p.

NGATCHA, B.N., MUDRY, J., SARROT, R.J. 2007. *Groundwater Recharge from Rainfall in the Southern Border of Lake Chad in Cameroon*. World Applied Sciences Journal, v.2, pp.125-131.

NUNES, V.M., ALLEMÃO, A.V.F., MIRANDA, J.C., CASTRO, J.R., COELHO NETTO, A.L. 1992. *Sistemas radiculares e hidrologia de encostas florestadas*:

subsídios à análise de estabilidade. In: Anais do Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encostas (COBRAE), v.1, Rio de Janeiro, pp.781-797.

NUNES, M.C.M., CASSOL, E.A. 2011. *Produção de sedimentos pela erosão em entressulcos em três Latossolos do Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.15, pp.541-547.

OLIVEIRA, L.L.D., DA COSTA, R.F., DE SOUSA, A.A.S., DA COSTA, A.C.L., BRAGA, A.P., 2008. *Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental*. Acta Amazonica, v. 38, pp.723-732.

PONNAMPERUMA, F.N., 1972. *The chemistry of submerged soils*. Adv. Agron., New York, 24, pp.29-96.

PORTMANN, F.T., DÖLL, P., EISNER, S., FLÖRKE, M., 2013. *Impact of climate change on renewable groundwater resources: assessing the benefits of avoided greenhouse gas emissions using selected CMIP5 climate projections*. Environmental Research Letters, v.8, 14p.

PRADO, R.M., CENTURION, J.F., 2001. *Alterações na cor e no grau de floculação de um Latossolo Vermelho-Escuro sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar*. Pesquisa Agropecuária Brasileira.v.36, n.1, pp.197-203.

QAFOKU, N.P., SUMNER, M.E. 2002. *Adsorption and desorption of indifferent ions in variable charge subsoils: The possible effect of particle interactions on the counterion charge density*. Soil Science Society of America Journal, v.66, pp.1231 – 1239.

QAFOKU, N.P., VAN RANST, E., NOBLE, A., BAERT, G. 2004. *Variable charge soils: Their mineralogy, chemistry and management*. Advances in Agronomy, v.84, pp. 159 – 215.

R DEVELOPMENT CORE TEAM., 2014. A language and environment for statistical computing.R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RADAMBRASIL, 1977. *FOLHA SB19 JURUÁ. Vol. 15*. Ministério das Minas e Energia – Departamento Nacional da Produção Mineral. Levantamentos de Recursos Naturais. Rio de Janeiro.

- RAISWELL, R., CANFIELD, D. E. 2012. *The iron biogeochemical cycle past and present*. Geochemical Perspectives, 1.ed, v.1, pp.1- 232.
- RAMALHO FILHO, A., MOTTA, P.E.F., NAIME, U.J., GONCALVES, A.O., TEIXEIRA, W.G. 2010. *Zoneamento agroecológico, produção e manejo da cultura de palma de óleo na Amazônia*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 216 p.
- RICHARDS, L.A. 1931. *Capillary conduction of liquids in porous mediums*. Physics, 1, pp.318-333.
- RODRIGUES, T.E., 1996. *Solos da Amazônia*. In: ALVAREZ, V.H.V. FONTES, L.E.F., FONTES, M.P.F. *Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, SBCS/UFV, pp. 16-60.
- RÖMHELD, V., MARSCHNER, H. 1986. *Mobilization of iron in rhizosphere of different plant species*. In: Tinker PBH, Läuchli A (eds) *Advances in plant nutrition*, v.2, pp.155–204.
- ROSE, A.W., KATO, T., MACHESKY, M.L. 1983. *The significance of biogenic element cycling in ancient tropical soils*. Chemical Geology, 107, pp.401-403.
- SÁ, M.A.C.D., DE LIMA, J.M., SILVA, M.L.N., JUNIOR, M.S.D. 2000. *Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, pp.1825-1834.
- SANTOS, G. G., MARCHÃO, R. L., SILVA, E. M., SILVEIRA, P. M., BECQUER, T. 2011a. *Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.46, pp.1339-1348.
- SANTOS, H.G., CARVALHO JÚNIOR, W., DART, R.O., ÁGLIO, M.L.D., SOUZA, J.S., PARES, J.G., FONTANA, A., MARTINS, A.L.S., OLIVEIRA, A.P. 2011b. *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 67p.
- SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., CUNHA, T.J.F., OLIVEIRA, J.B. 2013a. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3ª ed. revisada e ampliada.

Brasília, DF: Embrapa, 353p.

SANTOS, R.D., LEMOS, R.C., SANTOS, H.G., KER, J.C., ANJOS, L.H.C., SHIMIZU, S.H. 2013b. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 6ª ed. revisada e ampliada, Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 100p.

SCANLON, B.R., ANDRASKI, B.J., BILSKIE, J. 2002. *Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential*. In: *Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods*, Dane, J.H. e Topp, G.C. (Eds), Soil Science Society of America, Madison, WI, pp.643 – 670.

SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ, AND M. TH. VAN GENUCHTEN. 2001. *Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions*. *Journal of Hydrology*. v.251, pp.163-176.

SCHAEFER, C.E.G.R., AMARAL, E.F., MENDONÇA, B.A.F., OLIVEIRA, H., LANI, J.L., COSTA, L.M., FERNANDES FILHO, E.I. 2007. *Soil and vegetation carbon stocks in Brazilian Western Amazonia: relationships and ecological implications for natural landscapes*. *Environ Mon Assess*. pp.1-15.

SCHAEFER, C.E.G.R.; FABRIS, J.D., KER, J.C. *Minerals in the clay fraction of brazilian Latosols (Oxisols): A review*. *Clay Miner*, v.43, pp.137-154, 2008.

SCHLEGEL, P., HUWE, B., TEIXEIRA, W. G., 2004. *Modelling species and spacing effects on root zone water dynamics using Hydrus-2D in an Amazonian agroforestry system*. *Agroforestry Systems*, 60 (3), pp. 277-289.

SCHROTH, G., RODRIGUES, M.R.L., D'ANGELO, S.A. 2000. *Spatial patterns of nitrogen mineralization, fertilizer distribution and roots explain nitrate leaching from mature Amazonian oil palm plantation*. *Soil Use and Management*, v.16, pp.222-229.

SCHWERTMANN, U., KÄMPF, N., 1983. *Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.7, pp.251-255.

SCHWERTMANN, U.1991. *Solubility and dissolution of iron oxides*. *Plant Soil* 130:1–25

SCORZA JUNIOR, R.P., SILVA, J.P., RIGITANO, R.L.O., 2010. *Simulation of moisture profiles in a Latossol in Dourados region, in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil*. Eng. Agríc., Jaboticabal, 30 ed, v.1, pp.22-32.

SÉGALEN, P. 1971. *Metallic oxides and hydroxides in soils of the warm and humid areas of the world: formation, identification, evolution*. Soils and Tropical Weathering. Proceedings of the Bandung Symposium, UNESCO, Paris, pp.25 – 38.

SENNA, M.C.A., COSTA, M.H., DAVIDSON, E.A., NOBRE, C.A., 2014. Modeling the impact of net primary production dynamics on post-disturbance Amazon savannization. *Anais da Academia Brasileira de Ciências (Impresso)*, v. 86, pp. 621-632.

SILVEIRA, C.S. 2004. *Infiltração e transporte de solutos na zona não saturada de um solo florestal – Parque Nacional da Tijuca RJ*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVEIRA, C. S., BARBOSA, M. C., COELHO NETO, A. L., 2005. *A Tracer Experiment as an Alternative Methodology to Understand Infiltration Pathway in a Tropical Rainforest Soil*. *Soils and Rocks*, São Paulo, 28 (3), pp. 261 – 270.

ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M., van GENUCHTEN M.TH. 2013. *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media*. Version 4.17, Dep. of Environmental Sciences Univ. of California, Riverside, USA, 342p.

ŠIMŮNEK, J., HOPMANS, J.W. 2009. *Modeling compensated root water and nutrient uptake*. *Ecological Modelling Journal*, v.220, pp.505–521.

ŠIMŮNEK, J., van GENUCHTEN, M.TH., 2008, *Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS*, *Vadose Zone Journal*, v.7, pp.782-797.

SINGER, P.C., STUMM, W. 1970. *Acid mine drainage: the rate determining step*. *Science*, v.167, pp.1121-1123.

- SOBOLEV, D., RODEN, E.E. 2004. *Characterization of a neutrophilic, chemolithoautotrophic Fe(II)-oxidizing beta-proteobacterium from freshwater wetland sediments*. Geomicrobiology journal, v.21, pp.1–10.
- SPOSITO, G. 1989. *The chemistry of soils*. New York, Oxford University Press, 277p.
- STEFANOSKI, D. C., SANTOS, G. G., MARCHÃO, R. L., PETTER, F. A., PACHECO, L. P. 2013. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301-1309.
- STERNBERG, L.S.L., MOREIRA, M.Z., NEPSTAD, D.C., 2002. *Uptake of water by lateral roots of small trees in an Amazonian Tropical Forest*. Plant and Soil, 238, pp. 151-158.
- STUCKI, J.W., LEE, K., ZHANG, L., LARSON, R.A. 2002. *Effects of iron oxidation state on the surface and structural properties of smectites*. Pure and Applied Chemistry, v.74, pp.2145–2158
- TABOADA, M.A., 2004. *Soil structural behaviour of flooded soils*. International Atomic Energy Agency (IAEA), pp.488-500.
- TABOADA, M.A., 2006. *Soil structural behaviour in flooded and agricultural soils of the Argentine pampas*. PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 361p.
- TANI, M., ABDUL RAHIM, N., YASUDA, Y., NOGUCHI, S., SITI AISAH, S., MOHD MD, S., TAKANASHI, S. 2003. *Long-term estimation of evapotranspiration from a tropical rain forest in Peninsular Malaysia*. *Water Resources Systems – Water Availability and Global Change*. (Proc. of the Symposium HS02a held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003.) IAHS Publ. n. 280, pp. 267-274.
- TEIXEIRA, W.G., 2001. *Land use effects on soil physical and hydraulic properties of a clayey Ferralsol in the Central Amazon*. Bayreuther Bodenkundliche Berichte v. 72, pp. 1-255.
- TEIXEIRA, W.G. 2014a. *Estudos dos solos de várzea da Amazônia Brasileira*. Projeto Casadinho CNPq, EMBRAPA CNPS (Centro Nacional de Pesquisa de Solos),

Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da UFAM, Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da UFV.

TEIXEIRA, W.G. 2014b. *Formas reduzidas de minerais na solução do solo como indutores do Amarelecimento Fatal em palma de óleo no Brasil*. Projeto de Pesquisa EMBRAPA / EMBRAPA Amazônia Ocidental / Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPq).

TEIXEIRA, W. G., PINA, A. J.A., BOARI, A. J., MARTINS, G. C., LIMA, W. A. A., MUNIZ, R. S., GONCALVES, A. O., CUBAS ENCINAS, O., ARAUJO, A. C. 2017. *A hipótese abiótica como agente causal do amarelecimento fatal (AF) da palma de óleo (Elaeis guineensis Jacq.) no Brasil*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém, PA.

TOMASELLA, J., HODNETT, M. G. 1996. Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia. Amazonian deforestation and climate, pp. 101-124.

TORRENT, J., CABEDO, A. 1986. *Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in Southern Spain*. Geoderma v. 37 pp.57–66.

VALLEJO, R.R., 1982. *A influência do “litter” florestal na distribuição de águas pluviais*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro.

van GENUCHTEN, M.TH. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Society of America Journal, v.44, pp. 892 – 898.

van GENUCHTEN, M. TH. 1981. *Nonequilibrium Transport parameters from miscible displacement experiment*. Research report, 119, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA.

van GENUCHTEN, M. TH. 1987. *A numerical model for water and solute movement in and below the root zone*. Research Report No 121, U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

VIEIRA, L.S., SANTOS, P.C.T., 1987. *Amazônia: seus solos e outros recursos naturais*. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 416p.

VILLA NOVA, N. A., SALATI, E., MATSUI, E. 1976. *Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica*. Acta Amazonica, v. 6, n. 2, pp. 215-228.

VON RANDOW, C., MANZI, A. O., KRUIJT, B., DE OLIVEIRA, P. J., ZANCHI, F. B., SILVA, R. L., CARDOSO, F. L. 2004. *Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia*. Theoretical and Applied Climatology, v. 78, n. 1, pp. 5-26.

YOUNG, M. H., SISSON, J. B. 2002. Tensiometry. In: Dane JH, Topp GC (eds). *Methods of soil analysis, Part 4—Physical methods*. American Society of Agronomy, Madison, USA, pp. 575–608.

WADA, Y., WISSER, D., BIERKENS, M.F.P. 2014. *Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources*. Earth System Dynamics. v.5, pp. 15–40.

ANEXO I

MANEJOS UTILIZADOS SOB CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO EM UM LATOSSOLO AMARELO AMAZÔNICO

Na área de estudo (Figura I.3) localizada no município de Moju(PA), com até 5% de declividade do terreno, foram testados diferentes sistemas de manejo para reduzir a migração do íon ferroso para a solução do solo através do aumento do pH em combinação com aumento do potencial redox do solo.

Os tratamentos utilizados na área foram:

Drenagem Vertical (DV) - Foi realizada drenagem vertical no solo na projeção da copa de cinco palmas de óleo (*Elaeis guineensis Jacq.*) localizadas em cinco pontos na área de estudo (Figura I.3).

O manejo drenagem vertical consiste em fazer cinco “buracos” com diâmetro de 20 cm e profundidade de 1m em torno da palma de óleo a uma distância de 1,5 m de sua haste principal.



Figura I.1 - Tratamento “drenagem vertical” na área de estudo (Foto: Wenceslau Teixeira).

Adubação e Calagem (AC) - Foram realizadas adubação e calagem em cinco palmas de óleo (*Elaeis guineensis Jacq.*) localizados em cinco pontos na área de estudo (Figura I-3). As adubações foram de 10 kg de calcário + 1,5 kg de Fosfato Arad / 1,5kg de NPK-150920 + 50g de borax + 500g de KCL + 100g de FTE.

Seca Dendê (SD) - Foi realizada uma cobertura utilizando material plástico para redução da precipitação efetiva no solo (Figura I.2) sob a projeção da copa de cinco palmas de óleo (*Elaeis guineensis Jacq.*) localizadas em cinco pontos na área de estudo (Figura I.3)

O tratamento Seca Dendê consiste em colocação de uma malha de polietileno sobre a copa da palma de óleo evitando o acúmulo de água em sua copa.



Figura I. 2 – Tratamento “seca dendê” na área de estudo (Foto: Rodrigo Muniz)

Área sem vegetação (AF): Foram coletados em três lugares sem vegetação localizados em três pontos na área de estudo (Figura I-3).

Plantas sadias (SAA): Foram coletado o solo próximo a três palma de óleo sadias (*Elaeis guineensis Jacq.*) localizadas em três pontos da área de estudo (Figura I-3).

Tabela I.1 – Manejo utilizados no tratamento durante o experimento

Tratamentos	Correções e fertilizações
Seca dendê (SD), Drenagem vertical (DV) e a Adubação e calagem (AC)-realizado aplicação de calcário + adubação	10 kg de calcário + 1,5 kg de Fosfato Arad / 1,5kg de NPK-150920 + 50g de borax + 500g de KCL + 100g de FTE
Área sem vegetação (AF)	Nenhum manejo
Palmas sadias (SAA)	Limpeza da coroa

Foi realizado o teste de variância para os dados de condutividade elétrica (Tabela I-2), pH (Tabela I-3) e ferro (Tabela I.4) na solução do solo coletados no período de 420 dias (30 períodos).

Tabela I.2 - Análise de variância dos dados de condutividade elétrica na solução do solo.

Variável	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Trat	4	34214	8554	0,5677	0,69017
Prof	1	10210	10210	0,6777	0,43112
Tempo	29	3476073	119865	7,9559	< 2,2e-16 ***
Trat:Prof	4	116230	29057	1,9287	0,18990
Trat:Tempo	108	964529	9014	0,5983	0,99809
Prof:Tempo	28	495007	17679	1,1734	0,28533
Trat:Prof:Tempo	90	1993740	22153	1,4704	0,04412 *

Obs: *Significativo no nível de 5% de significância; **Significativo no nível de 1% de significância; *** Significativo no nível de 0,1% de significância.

Tabela I.3 - Análise de variância dos dados de pH na solução do solo.

Variável	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Trat	4	0,835	0,20867	1,5725	0,228295
Prof	1	1,863	1,86327	14,0412	0,002158
Tempo	29	43,042	1,48419	11,1845	< 2,2e-16 ***
Trat:Prof	4	0,172	0,04301	0,3241	0,857140
Trat:Tempo	107	16,587	0,15649	1,1792	0,151216
Prof:Tempo	28	17,753	0,63403	4,7779	8,362e-11 ***
Trat:Prof:Tempo	90	16,573	0,18415	1,3877	0,036834 *

Obs: *Significativo no nível de 5% de significância; **Significativo no nível de 1% de significância; *** Significativo no nível de 0,1% de significância.

Tabela I.4 - Análise de variância dos dados de ferro na solução do solo.

Variável	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Trat	4	0,1074	0,02685	0,6281	0,649612
Prof	1	0,3888	0,38878	9,0958	0,008268 **
Tempo	29	6,1870	0,21335	4,9914	8,393e-14 ***
Trat:Prof	4	0,1714	0,04286	1,0027	0,438004
Trat:Tempo	112	7,0770	0,06376	1,4916	0,003768 **
Prof:Tempo	28	1,2661	0,04522	1,0579	0,389229
Trat:Prof:Tempo	79	2,5583	0,03238	0,7576	0,930767

Obs: *Significativo no nível de 5% de significância; **Significativo no nível de 1% de significância; *** Significativo no nível de 0,1% de significância.

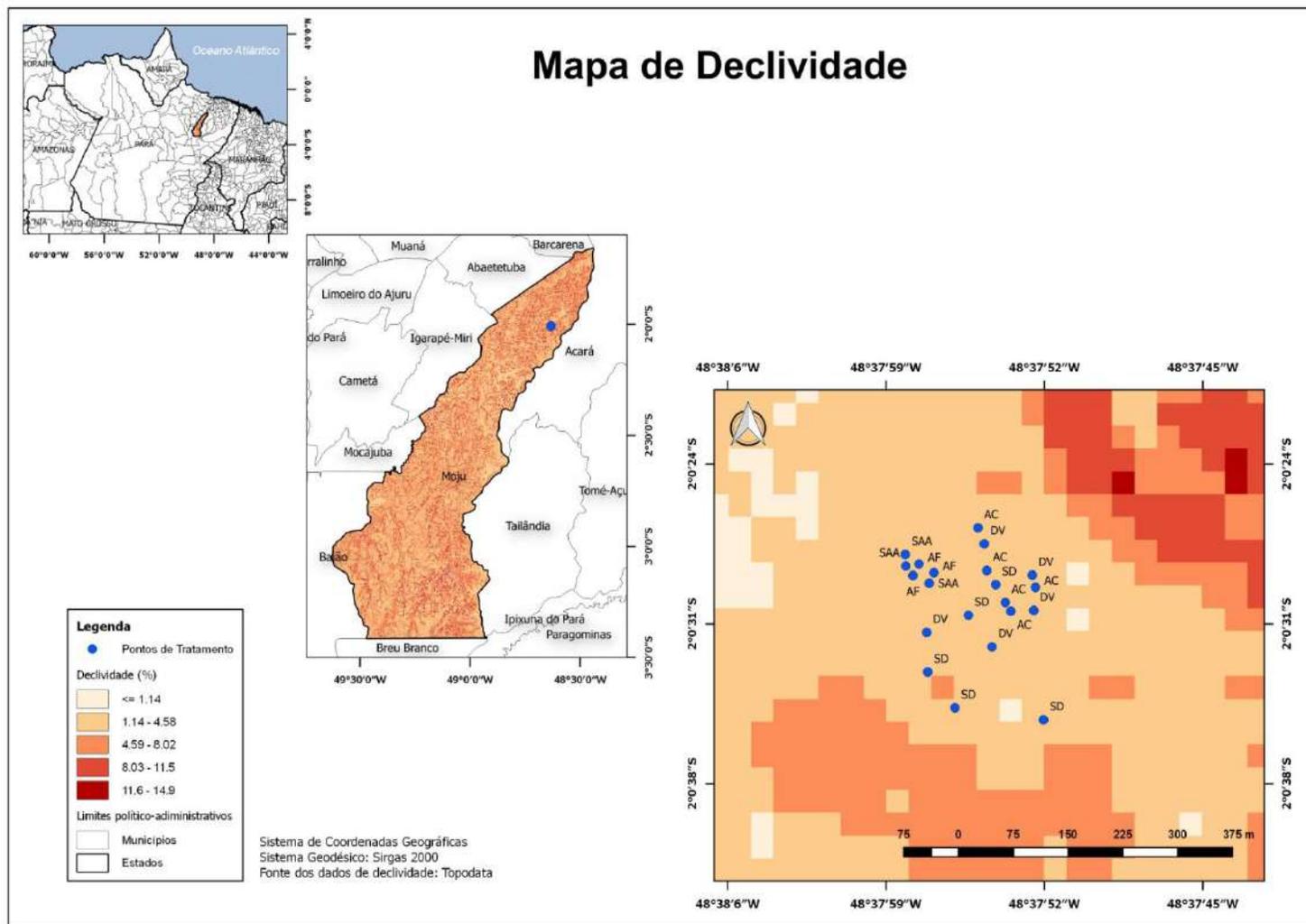


Figura I.3 – Declividade da área de estudo e localização dos tratamentos.

ANEXO II

**COMPARAÇÃO ENTRE DADOS CALCULADOS DE
EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL MEDIANTE EQUAÇÃO DE
PENMAN-MONTEITH PELO HYDRUS 1D E POR ALGORITMO
IMPLEMENTADO EM PLANILHA EXCEL**

O cálculo da equação de Penman-Monteith foi realizado pelo programa Hydrus 1D utilizando os dados da estação meteorológica automática de Tomé-Açu-PA.

Paralelamente, foi realizado o cálculo através de uma planilha da equação de Penman-Monteith para confirmação dos valores calculados pelo programa Hydrus 1D.

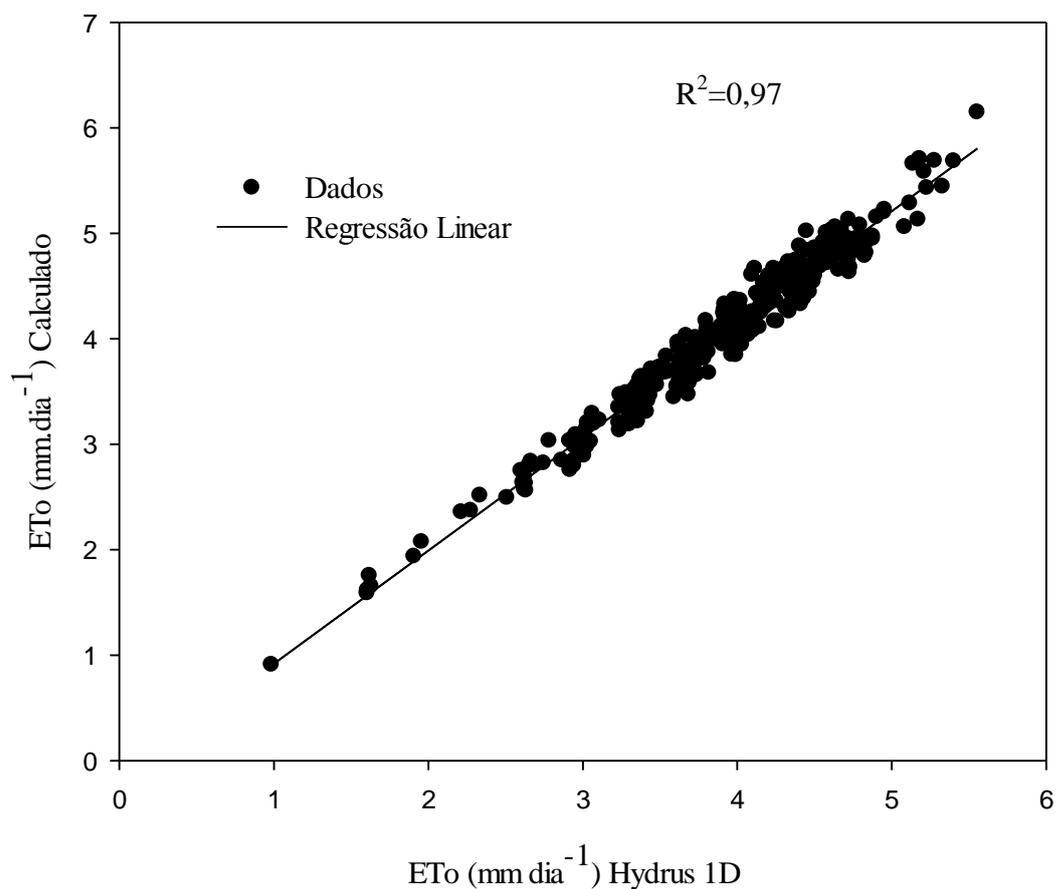


Figura II. 1 – Correlação entre os dados de evapotranspiração calculados pelo programa Hydrus e por meio de algoritmo implementado em planilha Excel.

Foi observado, na figura II. 1, que houve elevada correlação ($R^2=0,97$) entre os dados de evapotranspiração calculados pelo programa Hydrus 1D e os dados calculados de evapotranspiração.

Para a estimativa da ETo pela equação de Pennam-Monteith, utilizaram-se os dados diários de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade de vento e radiação global obtidos na estação meteorológica automática de Tomé - Açú do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que podem ser acessados no endereço: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>.

Estação de Tomé – Açú – PA - Código OMM: 81711;

_ Registro: 22 UTC;

_ Aberta em: 14/10/2007;

_ Latitude: -2.592606°; Longitude: -48.360586°;_Altitude: 43 metros.

Os dados obtidos na estação automática precisam ser ajustados às unidades utilizadas na equação de ETo, para os quais são necessários os seguintes ajustes, conforme recomendado por Allen *et al.* (1998):

a) Temperatura média (°C) - para obtenção da temperatura média, utilizam-se as temperaturas máximas e mínimas obtidas no dia. Com esses dados, a temperatura média é obtida pela expressão II.1.

$$T_{med} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \quad (II.1)$$

b) Umidade relativa média (%) - do mesmo modo que a temperatura, utiliza-se a umidade relativa máxima e mínima diárias para o cálculo da pressão de saturação do vapor de água.

c) O valor da pressão atmosférica, média diária, para cálculo da ETo, obtido no INMET, utiliza a unidade de medida hectopascal (hPa), que deve ser dividida por 10 para ser convertido em quilopascal (kPa).

d) O dado de velocidade de vento ($m s^{-1}$) utilizado é obtido pelo INMET a 10 m de altura, havendo necessidade de correção, uma vez que, normalmente, o valor a ser utilizado é a velocidade do vento a 2 m. A partir da média aritmética dos valores diários, a correção para 2 m de altura é dada pela expressão II.2.

$$U_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (II.2)$$

$u_2 \Rightarrow$ velocidade do vento a 2 m de altura ($m s^{-1}$);

$u_z \Rightarrow$ velocidade do vento a altura z (m s^{-1});

$z \Rightarrow$ altura onde a velocidade de vento está sendo medida (m).

e) Os dados de radiação solar global, obtidos no INMET em kJ m^{-2} , integrados no período do dia em que a radiação global apresentar resultados positivos. Considerando que, para o cálculo da ET_o , a radiação global é dada em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, o somatório dos valores horários positivos, obtidos na estação automática, deverá ser dividida por 1000.

Com informações obtidas na homepage do INMET, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser obtida pela equação, na forma II.3.

$$Et_o = \frac{0,408 \nabla (R_n - G) + \gamma \left[\frac{\pi}{T+273} \right] u_2 (e_s + e_a)}{\nabla + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{II.3})$$

sendo:

$ET_o \Rightarrow$ evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

$R_n \Rightarrow$ saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

$G \Rightarrow$ fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

$T \Rightarrow$ temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$);

$u_2 \Rightarrow$ velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s^{-1});

$e_s \Rightarrow$ pressão de saturação do vapor média diária (kPa);

$e_a \Rightarrow$ pressão atual de vapor média diária (kPa);

$\Lambda \Rightarrow$ declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e,

$\gamma \Rightarrow$ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A inclinação da curva de pressão de saturação (∇) é obtida em função da temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$) e é dada pela expressão II.4.

$$\Lambda = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T+237,3} \right) \right]}{(T+237,3)^2} \quad (\text{II.4})$$

O saldo de radiação (R_n) que é o resultado das trocas de energia radiativa sobre a superfície vegetada, pode ser estimado através de relações empíricas em função de dados meteorológicos, obtido pela expressão II.5.

$$R_n = R_{nc} - R_{nl} \quad (\text{II.5})$$

onde:

R_{nc} => balanço de radiação de ondas curtas [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$];

R_{nl} => balanço de radiação de ondas longas [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

O balanço de ondas curtas (R_{nc}) expresso pela equação II.6.

$$R_{nc} = (1 - \alpha) R_s \quad (\text{II.6})$$

em que, o albedo, para as condições estabelecidas pela metodologia, tem um valor de 0,23 e o R_s é a radiação solar global, em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, medida na estação meteorológica automática.

O balanço de ondas longas (R_{nl}) pode ser obtido através da expressão II.7:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{\max})^4 + (T_{\min})^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left[1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right] \quad (\text{II.7})$$

sendo:

σ => constante de Stefan Boltzmann, cujo valor é $5,6697 \times 10^{-8} \text{ WJ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$;

T_{\max} => temperatura máxima absoluta do ar durante o dia [K];

T_{\min} => temperatura mínima absoluta do ar durante o dia [K];

e_a => pressão atual do vapor d'água [kPa];

R_{so} => radiação solar para dias sem nuvens [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$].

A conversão dos valores das temperaturas diárias absolutas máxima e mínima pode ser feita a partir da expressão II.8.

$$T_{(k)} = T_{(eC)} + 273,16 \quad (\text{II.8})$$

A pressão atual do vapor d'água (e_a) é obtida em função pressão de saturação do vapor d'água (e_o) à temperatura máxima e mínima, e da umidade relativa do ar (UR) máxima e mínima, podendo ser obtida a partir da equação II.9.

$$e_a = \frac{e^0(T_{\min}) \frac{UR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) \frac{UR_{\min}}{100}}{2} \quad (\text{II.9})$$

A obtenção da pressão de saturação do vapor d'água é obtida através da temperatura máxima e mínima, dada em kPa, que pode ser calculada a partir das expressões abaixo:

- Para temperatura máxima:

$$e^0(T_{\max})=0,6108\exp\left[\frac{17,27T_{(\max)}}{T_{(\max)}+237,3}\right] \quad (\text{II.10})$$

- Para temperatura mínima

$$e^0(T_{\min})=0,6108\exp\left[\frac{17,27T_{(\min)}}{T_{(\min)}+237,3}\right] \quad (\text{II.11})$$

O valor da radiação solar para dias de sol claro (R_{so}) representa o foto período ou o número máximo de brilho solar, dado pela expressão II.12.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (\text{II.12})$$

onde:

$z \Rightarrow$ altitude do local [m];

$R_a \Rightarrow$ radiação solar extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$];

A radiação solar extraterrestre (R_a) é obtida pela expressão:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (\text{II.13})$$

onde:

$G_{sc} \Rightarrow$ constante solar [$0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$];

$d_r \Rightarrow$ inverso da distância relativa Terra-Sol [rad];

$\omega_s \Rightarrow$ ângulo horário de por-do-sol [rad];

$\varphi \Rightarrow$ latitude local [rad];

$\delta \Rightarrow$ declinação solar [rad].

A transformação dos valores de ângulo em graus decimais para radianos é feita através da expressão II.14

$$[\text{Radianos}] = \frac{\pi}{180} [\text{Graus decimais}] \quad (\text{II.14})$$

O inverso da distância relativa Terra-Sol (d_r) é dada pela expressão II.15.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left[\frac{2\pi}{365} J\right] \quad (\text{II.15})$$

sendo J o dia juliano que representa a ordem numérica do dia do ano, ou seja, para o primeiro de janeiro o dia Juliano é 1, e, para 31 de dezembro, o dia Juliano é 365 ou 366.

A declinação solar (δ) é dada pela expressão II.16.

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left[\frac{2\pi}{365} j - 1,39\right] \quad (\text{II.16})$$

O ângulo horário (ω_s) pode ser obtido pela expressão II.17.

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi) \tan(\delta)] \quad (\text{II.17})$$

O cálculo da pressão média de saturação do vapor (e_s) é obtido a partir da média aritmética da pressão de saturação do vapor d'água (e_o) à temperatura máxima e mínima, pela equação II.18.

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (\text{II.18})$$

O valor do fluxo de calor do solo (G) da equação de ET_o pode ser considerado zero em decorrência da pequena magnitude do fluxo do calor do solo em relação ao saldo de radiação para observação de um dia (Allen *et al.*, 1998)

A constante psicrométrica (γ), dada em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, é função da pressão atmosférica e pode ser obtida a partir da expressão II.19.

$$\gamma = \frac{c_p P_o}{L \varepsilon} = 0,665 \times 10^{-3} \quad (\text{II.19})$$

onde:

$C_p \Rightarrow$ é o calor específico do ar seco à pressão constante ($1,003 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

$P_o \Rightarrow$ pressão atmosférica (kPa);

$L \Rightarrow$ calor latente de evaporação da água ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$);

$\varepsilon \Rightarrow$ razão entre as massas moleculares da água e do ar seco (0,622).

ANEXO III

DADOS DE POTENCIAL MÁTRICO COLETADOS NA ÁREA SEM VEGETAÇÃO

Tabela III.1- Dados de potencial mátrico em três pontos sem vegetação na área de estudo no período de 373 dias.

Data	Dias no Hydrus	ÁREA SEM VEG 1			ÁREA SEM VEG 2			ÁREA SEM VEG 3		
		10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm
----- cm H ₂ O -----										
01/08/2009	1	134,9	116,16	127,74	-	111,12	64,74	105,92	102,3	134,04
02/08/2009	2	153,8	135,06	142,86	90,8	122,46	60,96	126,08	112,38	142,86
03/08/2009	3	191,6	58,2	299,1	236,96	-	-	291,14	631,5	67,26
04/08/2009	4	160,1	102,3	189,48	163,88	-	-	173,96	281,22	113,88
05/08/2009	5	172,7	138,84	163,02	-	132,54	60,96	119,78	126,24	170,58
06/08/2009	6	87,02	67,02	100,02	-	77,1	58,44	-	78,36	147,9
07/08/2009	7	109,7	87,18	101,28	-	92,22	55,92	94,58	88,44	132,78
08/08/2009	8	134,9	97,26	102,54	124,82	118,68	89,94	108,44	102,3	129
09/08/2009	9	97,1	83,4	102,54	94,58	85,92	66	-	87,18	136,56
10/08/2009	10	132,38	119,94	116,4	107,18	111,12	74,82	105,92	104,82	134,04
11/08/2009	11	137,42	111,12	121,44	-	111,12	64,74	110,96	106,08	140,34
12/08/2009	12	147,5	124,98	134,04	-	122,46	59,7	122,3	116,16	146,64
13/08/2009	13	138,68	118,68	123,96	-	114,9	66	112,22	108,6	140,34
14/08/2009	14	95,84	99,78	131,52	95,84	84,66	76,08	98,36	87,18	157,98
15/08/2009	15	127,34	113,64	129	97,1	107,34	67,26	110,96	103,56	147,9
16/08/2009	16	144,98	112,38	122,7	-	112,38	59,7	116	109,86	131,52
17/08/2009	17	122,3	108,6	127,74	90,8	101,04	67,26	108,44	99,78	145,38
18/08/2009	18	131,12	111,12	126,48	93,32	106,08	64,74	110,96	103,56	141,6
19/08/2009	19	204,2	150,18	155,46	-	157,74	67,26	165,14	156,48	155,46
20/08/2009	20	234,44	150,18	190,74	-	161,52	68,52	171,44	166,56	170,58
21/08/2009	21	189,08	136,32	156,72	-	141,36	66	148,76	141,36	155,46
22/08/2009	22	209,24	145,14	166,8	-	152,7	67,26	161,36	153,96	160,5
23/08/2009	23	317,6	210,66	204,6	84,5	176,64	59,7	204,2	196,8	204,6
24/08/2009	24	311,3	205,62	68,52	-	182,94	55,92	199,16	210,66	218,46
25/08/2009	25	278,54	186,72	146,64	-	170,34	60,96	187,82	186,72	194,52
26/08/2009	26	103,4	132,54	255	-	108,6	53,4	97,1	161,52	248,7
27/08/2009	27	124,82	145,14	219,72	-	107,34	53,4	104,66	152,7	251,22
28/08/2009	28	158,84	147,66	232,32	-	119,94	53,4	126,08	153,96	253,74
29/08/2009	29	181,52	172,86	246,18	-	133,8	54,66	147,5	162,78	253,74
30/08/2009	30	216,8	198,06	258,78	-	145,14	54,66	166,4	177,9	261,3
31/08/2009	31	221,84	195,54	243,66	-	131,28	49,62	179	185,46	283,98
01/09/2009	32	122,3	161,52	292,8	-	116,16	60,96	104,66	162,78	283,98
02/09/2009	33	88,28	87,18	189,48	87,02	74,58	49,62	-	108,6	169,32
03/09/2009	34	109,7	101,04	130,26	113,48	90,96	47,1	98,36	101,04	150,42

04/09/2009	35	110,96	114,9	141,6	99,62	90,96	47,1	90,8	104,82	150,42
05/09/2009	36	102,14	101,04	152,94	99,62	85,92	49,62	94,58	104,82	156,72
06/09/2009	37	156,32	131,28	154,2	128,6	112,38	53,4	126,08	123,72	155,46
07/09/2009	38	109,7	135,06	164,28	97,1	101,04	59,7	97,1	122,46	168,06
08/09/2009	39	146,24	128,76	166,8	105,92	108,6	53,4	110,96	117,42	169,32
09/09/2009	40	137,42	131,28	161,76	109,7	107,34	54,66	110,96	121,2	164,28
10/09/2009	41	195,38	141,36	194,52	129,86	130,02	50,88	142,46	146,4	186,96
11/09/2009	42	218,06	153,96	208,38	-	138,84	54,66	157,58	159	194,52
12/09/2009	43	243,26	169,08	228,54	147,5	147,66	57,18	173,96	175,38	208,38
13/09/2009	44	218,06	153,96	209,64	138,68	138,84	53,4	157,58	160,26	195,78
14/09/2009	45	225,62	159	214,68	-	141,36	54,66	162,62	164,04	199,56
15/09/2009	46	228,14	160,26	217,2	-	-	54,66	163,88	166,56	200,82
16/09/2009	47	109,7	72,06	166,8	-	83,4	58,44	-	90,96	202,08
17/09/2009	48	116	103,56	160,5	-	93,48	60,96	97,1	97,26	181,92
18/09/2009	49	105,92	97,26	155,46	-	88,44	55,92	-	92,22	176,88
19/09/2009	50	136,16	122,46	159,24	117,26	98,52	87,42	102,14	101,04	174,36
20/09/2009	51	116	133,8	166,8	103,4	96	97,5	84,5	107,34	179,4
21/09/2009	52	118,52	117,42	160,5	109,7	93,48	79,86	93,32	99,78	176,88
22/09/2009	53	123,56	123,72	161,76	109,7	96	87,42	93,32	102,3	176,88
23/09/2009	54	121,04	151,44	207,12	76,94	99,78	55,92	93,32	130,02	200,82
24/09/2009	55	121,04	130,02	175,62	98,36	96	73,56	93,32	109,86	184,44
25/09/2009	56	129,86	159	237,36	94,58	90,96	63,48	132,38	126,24	147,9
26/09/2009	57	123,56	146,4	205,86	89,54	94,74	63,48	105,92	121,2	176,88
27/09/2009	58	160,1	151,44	242,4	117,26	101,04	54,66	107,18	123,72	180,66
28/09/2009	59	160,1	151,44	242,4	117,26	101,04	54,66	107,18	123,72	180,66
29/09/2009	60	199,16	196,8	258,78	124,82	116,16	84,9	128,6	138,84	79,86
30/09/2009	61	172,7	166,56	247,44	118,52	106,08	64,74	113,48	128,76	105,06
01/10/2009	62	112,22	177,9	273,9	104,66	77,1	117,66	-	107,34	140,34
02/10/2009	63	157,58	147,66	281,46	114,74	108,6	74,82	107,18	113,64	112,62
03/10/2009	64	192,86	210,66	300,36	119,78	121,2	73,56	123,56	133,8	192
04/10/2009	65	253,34	232,08	311,7	126,08	133,8	71,04	147,5	153,96	192
05/10/2009	66	311,3	297,6	339,42	102,14	145,14	67,26	161,36	171,6	154,2
06/10/2009	67	242	285	367,14	-	108,6	69,78	137,42	185,46	163,02
07/10/2009	68	317,6	291,3	397,38	122,3	152,7	131,52	155,06	196,8	144,12
08/10/2009	69	100,88	123,72	346,98	195,38	79,62	40,8	-	85,92	117,66
09/10/2009	70	133,64	142,62	281,46	109,7	97,26	130,26	104,66	104,82	118,92
10/10/2009	71	167,66	170,34	276,42	116	113,64	131,52	137,42	124,98	198,3
11/10/2009	72	187,82	190,5	299,1	122,3	121,2	141,6	141,2	145,14	236,1
12/10/2009	73	262,16	222	318	100,88	135,06	152,94	163,88	165,3	166,8
13/10/2009	74	323,9	257,28	348,24	-	145,14	156,72	179	189,24	208,38
14/10/2009	75	386,9	288,78	407,46	128,6	153,96	113,88	206,72	211,92	157,98
15/10/2009	76	431	311,46	456,6	124,82	171,6	156,72	233,18	248,46	252,48
16/10/2009	77	514,16	350,52	503,22	128,6	141,36	101,28	263,42	282,48	296,58
17/10/2009	78	573,38	368,16	-	116	161,52	160,5	279,8	325,32	161,76
18/10/2009	79	588,5	378,24	42,06	117,26	146,4	156,72	243,26	361,86	161,76
19/10/2009	80	690,56	389,58	-	124,82	159	179,4	274,76	429,9	166,8

20/10/2009	81	729,62	394,62	-	119,78	143,88	157,98	228,14	497,94	218,46
21/10/2009	82	-	419,82	-	97,1	137,58	192	180,26	552,12	199,56
22/10/2009	83	766,16	405,96	29,46	128,6	119,94	122,7	167,66	645,36	213,42
23/10/2009	84	865,7	405,96	-	128,6	166,56	136,56	199,16	719,7	280,2
24/10/2009	85	205,46	448,8	-	129,86	191,76	156,72	344,06	285	688,44
25/10/2009	86	-	360,6	-	216,8	171,6	53,4	311,3	713,4	179,4
26/10/2009	87	-	267,36	-	-	167,82	185,7	144,98	771,36	157,98
27/10/2009	88	250,82	402,18	-	150,02	171,6	160,5	170,18	870,9	192
28/10/2009	89	238,22	451,32	255	141,2	122,46	108,84	157,58	883,5	205,86
29/10/2009	90	294,92	423,6	-	134,9	142,62	149,16	156,32	889,8	217,2
30/10/2009	91	218,06	458,88	305,4	134,9	184,2	115,14	160,1	902,4	163,02
31/10/2009	92	114,74	480,3	291,54	128,6	200,58	92,46	167,66	594,96	174,36
01/11/2009	93	-	-	295,32	143,72	196,8	113,88	-	501,72	217,2
02/11/2009	94	286,1	-	263,82	78,2	-	116,4	-	528,18	296,58
03/11/2009	95	81,98	351,78	255	153,8	230,82	108,84	165,14	442,5	178,14
04/11/2009	96	105,92	-	289,02	116	150,18	92,46	-	419,82	243,66
05/11/2009	97	157,58	-	268,86	116	190,5	105,06	-	462,66	238,62
06/11/2009	98	114,74	-	270,12	128,6	190,5	101,28	-	441,24	219,72
07/11/2009	99	158,84	458,88	273,9	119,78	140,1	160,5	158,84	274,92	208,38
08/11/2009	100	126,08	-	270,12	119,78	171,6	121,44	-	-	-
09/11/2009	101	-	-	-	-	-	208,38	-	-	-
10/11/2009	102	-	-	-	124,82	117,42	91,2	-	216,96	285,24
11/11/2009	103	-	-	321,78	129,86	124,98	103,8	-	203,1	297,84
12/11/2009	104	305	-	333,12	126,08	133,8	181,92	-	199,32	315,48
13/11/2009	105	746	373,2	345,72	90,8	147,66	151,68	107,18	151,44	192
14/11/2009	106	-	116,16	219,72	93,32	83,4	76,08	95,84	98,52	139,08
15/11/2009	107	-	142,62	237,36	104,66	98,52	83,64	121,04	124,98	160,5
16/11/2009	108	-	169,08	256,26	116	114,9	91,2	146,24	152,7	183,18
17/11/2009	109	184,04	215,7	166,8	117,26	123,72	108,84	172,7	167,82	130,26
18/11/2009	110	-	205,62	281,46	116	137,58	68,52	202,94	185,46	140,34
19/11/2009	111	-	240,9	340,68	113,48	150,18	73,56	235,7	215,7	113,88
20/11/2009	112	118,52	161,52	68,52	492,74	538,26	100,02	231,92	245,94	166,8
21/11/2009	113	88,28	113,64	346,98	92,06	79,62	82,38	92,06	94,74	117,66
22/11/2009	114	-	133,8	127,74	116	87,18	88,68	116	89,7	78,6
23/11/2009	115	83,24	156,48	220,98	112,22	-	68,52	148,76	138,84	97,5
24/11/2009	116	83,24	179,16	246,18	110,96	53,16	68,52	176,48	162,78	106,32
25/11/2009	117	83,24	156,48	198,3	112,22	69,54	74,82	146,24	130,02	93,72
26/11/2009	118	-	239,64	311,7	116	-	72,3	179	209,4	40,8
27/11/2009	119	-	272,4	343,2	116	60,72	88,68	167,66	190,5	157,98
28/11/2009	120	-	222	283,98	113,48	33	78,6	163,88	176,64	97,5
29/11/2009	121	-	366,9	387,3	-	-	73,56	172,7	214,44	121,44
30/11/2009	122	-	286,26	407,46	434,78	782,7	68,52	122,3	-	147,9
01/12/2009	123	-	382,02	323,04	-	56,94	93,72	-	242,16	55,92
02/12/2009	124	-	482,82	368,4	117,26	-	89,94	226,88	245,94	110,1
03/12/2009	125	87,02	437,46	355,8	112,22	-	91,2	200,42	237,12	105,06
04/12/2009	126	78,2	433,68	348,24	114,74	-	91,2	213,02	240,9	89,94

05/12/2009	127	90,8	441,24	368,4	139,94	-	78,6	165,14	253,5	107,58
06/12/2009	128	88,28	408,48	335,64	113,48	65,76	93,72	173,96	237,12	105,06
07/12/2009	129	-	409,74	444	126,08	58,2	94,98	156,32	259,8	134,04
08/12/2009	130	81,98	89,7	407,46	84,5	45,6	76,08	81,98	121,2	129
09/12/2009	131	87,02	90,96	168,06	88,28	70,8	72,3	-	77,1	89,94
10/12/2009	132	90,8	94,74	176,88	92,06	74,58	77,34	-	80,88	94,98
11/12/2009	133	78,2	123,72	141,6	110,96	98,52	91,2	117,26	108,6	166,8
12/12/2009	134	88,28	79,62	72,3	83,24	64,5	66	116	111,12	77,34
13/12/2009	135	85,76	98,52	64,74	90,8	56,94	66	116	99,78	112,62
14/12/2009	136	83,24	96	91,2	136,16	70,8	73,56	116	106,08	91,2
15/12/2009	137	81,98	73,32	69,78	80,72	67,02	73,56	100,88	73,32	71,04
16/12/2009	138	99,62	96	93,72	93,32	80,88	82,38	92,06	87,18	69,78
17/12/2009	139	100,88	112,38	102,54	112,22	99,78	101,28	112,22	102,3	94,98
18/12/2009	140	98,36	108,6	91,2	99,62	92,22	94,98	99,62	83,4	91,2
19/12/2009	141	110,96	102,3	89,94	102,14	90,96	96,24	112,22	90,96	89,94
20/12/2009	142	103,4	89,7	72,3	90,8	77,1	78,6	103,4	89,7	78,6
21/12/2009	143	100,88	98,52	88,68	99,62	94,74	87,42	90,8	92,22	89,94
22/12/2009	144	90,8	83,4	84,9	100,88	85,92	86,16	100,88	89,7	88,68
23/12/2009	145	98,36	89,7	84,9	97,1	85,92	83,64	98,36	89,7	84,9
24/12/2009	146	90,8	108,6	103,8	94,58	89,7	66	102,14	83,4	72,3
25/12/2009	147	122,3	108,6	103,8	229,4	102,3	63,48	116	102,3	91,2
26/12/2009	148	134,9	121,2	116,4	128,6	102,3	66	128,6	114,9	103,8
27/12/2009	149	153,8	135,06	116,4	134,9	114,9	83,64	138,68	119,94	116,4
28/12/2009	150	170,18	143,88	47,1	134,9	128,76	112,62	166,4	124,98	103,8
29/12/2009	151	90,8	179,16	129	166,4	137,58	68,52	142,46	138,84	121,44
30/12/2009	152	99,62	89,7	82,38	92,06	92,22	86,16	90,8	80,88	94,98
31/12/2009	153	94,58	99,78	94,98	99,62	88,44	100,02	97,1	88,44	91,2
01/01/2010	154	90,8	85,92	97,5	99,62	80,88	91,2	-	-	91,2
02/01/2010	155	-	96	93,72	102,14	85,92	101,28	99,62	83,4	91,2
03/01/2010	156	90,8	107,34	84,9	112,22	97,26	96,24	113,48	96	89,94
04/01/2010	157	103,4	113,64	92,46	99,62	96	111,36	114,74	98,52	98,76
05/01/2010	158	99,62	123,72	110,1	121,04	107,34	125,22	122,3	113,64	106,32
06/01/2010	159	98,36	132,54	123,96	134,9	118,68	117,66	134,9	121,2	110,1
07/01/2010	160	104,66	140,1	125,22	143,72	122,46	120,18	139,94	130,02	116,4
08/01/2010	161	99,62	150,18	131,52	152,54	128,76	123,96	162,62	133,8	123,96
09/01/2010	162	100,88	137,58	126,48	243,26	122,46	120,18	144,98	127,5	116,4
10/01/2010	163	103,4	122,46	108,84	155,06	107,34	102,54	137,42	107,34	122,7
11/01/2010	164	109,7	102,3	91,2	103,4	92,22	103,8	90,8	93,48	91,2
12/01/2010	165	107,18	97,26	78,6	100,88	79,62	53,4	87,02	80,88	78,6
13/01/2010	166	104,66	107,34	77,34	92,06	-	-	100,88	117,42	93,72
14/01/2010	167	103,4	-	88,68	93,32	-	111,36	99,62	126,24	117,66
15/01/2010	168	104,66	-	81,12	102,14	-	81,12	90,8	-	141,6
16/01/2010	169	100,88	-	78,6	95,84	-	78,6	-	-	103,8
17/01/2010	170	105,92	-	92,46	90,8	83,4	77,34	-	107,34	-
18/01/2010	171	113,48	119,94	103,8	105,92	103,56	101,28	116	104,82	101,28
19/01/2010	172	110,96	103,56	91,2	103,4	53,16	88,68	102,14	89,7	94,98

20/01/2010	173	103,4	97,26	86,16	97,1	87,18	86,16	103,4	89,7	88,68
21/01/2010	174	104,66	-	84,9	98,36	-	81,12	98,36	96	86,16
22/01/2010	175	114,74	114,9	93,72	116	103,56	98,76	113,48	104,82	103,8
23/01/2010	176	112,22	103,56	91,2	113,48	96	81,12	99,62	-	91,2
24/01/2010	177	90,8	78,36	63,48	87,02	70,8	68,52	-	72,06	71,04
25/01/2010	178	-	87,18	68,52	-	60,72	71,04	-	70,8	84,9
26/01/2010	179	92,06	-	71,04	87,02	60,72	71,04	78,2	74,58	69,78
27/01/2010	180	100,88	-	-	78,2	58,2	86,16	-	70,8	66
28/01/2010	181	103,4	97,26	79,86	90,8	87,18	74,82	90,8	83,4	86,16
29/01/2010	182	100,88	-	89,94	89,54	73,32	84,9	92,06	93,48	86,16
30/01/2010	183	98,36	97,26	86,16	95,84	84,66	87,42	100,88	79,62	91,2
31/01/2010	184	84,5	109,86	103,8	103,4	93,48	103,8	85,76	93,48	78,6
01/02/2010	185	103,4	106,08	64,74	84,5	94,74	91,2	90,8	97,26	79,86
02/02/2010	186	97,1	87,18	102,54	89,54	88,44	82,38	85,76	75,84	83,64
03/02/2010	187	95,84	89,7	81,12	81,98	77,1	78,6	85,76	-	77,34
04/02/2010	188	103,4	106,08	88,68	107,18	93,48	88,68	98,36	90,96	88,68
05/02/2010	189	90,8	116,16	101,28	118,52	104,82	86,16	110,96	99,78	83,64
06/02/2010	190	141,2	75,84	100,02	94,58	75,84	84,9	99,62	-	94,98
07/02/2010	191	65,6	133,8	110,1	90,8	83,4	97,5	-	83,4	103,8
08/02/2010	192	108,44	108,6	102,54	102,14	94,74	93,72	95,84	89,7	94,98
09/02/2010	193	105,92	113,64	106,32	109,7	97,26	101,28	103,4	96	98,76
10/02/2010	194	97,1	87,18	74,82	88,28	75,84	62,22	84,5	77,1	88,68
11/02/2010	195	94,58	84,66	82,38	84,5	72,06	79,86	-	75,84	78,6
12/02/2010	196	97,1	83,4	64,74	76,94	67,02	62,22	-	70,8	72,3
13/02/2010	197	95,84	-	62,22	89,54	80,88	63,48	90,8	65,76	88,68
14/02/2010	198	99,62	96	-	88,28	78,36	89,94	87,02	74,58	81,12
15/02/2010	199	110,96	121,2	76,08	-	68,28	66	76,94	117,42	84,9
16/02/2010	200	102,14	116,16	67,26	-	83,4	79,86	89,54	88,44	73,56
17/02/2010	201	116	124,98	62,22	-	97,26	82,38	78,2	96	64,74
18/02/2010	202	113,48	101,04	89,94	102,14	90,96	89,94	99,62	87,18	86,16
19/02/2010	203	121,04	111,12	100,02	108,44	97,26	97,5	103,4	93,48	93,72
20/02/2010	204	132,38	111,12	53,4	116	109,86	111,36	97,1	89,7	72,3
21/02/2010	205	153,8	96	111,36	107,18	122,46	103,8	-	89,7	107,58
22/02/2010	206	87,02	112,38	78,6	94,58	85,92	92,46	-	79,62	93,72
23/02/2010	207	94,58	73,32	77,34	87,02	72,06	76,08	84,5	75,84	79,86
24/02/2010	208	94,58	85,92	76,08	85,76	74,58	74,82	88,28	77,1	78,6
25/02/2010	209	112,22	98,52	87,42	99,62	87,18	102,54	95,84	84,66	84,9
26/02/2010	210	143,72	109,86	100,02	117,26	99,78	92,46	105,92	92,22	93,72
27/02/2010	211	105,92	103,56	107,58	98,36	89,7	97,5	88,28	87,18	87,42
28/02/2010	212	98,36	93,48	92,46	97,1	79,62	81,12	97,1	84,66	88,68
01/03/2010	213	119,78	103,56	96,24	112,22	94,74	94,98	105,92	92,22	92,46
02/03/2010	214	136,16	114,9	102,54	124,82	104,82	82,38	112,22	98,52	96,24
03/03/2010	215	151,28	127,5	110,1	138,68	114,9	115,14	119,78	107,34	55,92
04/03/2010	216	100,88	133,8	116,4	142,46	121,2	106,32	109,7	111,12	72,3
05/03/2010	217	121,04	137,58	123,96	127,34	118,68	125,22	114,74	101,04	111,36
06/03/2010	218	110,96	145,14	131,52	142,46	122,46	116,4	132,38	117,42	117,66

07/03/2010	219	103,4	165,3	147,9	172,7	137,58	136,56	160,1	137,58	134,04
08/03/2010	220	116	162,78	144,12	143,72	135,06	123,96	142,46	133,8	129
09/03/2010	221	139,94	174,12	157,98	189,08	155,22	115,14	177,74	151,44	152,94
10/03/2010	222	109,7	165,3	175,62	122,3	127,5	130,26	122,3	140,1	144,12
11/01/1900	223	121,04	167,82	173,1	151,28	132,54	131,52	161,36	133,8	141,6
12/03/2010	224	122,3	177,9	175,62	170,18	11,58	135,3	176,48	150,18	161,76
13/03/2010	225	116	159	166,8	117,26	94,74	101,28	152,54	96	149,16
14/03/2010	226	95,84	112,38	145,38	92,06	77,1	116,4	102,14	111,12	145,38
15/03/2010	227	89,54	85,92	117,66	81,98	72,06	74,82	92,06	87,18	120,18
16/03/2010	228	94,58	88,44	108,84	104,66	87,18	78,6	90,8	92,22	-
17/03/2010	229	99,62	87,18	101,28	109,7	93,48	84,9	122,3	89,7	-
18/03/2010	230	98,36	102,3	78,6	105,92	89,7	84,9	114,74	85,92	102,54
19/03/2010	231	108,44	102,3	102,54	109,7	87,18	79,86	109,7	85,92	100,02
20/03/2010	232	134,9	117,42	102,54	127,34	106,08	97,5	119,78	107,34	101,28
21/03/2010	233	112,22	106,08	106,32	103,4	89,7	101,28	-	89,7	103,8
22/03/2010	234	151,28	131,28	112,62	123,56	131,28	132,78	133,64	119,94	113,88
23/03/2010	235	131,12	118,68	108,84	118,52	109,86	116,4	126,08	104,82	108,84
24/03/2010	236	127,34	113,64	103,8	109,7	106,08	111,36	122,3	99,78	102,54
25/03/2010	237	117,26	103,56	92,46	98,36	96	98,76	112,22	90,96	91,2
26/03/2010	238	107,18	87,18	89,94	94,58	75,84	64,74	94,58	74,58	89,94
27/03/2010	239	103,4	89,7	83,64	94,58	78,36	58,44	97,1	79,62	87,42
28/03/2010	240	110,96	85,92	96,24	102,14	74,58	72,3	92,06	70,8	92,46
29/03/2010	241	107,18	102,3	94,98	105,92	89,7	93,72	98,36	89,7	96,24
30/03/2010	242	108,44	93,48	94,98	103,4	82,14	82,38	94,58	79,62	93,72
31/03/2010	243	99,62	84,66	83,64	95,84	73,32	72,3	87,02	72,06	82,38
01/04/2010	244	113,48	101,04	89,94	105,92	90,96	79,86	103,4	93,48	101,28
02/04/2010	245	116	104,82	93,72	108,44	93,48	83,64	105,92	96	105,06
03/04/2010	246	126,08	113,64	105,06	117,26	102,3	93,72	114,74	106,08	117,66
04/04/2010	247	121,04	102,3	98,76	112,22	97,26	88,68	109,7	101,04	113,88
05/04/2010	248	124,82	106,08	103,8	116	101,04	92,46	113,48	104,82	118,92
06/04/2010	249	139,94	107,34	100,02	123,56	99,78	93,72	114,74	96	96,24
07/04/2010	250	137,42	113,64	103,8	132,38	109,86	94,98	121,04	99,78	84,9
08/04/2010	251	133,64	107,34	82,38	124,82	101,04	103,8	116	102,3	101,28
09/04/2010	252	139,94	131,28	122,7	134,9	117,42	118,92	122,3	112,38	103,8
10/04/2010	253	83,24	73,32	72,3	-	64,5	57,18	-	85,92	78,6
11/04/2010	254	85,76	75,84	76,08	129,86	67,02	59,7	118,52	88,44	91,2
12/04/2010	255	92,06	83,4	84,9	133,64	73,32	68,52	122,3	97,26	94,98
13/04/2010	256	88,28	79,62	79,86	131,12	69,54	63,48	131,12	92,22	106,32
14/04/2010	257	90,8	82,14	83,64	132,38	72,06	67,764	136,16	96	100,02
15/04/2010	258	126,08	116,16	98,76	122,3	108,6	108,84	113,48	104,82	101,28
16/04/2010	259	104,66	102,3	97,5	103,4	92,22	94,98	90,8	92,22	93,72
17/04/2010	260	100,88	68,28	81,12	94,58	83,4	87,42	92,06	98,52	83,64
18/04/2010	261	103,4	96	94,98	98,36	85,92	88,68	102,14	87,18	97,5
19/04/2010	262	108,44	101,04	91,2	103,4	89,7	94,98	103,4	90,96	92,46
20/04/2010	263	110,96	103,56	94,98	103,4	90,96	96,24	102,14	92,22	96,24
21/04/2010	264	121,04	111,12	100,02	113,48	99,78	103,8	93,32	99,78	98,76

22/04/2010	265	129,86	112,38	93,72	122,3	107,34	107,58	114,74	106,08	102,54
23/04/2010	266	-	83,4	82,38	-	59,46	59,7	-	72,06	71,04
24/04/2010	267	92,06	82,14	74,82	100,88	74,58	73,56	-	55,68	89,94
25/04/2010	268	90,8	83,4	78,6	116	70,8	78,6	-	45,6	103,8
26/04/2010	269	94,58	80,88	72,3	87,02	78,36	68,52	-	-	76,08
27/04/2010	270	108,44	72,06	86,16	90,8	83,4	91,2	87,02	98,52	87,42
28/04/2010	271	90,8	84,66	93,72	92,06	74,58	79,86	81,98	75,84	83,64
29/04/2010	272	123,56	111,12	100,02	116	102,3	101,28	112,22	96	98,76
30/04/2010	273	137,42	121,2	108,84	128,6	113,64	106,32	97,1	108,6	74,82
01/05/2010	274	136,16	112,38	115,14	142,46	119,94	111,36	129,86	118,68	110,1
02/05/2010	275	128,6	131,28	121,44	132,38	124,98	117,66	121,04	121,2	113,88
03/05/2010	276	122,3	122,46	120,18	116	107,34	122,7	110,96	111,12	121,44
04/05/2010	277	132,632	121,2	120,18	123,56	113,64	121,44	118,52	112,38	122,7
05/05/2010	278	100,88	96	108,84	99,62	85,92	91,2	94,58	89,7	107,58
06/05/2010	279	99,62	96	94,98	98,36	85,92	89,94	95,84	88,44	97,5
07/05/2010	280	93,32	78,36	66	97,1	79,62	67,26	-	83,4	69,78
08/05/2010	281	112,22	101,04	84,9	103,4	92,22	82,38	103,4	90,96	84,9
09/05/2010	282	128,6	113,64	84,9	109,7	97,26	93,72	118,52	102,3	94,98
10/05/2010	283	153,8	132,54	115,14	150,02	126,24	111,36	138,68	122,46	108,84
11/05/2010	284	150,02	124,98	103,8	148,76	119,94	100,02	132,38	117,42	105,06
12/05/2010	285	105,92	118,68	118,92	95,84	92,22	115,14	105,92	111,12	113,88
13/05/2010	286	-	84,66	110,1	-	64,5	59,7	-	78,36	96,24
14/05/2010	287	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15/05/2010	288	103,4	102,3	91,2	100,88	92,22	93,72	94,58	92,22	96,24
16/05/2010	289	141,2	118,68	115,14	136,16	116,16	108,84	127,34	114,9	113,88
17/05/2010	290	121,04	124,98	118,92	110,96	111,12	113,88	112,22	112,38	116,4
18/05/2010	291	100,88	108,6	121,44	97,1	85,92	108,84	98,36	101,04	110,1
19/05/2010	292	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/05/2010	293	105,92	96	78,6	95,84	85,92	78,6	100,88	89,7	74,82
21/05/2010	294	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/05/2010	295	128,6	111,12	102,54	122,3	103,56	92,46	121,04	107,34	101,28
23/05/2010	296	-	109,86	111,36	-	59,46	83,64	79,46	93,48	107,58
24/05/2010	297	78,2	58,2	102,54	81,98	74,58	69,78	-	78,36	91,2
25/05/2010	298	119,78	112,38	107,58	114,74	99,78	100,02	112,22	103,56	105,06
26/05/2010	299	85,76	96	97,5	87,02	75,84	97,5	89,54	87,18	96,24
27/05/2010	300	89,54	85,92	89,94	87,02	74,58	82,38	-	79,62	89,94
28/05/2010	301	90,8	90,96	87,42	88,28	77,1	77,34	-	80,88	84,9
29/05/2010	302	88,28	87,18	82,38	87,02	75,84	83,64	-	78,36	83,64
30/05/2010	303	94,58	101,04	83,64	90,8	79,62	82,38	78,2	80,88	86,16
31/05/2010	304	83,24	74,58	72,3	-	70,8	72,3	-	77,1	73,56
01/06/2010	305	104,66	92,22	83,64	103,4	87,18	87,42	95,84	85,92	78,6
02/06/2010	306	118,52	90,96	-	112,22	96	89,94	105,92	93,48	88,68
03/06/2010	307	128,6	98,52	-	121,04	104,82	97,5	114,74	101,04	96,24
04/06/2010	308	139,94	121,2	38,28	141,2	112,38	103,8	123,56	108,6	101,28
05/06/2010	309	90,8	99,78	49,62	94,58	87,18	107,58	90,8	89,7	103,8
06/06/2010	310	95,84	90,96	103,8	97,1	82,14	81,12	95,84	85,92	97,5

07/06/2010	311	117,26	93,48	60,96	112,22	93,48	91,2	103,4	97,26	100,02
08/06/2010	312	136,16	114,9	120,18	127,34	104,82	-	108,44	93,48	105,06
09/06/2010	313	78,2	98,52	-	87,02	73,32	92,46	-	92,22	103,8
10/06/2010	314	-	83,4	-	90,8	-	82,38	-	88,44	110,1
11/06/2010	315	119,78	93,48	-	109,7	85,92	72,3	-	99,78	100,02
12/06/2010	316	-	114,9	-	126,08	-	69,78	-	83,4	107,58
13/06/2010	317	90,8	114,9	-	104,66	-	71,04	-	92,22	112,62
14/06/2010	318	90,8	114,9	-	84,5	-	72,3	-	101,04	117,66
15/06/2010	319	-	70,8	-	108,44	-	64,74	-	68,28	116,4
16/06/2010	320	-	72,06	-	116	-	64,74	-	70,8	121,44
17/06/2010	321	73,16	83,4	40,8	103,4	45,6	97,5	40,4	39,3	136,56
18/06/2010	322	95,84	84,66	-	122,3	-	81,12	-	89,7	146,64
19/06/2010	323	201,68	194,28	223,5	122,3	206,88	3	160,1	121,2	81,12
20/06/2010	324	191,6	130,02	-	122,3	132,54	83,64	184,04	127,5	151,68
21/06/2010	325	146,24	132,54	110,1	87,02	77,1	120,18	133,64	117,42	146,64
22/06/2010	326	108,44	131,28	81,12	97,1	74,58	107,58	118,52	127,5	146,64
23/06/2010	327	90,8	114,9	-	84,5	74,58	97,5	103,4	114,9	137,82
24/06/2010	328	119,78	113,64	-	103,4	89,7	97,5	116	117,42	135,3
25/06/2010	329	-	102,3	-	87,02	-	59,7	-	89,7	-
26/06/2010	330	97,1	102,3	28,2	97,1	77,1	84,9	-	101,04	98,76
27/06/2010	331	116	108,6	-	116	96	103,8	128,6	121,2	103,8
28/06/2010	332	136,16	-	-	97,1	106,08	100,02	136,16	127,5	108,84
29/06/2010	333	148,76	130,02	40,8	122,3	114,9	96,24	146,24	138,84	121,44
30/06/2010	334	116	103,56	54,66	116	108,6	83,64	116	114,9	116,4
01/07/2010	335	137,42	123,72	49,62	134,9	-	72,3	132,38	130,02	121,44
02/07/2010	336	102,14	119,94	62,22	78,2	83,4	78,6	103,4	113,64	125,22
03/07/2010	337	84,5	113,64	66	90,8	64,5	97,5	97,1	111,12	135,3
04/07/2010	338	124,82	112,38	53,4	116	59,46	83,64	121,04	112,38	122,7
05/07/2010	339	139,94	121,2	-	128,6	58,2	91,2	132,38	126,24	122,7
06/07/2010	340	160,1	130,02	63,48	144,98	58,2	110,1	147,5	166,56	135,3
07/07/2010	341	172,7	146,4	-	116	-	86,16	160,1	148,92	135,3
08/07/2010	342	88,28	153,96	49,62	89,54	131,28	131,52	109,7	124,98	110,1
09/07/2010	343	103,4	135,06	66	90,8	61,98	100,02	109,7	128,76	135,3
10/07/2010	344	122,3	128,76	-	103,4	60,72	94,98	121,04	126,24	129
11/07/2010	345	137,42	145,14	-	119,78	74,58	113,88	139,94	133,8	141,6
12/07/2010	346	141,2	146,4	47,1	116	61,98	110,1	136,16	140,1	141,6
13/07/2010	347	99,62	133,8	-	90,8	68,28	91,2	99,62	126,24	68,52
14/07/2010	348	97,1	121,2	47,1	88,28	70,8	94,98	99,62	111,12	141,6
15/07/2010	349	97,1	106,08	-	94,58	78,36	82,38	103,4	103,56	135,3
16/07/2010	350	109,7	106,08	-	103,4	90,96	88,68	107,18	106,08	129
17/07/2010	351	127,21	118,68	-	103,4	119,94	71,04	136,16	112,38	101,28
18/07/2010	352	152,54	128,76	-	133,64	107,34	93,72	136,16	128,76	125,22
19/07/2010	353	100,88	113,64	45,84	92,06	83,4	91,2	90,8	112,38	132,78
20/07/2010	354	123,56	112,38	-	107,18	93,48	91,2	118,52	113,64	126,48
21/07/2010	355	134,9	124,98	-	116	102,3	100,02	95,84	121,2	129
22/07/2010	356	99,62	122,46	-	97,1	101,04	103,8	-	109,86	134,04

23/07/2010	357	132,38	128,76	-	116	103,56	103,8	-	118,68	132,78
24/07/2010	358	147,5	133,8	-	134,9	114,9	103,8	-	131,28	135,3
25/07/2010	359	87,02	89,7	117,66	76,94	99,78	96,24	79,46	78,36	103,8
26/07/2010	360	185,3	161,52	49,62	137,42	133,8	116,4	-	155,22	150,42
27/07/2010	361	204,2	75,84	-	134,9	102,3	122,7	-	165,3	156,72
28/07/2010	362	171,44	187,98	48,36	148,76	101,04	78,6	97,1	176,64	173,1
29/07/2010	363	206,72	146,4	60,96	138,68	153,96	131,52	-	174,12	173,1
30/07/2010	364	223,1	85,92	62,22	143,72	164,04	81,12	-	184,2	181,92
31/07/2010	365	238,22	98,52	79,86	109,07	172,86	68,52	-	198,06	188,22
01/08/2010	366	248,3	147,66	81,12	-	185,46	68,52	-	210,66	195,78
02/08/2010	367	99,62	153,96	97,5	-	159	69,78	-	180,42	78,6
03/08/2010	368	88,28	148,92	103,8	-	-	-	-	180,42	169,32
04/08/2010	369	200,42	141,36	79,86	121,04	-	-	-	208,14	229,8
05/08/2010	370	236,96	114,9	66	-	67,02	97,5	-	234,6	242,4
06/08/2010	371	298,7	123,72	289,02	-	67,02	101,28	-	240,9	223,5
07/08/2010	372	141,2	126,24	389,82	-	65,76	73,56	-	257,28	149,16
08/08/2010	373	141,2	157,74	134,04	210,5	65,76	86,16	-	273,66	156,72

ANEXO IV

DADOS DE POTENCIAL MÁTRICO COLETADOS NA ÁREA COM CULTIVO DE PALMA

Tabela IV.1- Dados de potencial mátrico em três pontos com palma de óleo na área de estudo no período de 373 dias.

Data	Dias no Hydrus	PALMA DE ÓLEO 1			PALMA DE ÓLEO 2			PALMA DE ÓLEO 3		
		10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm
----- cm H ₂ O -----										
01/08/2009	1	155,06	60,72	207,12	160,1	58,2	-	185,3	442,5	69,78
02/08/2009	2	191,6	60,72	248,7	196,64	-	-	228,14	524,4	73,56
03/08/2009	3	191,6	143,88	152,94	90,8	133,8	66	134,9	124,98	154,2
04/08/2009	4	179	88,44	202,08	148,76	96	-	182,78	363,12	98,76
05/08/2009	5	194,12	-	449,04	190,34	-	-	260,9	810,42	69,78
06/08/2009	6	-	-	256,26	92,06	58,2	40,8	87,02	142,62	73,56
07/08/2009	7	-	-	132,78	122,3	-	52,14	112,22	137,58	66
08/08/2009	8	139,94	68,28	137,82	147,5	-	39,54	151,28	166,56	43,32
09/08/2009	9	98,36	58,2	129	103,4	61,98	59,7	97,1	136,32	164,28
10/08/2009	10	134,9	72,06	146,64	144,98	77,1	96,24	139,94	164,04	118,92
11/08/2009	11	151,28	72,06	157,98	160,1	-	105,06	156,32	180,42	72,3
12/08/2009	12	177,74	63,24	179,4	187,82	-	116,4	184,04	214,44	67,26
13/08/2009	13	153,8	68,28	160,5	163,88	-	105,06	160,1	185,46	86,16
14/08/2009	14	89,54	75,84	136,56	102,14	69,54	89,94	95,84	186,72	96,24
15/08/2009	15	139,94	68,28	157,98	151,28	73,32	103,8	146,24	195,54	82,38
16/08/2009	16	152,54	-	142,86	179	-	108,84	180,26	227,04	62,22
17/08/2009	17	127,34	72,06	145,38	143,72	77,1	100,02	139,94	203,1	79,86
18/08/2009	18	139,94	69,54	147,9	157,58	74,58	103,8	155,06	208,14	74,82
19/08/2009	19	200,42	-	275,16	344,06	-	47,1	381,86	456,36	69,78
20/08/2009	20	-	-	350,76	436,04	-	48,36	506,6	598,74	64,74
21/08/2009	21	170,18	-	257,52	312,56	-	66	347,84	392,1	69,78
22/08/2009	22	185,3	-	294,06	364,22	-	53,4	412,1	481,56	67,26
23/08/2009	23	122,3	61,98	595,2	790,1	-	40,8	-	-	53,4
24/08/2009	24	-	-	363,36	859,4	-	38,28	-	-	53,4
25/08/2009	25	-	64,5	229,8	-	58,2	43,32	718,28	728,52	57,18
26/08/2009	26	-	64,5	229,8	-	58,2	39,54	-	717,18	54,66
27/08/2009	27	-	68,28	186,96	-	-	39,54	-	671,82	49,62
28/08/2009	28	-	-	49,62	-	-	37,02	-	530,7	52,14
29/08/2009	29	-	64,5	48,36	-	-	37,02	-	481,56	53,4
30/08/2009	30	-	61,98	45,84	-	58,2	34,5	-	448,8	-
31/08/2009	31	-	73,32	52,14	-	61,98	35,76	71,9	477,78	40,8
01/09/2009	32	-	-	55,92	-	-	52,14	-	409,74	58,44
02/09/2009	33	-	-	38,28	-	-	-	-	389,58	31,98
03/09/2009	34	97,1	63,24	110,1	124,82	-	175,62	-	370,68	-
04/09/2009	35	89,54	77,1	125,22	114,74	69,54	258,78	-	363,12	107,58
05/09/2009	36	93,32	69,54	91,2	224,36	69,54	217,2	-	374,46	69,78
06/09/2009	37	143,72	79,62	147,9	184,04	59,46	437,7	167,66	-	64,74
07/09/2009	38	122,3	83,4	166,8	139,94	58,2	532,2	103,4	-	67,26
08/09/2009	39	150,02	59,46	179,4	181,52	59,46	596,46	153,8	-	55,92
09/09/2009	40	138,68	73,32	164,28	167,66	58,2	522,12	141,2	-	62,22
10/09/2009	41	177,74	58,2	244,92	293,66	-	677,1	245,78	-	55,92
11/09/2009	42	155,06	58,2	292,8	364,22	-	690,96	305	-	44,58
12/09/2009	43	192,86	117,42	377,22	187,82	65,76	684,66	391,94	-	-
13/09/2009	44	175,22	77,1	304,14	281,06	61,98	683,4	313,82	-	53,4
14/09/2009	45	173,96	83,4	324,3	277,28	-	-	336,5	-	48,36
15/09/2009	46	180,26	92,22	334,38	248,3	-	-	346,58	-	-

16/09/2009	47	-	-	81,12	110,96	136,32	-	105,92	-	55,92
17/09/2009	48	-	60,72	77,34	148,76	56,94	96,24	146,24	-	42,06
18/09/2009	49	-	60,72	78,6	121,04	-	92,46	118,52	458,88	59,7
19/09/2009	50	143,72	73,32	82,38	168,92	65,76	809,4	157,58	539,52	-
20/09/2009	51	128,6	98,52	168,06	155,06	94,74	847,2	160,1	117,42	588,9
21/09/2009	52	136,16	77,1	108,84	147,5	79,62	582,6	144,98	371,94	-
22/09/2009	53	136,16	82,14	118,92	156,32	79,62	737,58	153,8	342,96	-
23/09/2009	54	79,46	74,58	69,78	182,78	109,86	58,44	117,26	727,26	136,56
24/09/2009	55	117,26	77,1	98,76	161,36	89,7	94,98	138,68	480,3	-
25/09/2009	56	142,46	-	233,58	182,78	58,2	709,86	191,6	625,2	94,98
26/09/2009	57	112,22	79,62	134,04	175,22	85,92	287,76	148,76	610,08	115,14
27/09/2009	58	182,78	-	38,28	144,98	-	-	206,72	-	38,28
28/09/2009	59	182,78	-	38,28	144,98	-	-	206,72	-	38,28
29/09/2009	60	177,74	61,98	58,44	144,98	58,2	639,3	291,14	664,26	73,56
30/09/2009	61	180,26	-	44,58	116	-	-	234,44	-	49,62
01/10/2009	62	-	-	-	162,62	-	-	109,7	526,92	50,88
02/10/2009	63	175,22	68,28	44,58	163,88	-	611,58	172,7	313,98	62,22
03/10/2009	64	177,74	68,28	-	152,54	-	485,58	245,78	285	54,66
04/10/2009	65	179	58,2	-	139,94	-	-	364,22	515,58	47,1
05/10/2009	66	185,3	61,98	-	160,1	-	-	607,4	279,96	53,4
06/10/2009	67	176,48	61,98	-	-	-	-	690,56	393,36	47,1
07/10/2009	68	92,06	79,62	62,22	143,72	-	626,7	878,3	311,46	20,64
08/10/2009	69	99,62	58,2	28,2	117,26	85,92	-	333,98	273,66	189,48
09/10/2009	70	176,48	-	-	163,88	67,02	-	81,98	247,2	69,78
10/10/2009	71	179	70,8	-	133,64	73,32	885	349,1	203,1	74,82
11/10/2009	72	181,52	80,88	-	197,9	70,8	-	368	190,5	71,04
12/10/2009	73	147,5	63,24	-	191,6	64,5	-	420,92	177,9	60,96
13/10/2009	74	78,2	64,5	-	191,6	64,5	-	-	151,44	57,18
14/10/2009	75	-	-	112,62	195,38	69,54	-	-	218,22	103,8
15/10/2009	76	172,7	85,92	29,46	204,2	51,9	-	-	84,66	82,38
16/10/2009	77	184,04	90,96	33,24	-	-	1011	935	303,9	55,92
17/10/2009	78	197,9	68,28	87,42	229,4	-	-	-	564,72	19,38
18/10/2009	79	181,52	65,76	68,52	-	-	799,32	376,82	244,68	60,96
19/10/2009	80	182,78	60,72	-	215,54	60,72	-	534,32	-	57,18
20/10/2009	81	152,54	58,2	86,16	190,34	-	-	511,64	180,42	67,26
21/10/2009	82	-	-	73,56	-	-	57,18	258,38	263,58	-
22/10/2009	83	181,52	58,2	58,44	138,68	-	242,4	449,9	247,2	-
23/10/2009	84	187,82	61,98	53,4	136,16	-	129	441,08	302,64	49,62
24/10/2009	85	177,74	61,98	-	134,9	-	501,96	509,12	243,42	57,18
25/10/2009	86	-	58,2	-	519,2	-	-	116	127,5	-
26/10/2009	87	-	59,46	-	-	-	34,5	289,88	-	59,7
27/10/2009	88	163,88	-	-	152,54	-	333,12	487,7	331,62	59,7
28/10/2009	89	201,68	-	58,44	162,62	-	291,54	564,56	789	68,52
29/10/2009	90	181,52	-	66	148,76	-	394,86	660,32	228,3	60,96
30/10/2009	91	186,56	-	59,7	242	-	476,76	611,18	214,44	68,52
31/10/2009	92	166,4	-	66	166,4	-	465,42	531,8	242,16	53,4
01/11/2009	93	-	-	44,58	133,64	-	421,32	504,08	286,26	62,22
02/11/2009	94	-	-	58,44	157,58	-	485,58	462,5	474	53,4
03/11/2009	95	90,8	-	-	170,18	-	558,66	575,9	474	43,32
04/11/2009	96	-	-	-	-	-	822	608,66	187,98	-
05/11/2009	97	-	-	-	163,88	-	620,4	548,18	378,24	48,36
06/11/2009	98	-	-	-	166,4	-	658,2	577,16	346,74	45,84
07/11/2009	99	78,2	-	88,68	141,2	-	649,38	594,8	513,06	338,16
08/11/2009	100	-	-	-	156,32	-	641,82	573,38	412,26	144,12
09/11/2009	101	-	-	54,66	-	-	504,48	670,4	466,44	84,9
10/11/2009	102	-	-	76,08	180,26	-	732,54	740,96	421,08	66
11/11/2009	103	-	-	54,66	172,7	-	457,86	695,6	414,78	66
12/11/2009	104	-	-	59,7	206,72	-	612,84	661,58	206,88	59,7
13/11/2009	105	-	-	48,36	109,7	-	396,12	632,6	186,72	44,58
14/11/2009	106	84,5	-	30,72	93,32	-	533,46	-	101,04	105,06

15/11/2009	107	-	-	82,38	129,86	-	364,62	-	153,96	74,82
16/11/2009	108	-	-	135,3	167,66	-	197,04	-	206,88	45,84
17/11/2009	109	79,46	-	252,48	206,72	-	544,8	179	301,38	141,6
18/11/2009	110	-	-	333,12	250,82	-	331,86	269,72	335,4	59,7
19/11/2009	111	-	-	444	129,86	-	469,2	385,64	439,98	63,48
20/11/2009	112	-	-	567,48	243,26	-	462,9	278,54	359,34	89,94
21/11/2009	113	-	-	570	98,36	-	464,16	93,32	187,98	266,34
22/11/2009	114	103,4	-	204,6	141,2	-	-	134,9	108,6	108,84
23/11/2009	115	142,46	-	593,94	182,78	-	576,3	202,94	186,72	81,12
24/11/2009	116	138,68	-	610,32	230,66	-	630,48	258,38	399,66	89,94
25/11/2009	117	127,34	-	469,2	184,04	-	602,76	197,9	230,82	92,46
26/11/2009	118	-	-	639,3	216,8	-	421,32	471,32	615,12	129
27/11/2009	119	90,8	-	63,48	200,42	59,46	611,58	499,04	689,46	110,1
28/11/2009	120	108,44	-	59,7	200,42	-	544,8	389,42	511,8	110,1
29/11/2009	121	-	-	54,66	234,44	-	372,18	419,66	689,46	82,38
30/11/2009	122	93,32	-	53,4	141,2	-	408,72	-	-	83,64
01/12/2009	123	-	-	55,92	-	-	285,24	79,46	830,58	66
02/12/2009	124	117,26	-	306,66	308,78	-	728,76	592,28	1032,18	112,62
03/12/2009	125	124,82	-	-	293,66	-	432,66	550,7	489,12	93,72
04/12/2009	126	121,04	-	-	301,22	-	481,8	407,06	436,2	89,94
05/12/2009	127	90,8	-	34,5	216,8	-	412,5	631,34	474	217,2
06/12/2009	128	-	-	-	245,78	-	425,1	557	499,2	74,82
07/12/2009	129	-	-	-	211,76	-	336,9	603,62	833,1	260,04
08/12/2009	130	89,54	-	-	85,76	88,44	246,18	88,28	109,86	252,48
09/12/2009	131	83,24	-	42,06	78,2	88,44	339,42	-	98,52	505,74
10/12/2009	132	90,8	-	45,84	166,4	92,22	354,54	-	103,56	527,16
11/12/2009	133	104,66	-	88,68	133,64	75,84	620,4	132,38	156,48	323,04
12/12/2009	134	84,5	-	64,74	-	97,26	263,82	-	84,66	233,58
13/12/2009	135	93,32	-	69,78	-	88,44	412,5	-	79,62	318
14/12/2009	136	90,8	-	66	-	87,18	336,9	-	106,08	280,2
15/12/2009	137	83,24	-	73,56	-	98,52	84,9	-	67,02	91,2
16/12/2009	138	103,4	-	72,3	127,34	59,46	130,26	94,58	94,74	82,38
17/12/2009	139	122,3	-	118,92	107,18	112,38	112,62	107,18	108,6	106,32
18/12/2009	140	110,96	-	113,88	100,88	114,9	97,5	90,8	108,6	101,28
19/12/2009	141	103,4	-	125,22	97,1	111,12	94,98	87,02	96	105,06
20/12/2009	142	103,4	-	110,1	84,5	102,3	78,6	90,8	-	91,2
21/12/2009	143	104,66	-	126,48	95,84	113,64	102,54	97,1	96	100,02
22/12/2009	144	99,62	-	122,7	93,32	67,02	76,08	92,06	92,22	94,98
23/12/2009	145	102,14	-	118,92	90,8	93,48	84,9	93,32	92,22	94,98
24/12/2009	146	-	-	116,4	90,8	-	97,5	109,7	108,6	103,8
25/12/2009	147	134,9	-	91,2	90,8	-	-	117,26	111,12	-
26/12/2009	148	161,36	-	103,8	90,8	-	103,8	141,2	133,8	53,4
27/12/2009	149	179	-	121,44	-	-	103,8	147,5	-	116,4
28/12/2009	150	191,6	-	171,84	179	-	54,66	179	162,78	118,92
29/12/2009	151	210,5	-	147,9	176,48	-	145,38	148,76	193,02	154,2
30/12/2009	152	95,84	-	78,6	90,8	-	134,04	-	88,44	78,6
31/12/2009	153	108,44	-	86,16	97,1	-	139,08	95,84	94,74	101,28
01/01/2010	154	103,4	-	91,2	128,6	-	116,4	-	-	97,5
02/01/2010	155	116	-	91,2	90,8	-	121,44	-	107,34	103,8
03/01/2010	156	134,9	-	96,24	88,28	-	115,14	116	116,16	106,32
04/01/2010	157	141,2	-	110,1	105,92	-	136,56	107,18	138,84	116,4
05/01/2010	158	160,1	-	121,44	129,86	-	152,94	124,82	142,62	129
06/01/2010	159	181,52	-	135,3	150,02	-	173,1	121,04	161,52	141,6
07/01/2010	160	200,42	-	151,68	173,96	-	192	116	181,68	155,46
08/01/2010	161	211,76	-	171,84	196,64	-	210,9	199,16	205,62	170,58
09/01/2010	162	197,9	-	161,76	172,7	-	192	144,98	182,94	155,46
10/01/2010	163	202,94	-	92,46	180,26	-	129	163,88	109,86	159,24
11/01/2010	164	104,66	-	84,9	90,8	-	105,06	98,36	99,78	84,9
12/01/2010	165	167,66	-	112,62	85,76	-	97,5	94,58	104,82	66
13/01/2010	166	113,48	-	146,64	88,28	-	96,24	88,28	83,4	98,76

14/01/2010	167	103,4	-	92,46	103,4	-	91,2	90,8	92,22	107,58
15/01/2010	168	127,34	-	84,9	92,06	-	93,72	-	93,48	88,68
16/01/2010	169	116	-	-	98,36	-	66	-	-	94,98
17/01/2010	170	114,74	-	89,94	100,88	-	88,68	-	-	103,8
18/01/2010	171	131,12	-	100,02	122,3	-	96,24	117,26	114,9	105,06
19/01/2010	172	107,18	-	88,68	99,62	-	112,62	97,1	108,6	92,46
20/01/2010	173	97,1	-	82,38	94,58	-	87,42	97,1	94,74	86,16
21/01/2010	174	97,1	-	88,68	100,88	-	89,94	103,4	92,22	92,46
22/01/2010	175	104,66	-	86,16	113,48	-	44,58	109,7	108,6	94,98
23/01/2010	176	103,4	-	76,08	102,14	-	40,8	103,4	102,3	78,6
24/01/2010	177	92,06	-	66	-	-	69,78	-	72,06	67,26
25/01/2010	178	-	-	66	-	-	63,48	-	74,58	63,48
26/01/2010	179	85,76	-	67,26	88,28	-	71,04	-	75,84	73,56
27/01/2010	180	88,28	-	68,52	85,76	-	-	-	-	78,6
28/01/2010	181	105,92	-	83,64	84,5	-	81,12	90,8	90,96	82,38
29/01/2010	182	108,44	-	96,24	99,62	-	58,44	93,32	85,92	88,68
30/01/2010	183	99,62	-	81,12	85,76	-	83,64	112,22	70,8	79,86
31/01/2010	184	134,9	-	122,7	84,5	-	110,1	90,8	114,9	110,1
01/02/2010	185	116	-	67,26	85,76	65,76	78,6	116	80,88	105,06
02/02/2010	186	98,36	-	86,16	81,98	61,98	92,46	81,98	90,96	126,48
03/02/2010	187	94,58	-	76,08	83,24	45,6	72,3	87,02	90,96	97,5
04/02/2010	188	117,26	-	88,68	98,36	65,76	89,94	105,92	99,78	96,24
05/02/2010	189	136,16	-	97,5	113,48	69,54	102,54	121,04	116,16	106,32
06/02/2010	190	99,62	-	98,76	85,76	-	84,9	-	116,16	112,62
07/02/2010	191	113,48	-	103,8	89,54	77,1	97,5	65,6	114,9	129
08/02/2010	192	134,9	-	116,4	99,62	68,28	105,06	104,66	122,46	132,78
09/02/2010	193	138,68	-	122,7	107,18	68,28	117,66	116	133,8	142,86
10/02/2010	194	92,06	-	74,82	81,98	64,5	79,86	88,28	83,4	97,5
11/02/2010	195	94,58	-	81,12	81,98	69,54	79,86	-	73,32	77,34
12/02/2010	196	-	-	77,34	-	-	77,34	-	73,32	62,22
13/02/2010	197	-	-	111,36	-	70,8	93,72	-	83,4	40,8
14/02/2010	198	104,66	-	81,12	88,28	68,28	74,82	84,5	70,8	83,64
15/02/2010	199	116	-	82,38	-	-	87,42	117,26	93,48	50,88
16/02/2010	200	114,74	-	87,42	-	-	66	-	93,48	125,22
17/02/2010	201	113,48	-	-	-	-	74,82	-	97,26	136,56
18/02/2010	202	127,34	-	86,16	124,82	85,92	87,42	95,84	96	82,38
19/02/2010	203	124,82	-	96,24	-	102,3	97,5	104,66	106,08	92,46
20/02/2010	204	112,22	-	91,2	-	96	105,06	128,6	111,12	103,8
21/02/2010	205	88,28	-	103,8	-	67,02	110,1	136,16	121,2	86,16
22/02/2010	206	89,54	-	74,82	-	75,84	112,62	79,46	123,72	123,96
23/02/2010	207	84,5	-	69,78	-	72,06	88,68	-	83,4	72,3
24/02/2010	208	89,54	-	74,82	-	75,84	87,42	79,46	83,4	69,78
25/02/2010	209	109,7	-	84,9	-	88,44	96,24	90,8	96	82,38
26/02/2010	210	128,6	-	93,72	-	102,3	87,42	109,7	107,34	92,46
27/02/2010	211	112,22	-	105,06	-	84,66	64,74	100,88	114,9	103,8
28/02/2010	212	105,92	-	79,86	-	79,62	57,18	87,02	112,38	125,22
01/03/2010	213	119,78	-	88,68	-	211,92	49,62	113,48	119,94	123,96
02/03/2010	214	134,9	-	100,02	-	-	66	121,04	119,94	97,5
03/03/2010	215	141,2	-	112,62	-	132,54	54,66	142,46	135,06	130,26
04/03/2010	216	113,48	-	140,34	131,12	157,74	55,92	134,9	166,56	141,6
05/03/2010	217	122,3	-	116,4	142,46	157,74	63,48	143,72	181,68	141,6
06/03/2010	218	185,3	-	155,46	166,4	177,9	-	168,92	190,5	176,88
07/03/2010	219	199,16	-	53,4	210,5	-	166,8	131,12	222	210,9
08/03/2010	220	201,68	-	163,02	209,24	222	-	131,246	204,36	219,72
09/03/2010	221	252,08	-	237,36	242	282,48	53,4	127,34	213,18	243,66
10/03/2010	222	128,6	-	239,88	226,88	287,52	53,4	118,52	201,84	283,98
11/01/1900	223	179	-	236,1	185,3	-	249,96	123,56	214,44	325,56
12/03/2010	224	228,14	-	261,3	235,7	-	267,6	127,34	220,74	135,3
13/03/2010	225	177,74	-	244,92	179	-	-	90,8	160,26	103,8
14/03/2010	226	107,18	-	260,04	117,26	254,76	-	104,66	190,5	330,6

15/03/2010	227	84,5	-	83,64	88,28	141,36	-	-	261,06	82,38
16/03/2010	228	122,3	-	195,78	102,14	-	-	90,8	174,12	134,04
17/03/2010	229	94,58	-	84,9	171,44	89,7	-	90,8	96	89,94
18/03/2010	230	109,7	-	69,78	94,58	89,7	-	97,1	98,52	84,9
19/03/2010	231	109,7	58,2	89,94	90,8	89,7	63,48	97,1	103,56	84,9
20/03/2010	232	127,34	89,7	94,98	114,74	111,12	102,54	114,74	112,38	97,5
21/03/2010	233	107,18	73,32	101,28	99,62	93,48	102,54	98,36	114,9	116,4
22/03/2010	234	151,28	114,9	103,8	138,68	127,5	120,18	114,74	130,02	112,62
23/03/2010	235	129,86	93,48	102,54	118,52	109,86	111,36	110,96	122,46	113,88
24/03/2010	236	124,82	89,7	97,5	114,74	106,08	105,06	102,14	117,42	108,84
25/03/2010	237	113,48	80,88	86,16	105,92	96	93,72	87,02	107,34	96,24
26/03/2010	238	94,58	69,54	94,98	102,14	90,96	93,72	88,28	102,3	103,8
27/03/2010	239	104,66	70,8	91,2	92,06	85,92	94,98	85,76	98,52	106,32
28/03/2010	240	84,5	69,54	98,76	112,22	97,26	92,46	85,76	106,08	101,28
29/03/2010	241	102,14	-	82,38	94,58	85,92	84,9	94,58	92,22	84,9
30/03/2010	242	98,36	89,7	96,24	103,4	90,96	88,68	89,54	98,52	92,46
31/03/2010	243	92,06	83,4	78,6	94,58	82,14	77,34	81,98	89,7	81,12
01/04/2010	244	105,92	70,8	84,9	103,4	90,96	91,2	98,36	98,52	94,98
02/04/2010	245	108,44	73,32	88,68	105,92	93,48	94,98	100,88	102,3	98,76
03/04/2010	246	117,26	80,88	93,72	109,7	97,26	106,32	108,44	111,12	110,1
04/04/2010	247	112,22	77,1	103,8	118,52	106,08	100,02	104,66	106,08	103,8
05/04/2010	248	116	79,62	98,76	113,48	101,04	105,06	112,22	109,86	108,84
06/04/2010	249	133,64	89,7	103,8	122,3	107,34	91,2	92,06	109,86	87,42
07/04/2010	250	129,86	101,04	89,94	123,56	102,3	83,64	109,7	118,68	97,5
08/04/2010	251	136,16	106,08	100,02	118,52	111,12	100,02	123,56	111,12	76,08
09/04/2010	252	139,94	96	125,22	122,3	114,9	120,18	127,34	140,1	122,7
10/04/2010	253	-	-	50,88	-	61,98	67,26	-	75,84	55,92
11/04/2010	254	137,42	101,04	53,4	119,78	64,5	71,04	124,82	78,36	58,44
12/04/2010	255	142,46	104,82	60,96	123,56	70,8	79,86	128,6	85,92	67,26
13/04/2010	256	152,54	113,64	57,18	133,64	67,02	74,82	138,68	77,1	62,22
14/04/2010	257	147,5	108,6	59,7	128,6	69,54	78,6	133,64	80,88	66
15/04/2010	258	128,6	94,74	101,28	118,52	103,56	98,76	113,48	126,24	106,32
16/04/2010	259	104,66	70,8	86,16	103,4	92,22	87,42	100,88	85,92	88,68
17/04/2010	260	103,4	96	94,98	98,36	85,92	88,68	102,14	87,18	97,5
18/04/2010	261	100,88	68,28	81,12	94,58	83,4	87,42	92,06	98,52	83,64
19/04/2010	262	104,66	69,54	86,16	98,36	88,44	88,68	94,58	96	84,9
20/04/2010	263	105,92	68,28	84,9	100,88	88,44	87,42	93,32	96	86,16
21/04/2010	264	118,52	82,14	93,72	105,92	93,48	94,98	102,14	99,78	93,72
22/04/2010	265	133,64	94,74	100,02	114,74	101,04	98,76	108,44	112,38	100,02
23/04/2010	266	-	-	62,22	-	58,2	58,44	-	64,5	82,38
24/04/2010	267	79,46	69,54	62,22	80,72	85,92	87,42	90,8	82,14	71,04
25/04/2010	268	-	70,8	66	-	83,4	91,2	90,8	83,4	66
26/04/2010	269	78,2	72,06	66	78,2	-	-	-	80,88	76,08
27/04/2010	270	103,4	94,74	84,9	98,36	87,18	88,68	93,32	-	81,12
28/04/2010	271	94,58	-	81,12	80,72	73,32	66	79,46	85,92	71,04
29/04/2010	272	124,82	87,18	96,24	113,48	101,04	103,8	107,18	107,34	93,72
30/04/2010	273	128,6	85,92	87,42	97,1	87,18	84,9	122,3	119,94	96,24
01/05/2010	274	151,28	114,9	116,4	136,16	127,5	129	103,4	133,8	105,06
02/05/2010	275	146,24	121,2	130,26	119,78	135,06	147,9	122,3	146,4	117,66
03/05/2010	276	128,6	108,6	141,6	110,96	121,2	151,68	118,52	153,96	135,3
04/05/2010	277	141,2	114,9	146,64	124,82	128,76	157,98	90,8	159	137,82
05/05/2010	278	98,36	65,76	96,24	89,54	90,96	102,54	88,28	133,8	100,02
06/05/2010	279	99,62	65,76	88,68	84,5	85,92	100,02	89,54	111,12	112,62
07/05/2010	280	98,36	-	66	87,02	69,54	74,82	-	78,36	66
08/05/2010	281	116	77,1	84,9	104,66	94,74	101,28	-	98,52	84,9
09/05/2010	282	137,42	94,74	93,72	126,08	114,9	117,66	98,36	113,64	91,2
10/05/2010	283	160,1	121,2	118,92	151,28	145,14	141,6	94,58	140,1	110,1
11/05/2010	284	158,84	150,18	92,46	160,1	147,66	152,94	-	138,84	103,8
12/05/2010	285	127,34	104,82	139,08	116	150,18	160,5	-	167,82	127,74
13/05/2010	286	-	-	58,44	-	-	73,56	-	73,32	45,84

14/05/2010	287	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15/05/2010	288	80,72	108,6	121,44	105,92	74,58	87,42	-	104,82	86,16
16/05/2010	289	141,2	106,08	110,1	138,68	133,8	141,6	-	114,9	96,24
17/05/2010	290	124,82	101,04	120,18	121,04	152,7	155,46	95,84	140,1	118,92
18/05/2010	291	95,84	61,98	100,02	95,84	106,08	135,3	95,84	151,44	132,78
19/05/2010	292	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20/05/2010	293	107,18	64,5	83,64	99,62	98,52	111,36	-	117,42	94,98
21/05/2010	294	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22/05/2010	295	134,9	92,22	94,98	136,16	133,8	150,42	-	136,32	105,06
23/05/2010	296	-	-	105,06	-	-	81,12	-	148,92	69,78
24/05/2010	297	84,5	-	72,3	-	87,18	121,44	-	126,24	78,6
25/05/2010	298	121,04	83,4	93,72	117,26	121,2	159,24	59,3	126,24	97,5
26/05/2010	299	90,8	-	101,28	84,5	97,26	156,72	87,02	75,84	84,9
27/05/2010	300	90,8	-	78,6	81,98	84,66	125,22	-	112,38	103,8
28/05/2010	301	90,8	-	72,3	79,46	83,4	116,4	-	98,52	88,68
29/05/2010	302	90,8	-	74,82	79,46	60,72	108,84	-	96	84,9
30/05/2010	303	97,1	-	69,78	78,2	75,84	97,5	-	84,66	72,3
31/05/2010	304	84,5	-	68,52	-	65,76	78,6	-	84,66	73,56
01/06/2010	305	107,18	70,8	79,86	89,54	85,92	91,2	-	90,96	82,38
02/06/2010	306	121,04	85,92	91,2	104,66	102,3	116,4	-	102,3	87,42
03/06/2010	307	133,64	98,52	112,62	119,78	121,2	146,64	-	114,9	102,54
04/06/2010	308	143,72	108,6	110,1	138,68	140,1	168,06	-	124,98	94,98
05/06/2010	309	103,4	70,8	106,32	90,8	118,68	112,62	87,02	128,76	116,4
06/06/2010	310	108,44	68,28	98,76	94,58	103,56	84,9	79,46	122,46	129
07/06/2010	311	127,34	89,7	110,1	122,3	130,02	131,52	-	142,62	125,22
08/06/2010	312	143,72	108,6	121,44	147,5	156,48	141,6	-	165,3	142,86
09/06/2010	313	95,84	-	116,4	93,32	123,72	126,48	87,02	169,08	159,24
10/06/2010	314	107,18	70,8	106,32	100,88	121,2	129	-	160,26	169,32
11/06/2010	315	128,6	89,7	116,4	133,64	151,44	116,4	-	179,16	179,4
12/06/2010	316	147,5	151,44	132,78	166,4	165,3	63,48	-	200,58	161,76
13/06/2010	317	128,6	107,34	149,16	143,72	179,16	63,48	-	219,48	164,28
14/06/2010	318	109,7	103,56	166,8	121,04	194,28	53,4	-	266,1	168,06
15/06/2010	319	136,16	108,6	160,5	-	228,3	57,18	-	247,2	135,3
16/06/2010	320	147,5	121,2	166,8	-	261,06	-	-	229,56	78,6
17/06/2010	321	179	152,7	198,3	141,2	215,7	53,4	53	240,9	78,6
18/06/2010	322	196,64	182,94	222,24	132,38	199,32	-	116	342,96	83,64
19/06/2010	323	171,44	119,94	72,3	122,3	130,02	89,94	166,4	492,9	144,12
20/06/2010	324	223,1	210,66	204,6	166,4	471,48	-	127,34	445,02	63,48
21/06/2010	325	121,04	80,88	219,72	134,9	253,5	66	170,18	448,8	252,48
22/06/2010	326	109,7	77,1	157,98	122,3	282,48	72,3	121,04	446,28	312,96
23/06/2010	327	106,55	70,8	137,82	97,1	193,02	76,08	97,1	587,4	122,7
24/06/2010	328	121,04	89,7	122,7	134,9	206,88	53,4	122,3	339,18	126,48
25/06/2010	329	98,36	-	73,56	-	137,58	72,3	-	360,6	84,9
26/06/2010	330	109,7	64,5	84,9	84,5	128,76	49,62	-	159	120,18
27/06/2010	331	128,6	45,6	91,2	128,6	146,4	91,2	103,4	159	141,6
28/06/2010	332	134,9	103,56	110,1	147,5	177,9	125,22	136,16	162,78	83,64
29/06/2010	333	148,76	126,24	113,88	185,3	216,96	123,96	128,6	200,58	73,56
30/06/2010	334	119,78	98,52	125,22	127,34	234,6	106,32	116	224,52	166,8
01/07/2010	335	147,5	114,9	134,04	158,84	253,5	66	119,78	223,26	40,8
02/07/2010	336	109,7	247,2	129	103,4	99,78	144,12	105,92	278,7	166,8
03/07/2010	337	97,1	-	146,64	-	196,8	129	97,1	306,42	184,44
04/07/2010	338	122,3	94,74	130,26	129,86	186,72	66	119,78	298,86	89,94
05/07/2010	339	146,24	114,9	142,86	173,96	225,78	108,84	162,62	341,7	59,7
06/07/2010	340	161,36	140,1	136,56	191,6	282,48	123,96	185,3	379,5	60,96
07/07/2010	341	182,78	159	186,96	229,4	175,758	66	195,38	439,98	48,36
08/07/2010	342	116	70,8	130,26	118,52	63,24	91,2	148,76	285	141,6
09/07/2010	343	103,4	70,8	192	116	108,6	101,28	116	576,06	258,78
10/07/2010	344	126,08	222	166,8	147,5	313,98	72,3	131,12	660,48	166,8
11/07/2010	345	128,6	247,2	179,4	158,84	332,88	81,12	141,2	602,52	183,18
12/07/2010	346	150,02	128,76	160,5	197,9	423,6	97,5	170,18	531,96	179,4

13/07/2010	347	103,4	70,8	175,62	114,74	297,6	69,78	109,7	438,72	154,2
14/07/2010	348	110,96	79,62	145,38	104,66	288,78	83,64	107,18	634,02	129
15/07/2010	349	99,62	60,72	84,9	100,88	165,3	97,5	84,5	612,6	88,68
16/07/2010	350	113,48	77,1	87,42	110,96	182,94	71,04	95,84	439,98	135,3
17/07/2010	351	128,6	114,9	96,24	-	184,2	103,8	126,08	222	52,14
18/07/2010	352	141,2	103,56	117,66	-	253,5	93,72	136,16	311,46	62,22
19/07/2010	353	103,4	65,76	108,84	90,8	228,3	101,28	97,1	184,2	286,5
20/07/2010	354	123,56	83,4	103,8	134,9	80,88	86,16	116	266,1	53,4
21/07/2010	355	134,9	97,26	116,4	81,98	259,8	81,12	119,78	272,4	57,18
22/07/2010	356	113,48	83,4	129	81,98	267,36	96,24	-	297,6	118,92
23/07/2010	357	136,16	102,3	123,96	107,18	278,7	86,16	116	310,2	57,18
24/07/2010	358	153,8	118,68	129	84,5	322,8	72,3	121,04	348	53,4
25/07/2010	359	68,12	88,44	84,9	64,34	69,54	73,56	97,1	108,6	113,88
26/07/2010	360	185,3	165,3	156,72	-	70,8	125,22	123,56	79,62	59,7
27/07/2010	361	220,58	196,8	141,6	78,2	-	91,2	131,12	417,3	66
28/07/2010	362	210,5	206,88	149,16	84,5	176,64	121,44	181,52	607,56	82,38
29/07/2010	363	196,64	232,08	154,2	-	751,2	91,2	131,12	637,8	59,7
30/07/2010	364	258,38	261,06	168,06	-	-	92,46	129,86	703,32	60,96
31/07/2010	365	293,66	295,08	57,18	-	238,38	94,98	134,9	482,82	62,22
01/08/2010	366	342,8	342,96	100,02	-	216,96	-	152,54	360,6	67,26
02/08/2010	367	452,42	442,5	123,96	-	-	-	160,1	271,14	55,92
03/08/2010	368	472,58	470,22	125,22	90,8	96	53,4	147,5	385,8	84,9
04/08/2010	369	143,72	514,32	122,7	-	252,24	-	305	641,58	66
05/08/2010	370	451,16	-	134,04	84,5	-	-	137,42	770,1	53,4
06/08/2010	371	-	-	127,74	83,24	249,72	97,5	148,76	516,84	59,7
07/08/2010	372	-	-	137,82	84,5	-	72,3	151,28	511,8	59,7
08/08/2010	373	611,18	659,22	140,34	84,5	-	-	151,28	433,68	58,44

ANEXO V

SCRIPT DO PROGRAMA R UTILIZADO NAANALISE ESTATISTICA DOS DADOS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, Ph E FERRO DA SOLUÇÃO DO SOLO

a) Script da análise estatística dos dados de condutividade elétrica

```
library(readr)
dados <- read_csv("C:/R/marboce.csv")
attach(dados)
head(dados)
names(dados)
Tempo <- factor(ID)
Trat <- as.factor(trat)
Prof <- as.factor(prof)
Planta <- as.factor(planta)
Tempo <-as.factor(ID)
library(MASS)
modce <- lm(cond ~ Trat*Prof*Tempo+ Planta:Trat + Planta:Prof:Trat + Planta:Tempo)
anova(modce)
residuals(modce)
bartlett.test(cond ~ Trat, data=dados)
bartlett.test(cond ~ Prof, data=dados)
bartlett.test(cond ~ Tempo, data=dados)
bce <- boxcox(cond ~ Trat*Prof*Tempo)
(lambda <- bce$x[which(bce$y==max(bce$y))])
condt <- (cond^lambda-1)/lambda
condt
bartlett.test(condt ~ Trat, data=dados)
bartlett.test(condt ~ Prof, data=dados)
shapiro.test(residuals(modce))
shapiro.test(residuals(modcet))
modcet <- lm(condt ~ Trat*Prof*Tempo+ Planta:Trat + Planta:Prof:Trat +
Planta:Tempo)
anova(modcet)
```

```

residuals(modce)
library(lme4)
library(lmerTest)
library(multcomp)
mmce <- lmer(cond ~ Trat*Prof*Tempo+ (1|Planta) + (1|Planta:Prof) +
(1|Planta:Tempo))
anova(mmce)
tuk <- glht(mmce, linfct= mcp(Trat="Tukey"))
(tuk.cld <- cld(tuk))
plot(tuk.cld)
tuk1 <- glht(mmce, linfct= mcp(Prof="Tukey"))
(tuk.cld1 <- cld(tuk1))
plot(tuk.cld1)
tuk2 <- glht(mmce, linfct= mcp(Tempo="Tukey"))
(tuk.cld2 <- cld(tuk2))
plot(tuk.cld2)
preditos.ce<- as.double(fitted(mmce))
Tratamentos <- Trat
Profundidade <- Prof

interaction.plot(ID,Tratamentos,preditos.ce,lwd=3,col=1:5,xlab="Semanas",
                ylab="Condutividade elétrica da solução do solo mS/m")
abline(h=0)

interaction.plot(ID,Profundidade,cond,lwd=3,col=1:2,xlab="Semanas",
                ylab="Condutividade elétrica da solução do solo mS/m" )
abline(h=0)

```

b) Script da análise estatística dos dados de pH

```
library(readr)
dados <- read_csv("C:/R/marboph.csv")
attach(dados)
head(dados)
names(dados)
Tempo <- factor(ID)
Trat <- as.factor(trat)
Prof <- as.factor(prof)
Planta <- as.factor(planta)
library(MASS)
pht <- lm(ph ~ Trat*Prof*Tempo+ Planta:Trat + Planta:Prof:Trat + Planta:Tempo)
anova(pht)
library(lme4)
library(lmerTest)
library(multcomp)
mmph <- lmer(ph ~ Trat*Prof*Tempo+ (1|Planta) + (1|Planta:Prof) + (1|Planta:Tempo))
anova(mmph)
tuk <- glht(mmph, linfct= mcp(Trat="Tukey"))
(tuk.cld <- cld(tuk))
plot(tuk.cld)
tuk1 <- glht(mmph, linfct= mcp(Prof="Tukey"))
(tuk.cld1 <- cld(tuk1))
plot(tuk.cld1)
tuk2 <- glht(mmph, linfct= mcp(Tempo="Tukey"))
(tuk.cld2 <- cld(tuk2))
plot(tuk.cld2)
preditos.ph <- as.double(fitted(mmph))
Tratamentos <- Trat
Profundidade <- Prof

interaction.plot(ID,Tratamentos,ph,lwd=3,col=1:5,xlab="Semanas",
                ylab="pH da solução do solo" )
```

```

abline(h=0)
interaction.plot(ID,Profundidade,ph,lwd=3,col=1:2,xlab="Semanas",
               ylab="pH da solução do solo" )
abline(h=0)

```

c) Script da análise estatística dos dados de Ferro

```

library(readr)
dados <- read_csv("C:/R/marbofef.csv")
View(dados)
attach(dados)
head(dados)
names(dados)
Tempo <- factor(ID)
Trat <- as.factor(trat)
Prof <- as.factor(prof)
Planta <- as.factor(planta)
library(MASS)
bFe <- boxcox(FE ~ Trat*Prof*Tempo)
(lambda <- bFe$x[which(bFe$y==max(bFe$y))])
Fet <- (FE^lambda-1)/lambda
mFet <- lm(Fet ~ Trat*Prof*Tempo+ Planta:Trat + Planta:Prof:Trat +
Planta:Tempo)
anova(mFet)
library(lme4)
library(lmerTest)
library(multcomp)
mmFet <- lmer(Fet ~ Trat*Prof*Tempo+ (1|Planta) + (1|Planta:Prof) +
(1|Planta:Tempo))
anova(mmFet)
tuk <- glht(mmFet, linfct= mcp(Trat="Tukey"))
(tuk.cld <- cld(tuk))
plot(tuk.cld)
tuk1 <- glht(mmFet, linfct= mcp(Prof="Tukey"))

```

```
(tuk.cld1 <- cld(tuk1))
plot(tuk.cld1)
tuk2 <- glht(mmFet, linfct= mcp(Tempo="Tukey"))
(tuk.cld2 <- cld(tuk2))
plot(tuk.cld2)
preditos.Fet<- as.double(fitted(mmFet))
Tratamentos <- Trat
Profundidade <- Prof
interaction.plot(ID,Tratamentos,FE,lwd=3,col=1:5,xlab="Semanas",
                ylab="Conteudo Observado de Fe" )
abline(h=0)
interaction.plot(ID,Profundidade,FE,lwd=3,col=1:2,xlab="Semanas",
                ylab="Conteudo Observado de Fe" )
abline(h=0)
```