



**UFPA/MPEG/EMBRAPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

SAULO PRADO DE CARVALHO

**Regimes Térmico e Hídrico em Solos sob Ecossistemas
Naturais e Área Agrícola no Leste da Amazônia**

**Belém-PA
2007**

Saulo Prado de Carvalho

**Regimes Térmico e Hídrico em Solos sob Ecossistemas Naturais e
Área Agrícola no Leste da Amazônia**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com Embrapa e Museu Paraense Emílio Goeldi, em cumprimento a requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre em Ciências Ambientais**.

Área de concentração: Física do Clima.
Orientada pelo Prof. Dr. José Ricardo de Santos Souza,

**Belém-PA
2007**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- Carvalho, Saulo Prado de
- C331r Regimes térmico e hídrico em solos sob ecossistemas naturais e áreas agrícola no Leste da Amazônia. / Saulo Prado de Carvalho. – 2007
88 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
Orientador, José Ricardo Santos de Souza
1. Temperatura de solo. 2. Umidade do solo. 3. Fluxo de calor no solo. 4. Climatologia da Amazônia. 5. Propriedades térmicas do solo I.Universidade Federal do Pará II. Souza, José Ricardo Santos de, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.: 551.3909811

Saulo Prado de Carvalho

**Regimes Térmico e Hídrico em Solos sob Ecossistemas Naturais e
Área Agrícola no Leste da Amazônia**

Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com Embrapa e Museu Paraense Emílio Goeldi, em cumprimento a requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre em Ciências Ambientais**.

Apresentada em 14/12/2007.
Banca examinadora:

Prof. José Ricardo Santos de Souza - Orientador
Doutor em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal do Pará

Prof^a. Dr^a. Midori Makino - Membro
Doutora em Matemática
Universidade Federal do Pará

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Rutênio Luiz Castro de Araújo - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Amazonas

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao eterno Deus, por sempre me mostrar o caminho correto que nem é o mais fácil. Entretanto, Ele é a força interior que impulsiona meu espírito para superar dificuldades e vencer desafios.

Aos meus pais João Carlos e Lia, por sempre acreditarem na minha carreira acadêmica e me apoiarem nos momentos em que mais precisei deles.

À minha esposa Edilaine, pelo substancial apoio durante a produção desse trabalho. Agradeço muito a ela por me dar o sentido mais correto do que é ser uma família e também por dar o privilégio de compartilhar a responsabilidade de criar a nossa dádiva, Maria Luiza.

Ao Professor José Ricardo que, além de ter cumprido o seu papel na orientação, fez mais do que o possível para viabilizar as viagens para o campo necessárias em algumas etapas da pesquisa.

À professora Midori Makino, pela valiosa ajuda nos cálculos numéricos e sugestões na versão preliminar desta dissertação.

À Professora Regina Alvalá, pelas sugestões sempre bem vindas no início e no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Professor Edson Rocha, pela grande ajuda para o experimento em Paragominas.

À valiosa ajuda no campo dos colegas Rommel Costa e Alessandra Renê nas coletas de solo em Caxiuanã e Carlos Capela, em Paragominas.

Ao professor Everaldo Souza, pela compreensão dispensada para concluir o meu trabalho no mestrado em paralelo com as atividades do projeto da RPCH.

À professora Júlia Cohen, pelo uso dos computadores do Laboratório de Modelagem Atmosférica da Amazônia (LAMAZ) e pelos projetos LBA e Milênio LBA/UFGA pela infra-estrutura e custeio dos trabalhos de campo na FLONA Caxiuanã.

À Faculdade de Meteorologia - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará pela formação e oportunidade de realizar esse programa de mestrado.

À Editora da Universidade Federal do Pará, pela impressão das cópias definitivas da dissertação.

A todos que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente na construção desse trabalho - Muito Obrigado!

RESUMO

A temperatura e umidade do solo são variáveis cujo conhecimento é fundamental para determinar os balanços de energia e água na biosfera. Os regimes térmico e hídrico dos solos sob cada ecossistema apresentam variações consideráveis, de acordo com sua mineralogia, o clima local e a vegetação. Nesse contexto, as temperaturas e umidades do solo foram medidas sob três ecossistemas existentes na região leste da Amazônia, a saber: floresta nativa (FLONA Caxiuanã, 01° 42' 30" S e 51° 31' 45" W), pastagem nativa (Soure, 00° 43' 25" S e 48° 30' 29" W) e área agrícola (Igarapé-Açu, 01° 07' 59" S e 47° 36' 55" W). Os dados de campo na floresta e na pastagem foram coletados entre dezembro de 2001 e fevereiro de 2005; enquanto que na área agrícola, o monitoramento foi limitado de agosto de 2003 a fevereiro de 2005. Estas observações das variáveis físicas do solo foram analisadas levando em consideração as variáveis meteorológicas medidas simultaneamente tais como o fluxo de radiação solar incidente e a precipitação pluviométrica, que interferem diretamente nas variáveis do solo em cada sítio escolhido para estudo. As temperaturas do solo foram monitoradas por meio de sondas térmicas em profundidades de 0,05; 0,20 e 0,50 m. Fluxímetros de calor mediram esta variável em níveis de profundidade em 0,05 e 0,20 m. A umidade volumétrica do solo na camada superior de 0,30 m foi medida por sensor de sonda dupla por Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) em cada sítio. Foram feitas análises considerando as respostas do solo durante o período seco e chuvoso local, nestes três ecossistemas representativos do leste da Amazônia. Estimativas de difusividade térmica aparente do solo foram feitas pelos métodos da amplitude e da fase usando os dados de propagação do pulso diário de calor nesses solos. Os resultados mostraram valores bem diferentes, porém, no primeiro método pareceu mais confiável e adequado para o modelamento numérico. Como esperado, considerando a sua pouca cobertura vegetal, as temperaturas dos solos nos níveis superficiais, apresentaram grandes variações na pastagem e na área agrícola. Inesperadamente, as temperaturas na profundidade de 0,5 m abaixo da floresta mostraram maiores variações de amplitude que as profundidades de 0,20 e 0,05 m. O modelamento numérico das variações temporais da temperatura, em função da profundidade, para cada solo foi feito através do método harmônico

Os resultados mostraram que o primeiro harmônico representou mais de 90% da variação total observada do pulso diário da temperatura da pastagem e área agrícola em 0,2 e 0,05 m de profundidade. Performance similar do modelamento foi observada na floresta nos níveis de 0,05 e 0,20 m. A magnitude dos fluxos de calor abaixo da pastagem e área agrícola atingiram valores seis vezes maiores que aqueles observados sob a floresta. Os resultados mostraram que, para a camada do solo superior de 0,30 m, a umidade volumétrica do solo sob a floresta é maior que sob os outros ecossistemas estudados neste trabalho. Este resultado é devido aparentemente; à proteção da floresta contra a evaporação da superfície do solo.

Uma análise do comportamento sazonal e diário das temperaturas e umidade solos em resposta à radiação solar e precipitação é apresentada. Estudos de caso da taxa de perda da umidade do solo depois de significativa recarga de água por eventos de precipitação, também foram analisados. Algumas estimativas diárias de diminuição de água e recarga durante a noite e madrugada por subida de água de camadas subjacentes para a camada de 0.30 m foram feitas. Este trabalho analisou a maior serie temporal dos dados de temperatura e umidade dos solos coletados com alta frequência de amostragem disponível até o momento, para o leste da Amazônia. Foi possível caracterizar as diferenças dos regimes destas variáveis físicas, abaixo de três ecossistemas importantes desta região. Estudos futuros dos minerais e materiais orgânicos nestes solos, bem como dos índices de área foliar e da biomassa das coberturas vegetais desses ecossistemas, melhoraria a compreensão dos regimes descritos neste trabalho.

Palavras-chave: Temperatura do solo. Umidade do solo. Fluxo de calor no solo. Climatologia da Amazônia. Propriedades Térmicas do solo.

ABSTRACT

Soils temperature and moisture are variables whose knowledge is required to Determine the energy and water budgets in the biosphere. The thermal and hydric regimes of soils beneath each ecosystem, present considerable variations, according to their mineralogy, the local climate and vegetation. In this context, soil temperatures and moistures were measured under three ecosystems existing over the eastern portion of the Amazon Region, namely: native forest (Caxiuana's National Forest, 01° 42' 30" S and 51° 31' 45" W), pasture area (Soure, 00° 43' 25" S and 48° 30' 29" W) and cultivated area (Igarape-Acu, 01° 07' 59" S and 47° 36' 55" W). Field data at the forest and pasture sites were collected between December, 2001 and February, 2005; while at the cultivated area, the monitoring was limited to the August, 2003 to February, 2005, period. These observations of soil physical variables were analyzed taken into consideration the simultaneously measured meteorological variables such as the incoming solar radiation flux and pluviometric precipitation, which directly impacted the soil variables at each site selected for study. The soil temperatures were monitored by means of thermal sondes at 0.05, 0.2 and 0.5 m depths. Heat fluximeters, measured heat flux at 0.05 and 0.2 m depth levels. The upper 0.3 m soil layer bulk moisture was measured by double probe Time Domain Reflectometer (TDR) sondes at each site. Analyses were made, considering the soil responses during the local dry and rainy seasons at these three representative ecosystems of eastern Amazonia. Apparent thermal diffusivity estimates were made by the amplitude and phase methods, using the daily heating pulse propagation data in these soils. The results showed quite different values. However, the first approach seemed to be more reliable and suitable to numerical modeling. As expected, considering their small vegetation cover, the soil temperatures at the upper levels, presented larger variations at the pasture and cultivated sites. Unexpectedly, the temperatures at 0.5 m depth beneath the forest showed larger amplitude variations than at 0.2 and 0.05 m depths. The numerical modeling of time variations of temperature, as function of depth, for each soil was made through

the harmonic method. The results showed that the first harmonic represented over 90% of the total variation of the observed daily pulse of temperature for the pasture and cultivated areas at 0.2 and 0.05 m depths. Similar performance of the modeling was observed for the forest at 0.05 and 0.20 m levels. The magnitude of heat fluxes beneath the pasture and cultivated sites reached values six times larger than those observed beneath the soil of the forest. The results also show that, for the upper 0.30 m layer of soils, the bulk moisture beneath the forest is larger than under the other ecosystems studied in this work. This result apparently is due to the forest's protection against the soils surface evaporation. An analysis of the seasonal and daily behavior of the soils temperature and moisture in response to the incoming solar radiation and precipitation are presented. Case studies of the rate of soil moisture losses after significant water recharge by precipitation events were also analyzed. Some estimates of daily water depletion and even, night recharge of moisture by rising water from lower layers to the 0.30 m layer were made. This work analyzed the largest time series of soil temperature and moisture data taken at high sampling rates, available so far, for eastern Amazonia. It was possible to characterize the differences of these physical variables regimes, beneath three important ecosystems in this Region. Further studies of the minerals and organic materials in these soils, as well as the foliar area and biomass indexes of their vegetation covers, would improve the comprehension of the regimes described in this work.

Keywords: Soil temperature. Soil moisture. Soil heat flux. Climatology of Amazônia. Soil Thermal Properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 - Torre micrometeorológica no sítio floresta – Caxiuanã	19
2.2 - Média mensal da Precipitação em Caxiuanã no período 01/12/01- 28/05/05.....	20
2.3 - Estação meteorológica automática no sítio pastagem: Soure	21
2.4 - Média mensal da Precipitação em Soure no período 01/12/01- 28/05/05.....	22
2.5 - Estação meteorológica automática no sítio área agrícola: Igarapé-Açu ..	23
2.6 - Localização dos sítios experimentais do Projeto MILÊNIO-LBA.....	24
2.7 - Variação idealizada da temperatura do solo com o tempo em várias profundidades	26
4.5 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Floresta no período de 15/07 a 28/09/2002.....	32
4.6 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Floresta no período de 17/01 a 02/04/2003.....	32
4.7 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Pastagem no período de 15/07 a 28/09/2002.....	33
4.8 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Pastagem no período de 17/02 a 02/04/2003.....	33
4.9 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Área agrícola no período de 06/10 a 13/12/2004	34
4.10 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Área agrícola no período de 17/12 a 28/02/2005	34
4.11 - (a) Curva de co-seno representando o primeiro harmônico: (b) curvas para os primeiros três harmônicos	37
4.12 - Instrumentos utilizados durante o experimento.....	41
4.13 - Representação esquemática do processo de medida com o sistema TDR	43
5.1 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Floresta durante o período seco	45
5.2 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Floresta durante o período chuvoso	45
5.3 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Pastagem durante o período seco.....	46
5.4 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio pastagem durante o período chuvoso	46
5.5 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Área Agrícola durante o período seco	47

5.6 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Área Agrícola durante o período chuvoso	47
5.7 - Evolução diurna do fluxo de radiação solar incidente nos sítios estudados	48
5.8 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na Floresta.....	51
5.9 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na Pastagem	51
5.10 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na Área de cultivo agrícola	52
5.11 - Temperaturas médias horárias do solo no sítio Floresta nos períodos seco, chuvoso e todo o período	54
5.12 - Temperaturas médias horárias do solo no sítio Pastagem nos períodos seco, chuvoso e todo o período	55
5.13 - Temperaturas médias horárias do solo no sítio Área Agrícola nos períodos seco, chuvoso e todo o período	56
5.14 - Média horária da temperatura do solo na camada de 5 cm no período seco nos 3 sítios - Período Seco	57
5.15 - Média horária da temperatura do solo na camada de 5 cm no período chuvoso nos 3 sítios - Período Chuvoso	58
5.16 - Evolução diária das temperaturas do solo na floresta em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos	60
5.17 - Evolução diária das temperaturas do solo na pastagem em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos	61
5.18 - Evolução diária das temperaturas do solo na área agrícola em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos	62
5.19 - Evolução diária do fluxo de calor no solo na floresta nos períodos seco, chuvoso e todo o período	63
5.20 - Evolução diária do fluxo de calor no solo na pastagem nos períodos seco, chuvoso e todo o período	63
5.21 - Evolução diária do fluxo de calor no solo na área agrícola nos períodos seco, chuvoso e todo o período	64
5.22 - Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na Floresta	66
5.23 - Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na Pastagem	66
5.24 - Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na Área de cultivo agrícola	67
5.25 - Médias diárias da umidade volumétrica dos solos na camada de 30 cm abaixo da superfície sob floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure) e totais diários de precipitação. Comportamentos na estação de transição e no período seco de 2002	67
5.26 - Médias diárias da umidade volumétrica dos solos na camada de	

30 cm abaixo da superfície sob floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure) e totais diários de precipitação no período chuvoso de 2003	68
5.27 - Médias Mensais das umidades dos solos e precipitação na Floresta e Pastagem no período experimental (01/12/2001 a 28/02/2005). (Extraído de Souza et al., 2006)	69
5.28 - Umidade do solo e precipitação no sítio pastagem – período de 21 a 31/08/2002	71
5.29 - Umidade do solo e precipitação no sítio pastagem – período de 21 a 31/08/2002	73

LISTA DE TABELAS

4.1 - Limites para classificação de períodos secos e chuvosos	30
4.2 - Razão da umidade volumétrica do solo na camada de 0-30 cm determinada pelos métodos TDR e Gravimétrico.....	43
5.1 - Valores mensais de temperatura dos solos em 5, 20, e 50 cm de profundidade para os sítios Caxiuanã, Soure e Igarapé-Açu no período de dezembro de 2001 a fevereiro de 2005	50
5.2 - Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola durante o período seco	57
5.3 - Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola durante o período chuvoso	57
5.4 - Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola durante todo o período estudado	58
5.5 - Coeficientes de determinação (R^2) entre a temperatura do solo observada e a soma dos 4 primeiros harmônicos nos sítios floresta, pastagem e área agrícola	58
5.6 - Difusividades térmicas aparentes do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área de cultivo agrícola segundo os métodos da amplitude e da fase	64
5.7 - Valores Sazonais da Umidade dos Solos nos sítios de floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure)	69
5.8 - Médias diárias de umidade volumétrica do solo, precipitação e diferença da umidade do solo observada na pastagem no período de 21 a 31/08/2002. Os valores em negrito representam os valores máximos das variáveis	70
5.9 - Médias diárias de umidade volumétrica do solo, precipitação e diferença da Umidade do solo observada na pastagem no período de 21 a 31/08/2002. Os valores em negrito representam os valores máximos das variáveis	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OS SOLOS E O AMBIENTE AMAZÔNICO	16
2	O CONTEXTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL	19
2.1	CARACTERÍSTICAS DE SOLO, CLIMA E VEGETAÇÃO DOS SÍTIOS EXPERIMENTAIS.....	19
2.1.1	Floresta	19
2.1.2	Pastagem	21
2.1.3	Área Agrícola	23
2.2	TEMPERATURA DO SOLO	25
2.3	FLUXO DE CALOR NO SOLO E SEUS COMPONENTES	26
3	OBJETIVOS	28
3.1	GERAIS	28
3.2	ESPECÍFICOS	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE PERIODOS SECOS E CHUVOSOS	29
4.2	TEORIA	34
4.2.1	Cálculo da difusividade térmica aparente	34
4.2.1.1	Método da amplitude	35
4.2.1.2	Método da Fase.....	35
4.2.2	Análise Harmônica das Séries Temporais de Temperatura do Solo	36
4.3	INSTRUMENTOS E COLETA DOS DADOS	38
4.3.1	Radiação solar incidente	39
4.3.2	Precipitação	39
4.3.3	Temperatura do Solo	39
4.3.4	Umidade do Solo	39
4.3.4.1	Medida da umidade do solo por TDR	40
4.3.1.1	Calibração	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE	44

5.2	REGIME TÉRMICO DO SOLO	48
5.2.1	Variação Diurna da Temperatura do Solo	53
5.2.2	Harmônica da Temperatura do Solo	58
5.3	FLUXO DE CALOR NO SOLO	61
5.4	DIFUSIVIDADE TÉRMICA APARENTE DO SOLO	63
5.5	REGIME HÍDRICO DO SOLO	64
5.5.1	Padrões Sazonais	66
5.5.2	Estudos de Casos de Variações Diárias e Horárias	69
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	74
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE	83
	APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO POR MEIO DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO	84
	APÊNDICE B - TABELAS DOS VALORES DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E DE SOLO	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Os Solos e o Ambiente Amazônico

Os solos participam de todo o processo de troca de água e energia entre a superfície, a biota e a atmosfera. Nos processos de interação solo-atmosfera, os perfis de temperatura e umidade em solos dependem, entre outros fatores, das características físicas dos mesmos e das trocas de calor e vapor d'água com a atmosfera, que por sua vez dependem do clima e da cobertura vegetal local (SOUZA et al. 2002).

O estudo térmico dos solos, bem como a sua variabilidade espacial e temporal, se torna ainda mais importante na medida em que a situação natural dos ecossistemas naturais é perturbada por mudanças feitas pelo homem. Na Amazônia, a exploração madeireira em escala industrial, as queimadas e a expansão da fronteira agrícola têm produzido os impactos antropogênicos mais significativos para as mudanças na interação solo-planta-atmosfera.

A cobertura e uso da terra têm uma importância de primeira ordem como forçante climática. Entretanto, o estudo da variabilidade de tal forçante que altera a temperatura, a evaporação, a precipitação e outras variáveis climáticas tem sido ignorado (PIELKE, 2005). Simulações de mudanças climáticas feitas por Feddema et al., (2005) com diferentes cenários de paisagem, mostraram que decisões futuras no uso da terra podem alterar as simulações de mudança climática global, que às vezes levam em consideração somente a mudança da composição da atmosfera.

A conversão da vegetação da floresta nativa para pastagem, agricultura e outros tipos de uso da terra são evidenciados em todo território amazônico, mas desde a segunda metade da década de 1950 foi na região leste da Amazônia e em Rondônia, na Amazônia ocidental, que esse processo foi intensificado. A substituição da floresta por áreas de pastagem modifica as interações locais entre o solo, vegetação e atmosfera. Se grandes extensões de florestas são desmatadas, podemos esperar mudanças afetando os

sistemas atmosféricos causadores de variações no tempo, as quais somadas por um longo período formam um novo clima (MOTA e GALVÃO 1996). A partir desse problema, é necessário que um estudo de transferência de calor e umidade no perfil térmico dos solos na região Amazônica seja feito e acoplado nos atuais modelos de previsão climática, além de fornecer informações importantes do solo para estudos de agronomia visando a produtividade agrícola. Para isso, um estudo detalhado das séries temporais de temperatura e umidade dos solos de ecossistemas naturais representativos da Amazônia foi realizado.

Estudos mais recentes de propriedades térmicas e hídricas em solos amazônicos foram objeto de diversos levantamentos desde os anos 90 no âmbito dos projetos ABRACOS e LBA (SOUZA et al 1998, 2000, 2004; ARAÚJO et al., 1993, 1995; MAKINO et al., 1991). As respostas térmicas e hídricas dos solos sob floresta e pastagem também foram objeto de estudos em alguns pontos do leste da Amazônia (SOUZA et al., 1991, 1993 a, b, 1996, 1998, 2002, 2006 ; PINHEIRO et al., 1994) e da região oeste (ALVALÁ et al., 1996, 2002 e ARAÚJO et al., 2004). Tais estudos tinham como objetivos monitorar variáveis de solo como temperatura e umidade do solo na camada rasa de ecossistemas representativos da região amazônica, principalmente sob floresta e pastagem e permitir o cálculo da difusividade térmica aparente de fluxo de calor sob os solos desses ecossistemas.

Em geral, os experimentos citados acima abrangeram alguns dias ou meses, exceto o estudo feito por Souza et. al. (2006), no qual leituras de temperatura e umidade foram registrados durante cinco anos, em intervalos semanais. No presente estudo a série temporal totalizou cinco anos com incrementos de 10 e 30 minutos entre as medidas. Essa amostragem é ideal para identificar respostas térmicas e hídricas no solo, no que tange as suas variações horárias e para estimativas de fluxos de calor no solo, a partir das temperaturas subsuperficiais. Tais procedimentos permitem conhecer o perfil térmico do solo e o comportamento sazonal do fluxo e armazenamento de calor.

O projeto Milênio LBA/UFGPA, entre outros objetivos, visou monitorar de modo intensivo as variáveis meteorológicas e de solo por meio de estações automáticas desde o ano 2000, nos sítios localizados em Caxiuanã (floresta nativa), Soure (pastagem nativa) e Igarapé-Açu (cultivo agrícola), no Estado do Pará. As séries temporais de temperatura registradas possibilitam estimar o fluxo de calor no solo e o comportamento térmico na camada rasa nestes sítios, que são variáveis necessárias para a inicialização de modelos numéricos de tempo e clima, que podem ser utilizados na avaliação do impacto do desmatamento e do clima presente e futuro, na região considerada (SOUZA et al., 2004).

A umidade volumétrica do solo foi monitorada visando determinar a sua variabilidade na camada de 30 cm de profundidade, já que a umidade em grande parte determina o regime térmico através do elevado calor específico da água. Por outro lado o teor de umidade nos solos condiciona a evaporação e a transpiração vegetal que são outras importantes variáveis no modelamento de tempo e de clima. Informações sobre o ambiente físico e biológico também são necessários para explicar o comportamento do movimento de água nessa camada rasa.

2 O CONTEXTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL

2.1 Características de Solo, Clima e Vegetação dos Sítios Experimentais

2.1.1 Floresta

O local de floresta selecionado situa-se em $01^{\circ} 42' 30''$ S e $51^{\circ} 31' 45''$ W, na Reserva Florestal de Caxiuanã, com área de 33.000 hectares, acerca de 500 km do Atlântico, no município de Melgaço-Pa. Essa reserva é constituída, em 85% de sua área, por floresta densa de terra firme, com dossel das árvores maiores a níveis entre 30 e 40 m de altura; as quais, entretanto, só interceptam pouco mais de 10% da precipitação incidente (MORAES, et al., 1997). No interior dessa área foi erguida uma torre de 54 m de altura, no topo da qual estão instalados os sensores de precipitação e radiação, bem como o sistema de aquisição de dados, conectado por cabos aos sensores de temperatura e umidade do solo, instalados próximo à base da torre.



Figura 2.1 - Torre micrometeorológica no sítio floresta - Caxiuanã

O solo do local é Latossolo amarelo distrófico, constituído em sua camada superior de 50 cm de profundidade por argila arenosa (LISBOA, 1997). Trata-se de solo envelhecido, ácido a fortemente ácido e de boa drenagem, apesar de por vezes apresentar-se bastante argiloso. A granulometria neste sítio é caracterizada por 53% de argila, 37% de areia e 10% de silte.

Segundo SUDAM (1984), o clima da região é caracterizado por uma pluviosidade média anual de 2000 a 2500 mm, sendo o trimestre mais seco o de setembro a novembro com precipitações mensais entre 20 e 100 mm, e o mais chuvoso o de fevereiro a abril, com precipitações mensais de 200 a 400 mm. A temperatura média anual é de 25 a 26 °C. Segundo a classificação de Köppen, o clima da área é do tipo A, isto é, tropical úmido com a temperatura média do mês mais frio nunca inferior a 18 °C. No referente a sub-clima, a área de estudo está caracterizada pelo tipo m, ou seja, clima de monção, com precipitação excessiva durante alguns meses, o que é compensado com um ou dois meses com precipitações inferiores a 60 mm. Durante o período estudado, o regime de precipitação na floresta foi bem distribuído, com um mínimo de 50 mm ocorrido em novembro, conforme mostrado na figura 2.1.

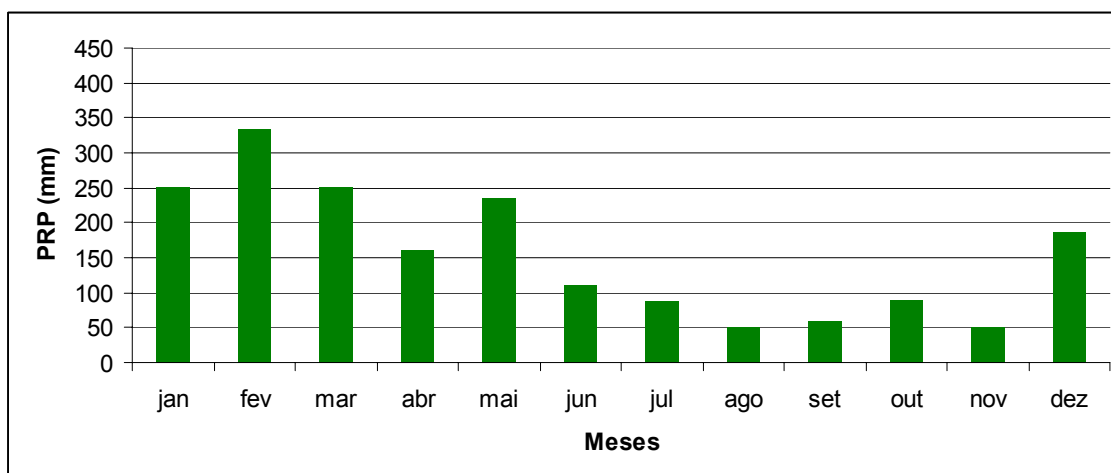


Figura 2.2 – Média mensal da Precipitação em Caxiuanã no período 01/12/01-28/05/05.

A área da Estação Científica Ferreira Penna se encontra dentro da região ecológica de Floresta Densa, especificamente na sub-região dos baixos platôs do Pará/Maranhão/Amapá (BRASIL, 1974). Esta classe de Floresta Densa, na grande região amazônica, pode ser considerada sinônimo da Floresta Ombrófila Tropical, caracterizada, sobretudo por árvores de grande porte, por vezes com mais de 50 metros de altura, que sobressaem do estrato arbóreo uniforme, entre 25 e 35 metros de altura.

Esta grande região ecológica pode ser ainda subdividida em dois grandes grupos presentes na área: Matas de Terra Firme e Matas de Igapó.

A Mata de Terra Firme é caracterizada por uma alta diversidade de espécies, sem uma nítida predominância no referente à densidade ou a cobertura, presença de raízes expostas (sapopemas) e caules com formas irregulares, entre outras características (PIRES, 1973).

As matas de Igapó são relativamente pobres em biomassa e em diversidade, e vegetação muito especializada (BRAGA, 1979), sendo muito comum a presença de raízes expostas, raízes suportes e raízes respiratórias (PIRES, 1973).

2.1.2 Pastagem

A pastagem de Soure é de origem natural, representativa da parte sul e leste da Ilha do Marajó, que é coberta por campos utilizados para criação de gado e búfalo. Nas coordenadas 00° 43' 25" S e 48° 30' 29" W, na Fazenda Araruna, foram instalados os sensores no solo e no ar a 2 m acima da superfície.



Figura 2.3 - Estação meteorológica automática no sítio pastagem - Soure

Os principais solos são Plintossolos fase normal, imperfeitamente drenada, fase húmica, Gleis Pouco Húmicos, solos Aluviais, Areias Quartzosas

Hidromórficas, solos Salinos Latossolos Amarelos e Hidromórficos Indiscriminados (IDESP, 1974).

A temperatura em Soure, no sudeste da Ilha do Marajó, varia diariamente entre os máximos e mínimos em torno de 31,0 e 24,3 °C, com média anual de 27,3 °C. O clima local, segundo Köppen, é do tipo A_{mi} (BASTOS, 1972). A parte oriental da região do Marajó, onde está a área de estudo, apresenta clima tropical quente e úmido com pluviosidade média anual de 2100 mm e mensal inferior a 60 mm em mais de dois meses do ano (figura 2.2). Essa precipitação atinge índice máximo em março, quando a ZCIT se centraliza no local. Entretanto a borda avançada de nebulosidade da ZCIT alcança Soure em meados de dezembro, definindo o início da estação chuvosa.

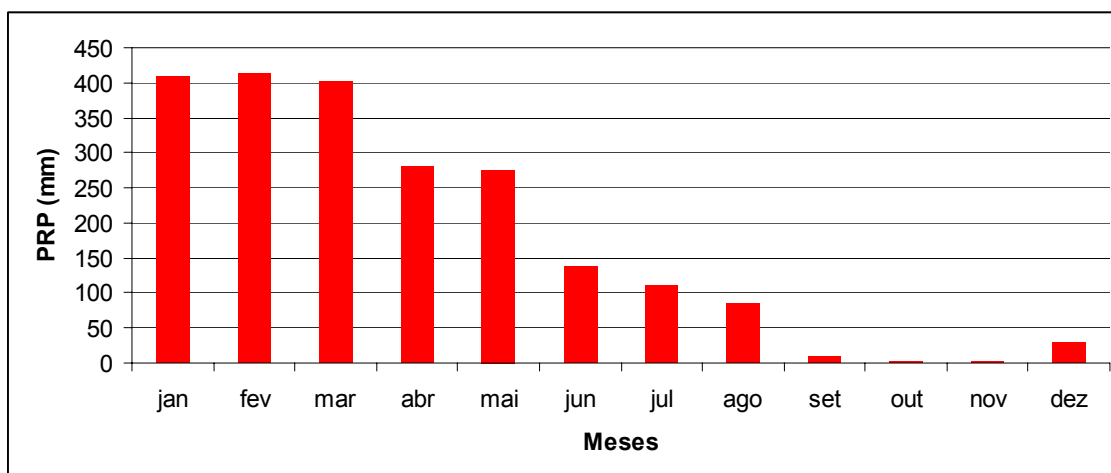


Figura 2.4 – Média mensal da Precipitação em Soure no período 01/12/01-28/05/05.

A vegetação é do tipo cerrado parque, tem-se campos naturais com flora de savana em áreas raramente atingidas pelas inundações. Estes campos são recobertos por vegetação rasteira graminosa de capim barba de bode e arbórea.

2.1.3 Área Agrícola

Em Igarapé-Açu foi instalada uma torre de 3 metros de altura, na qual foram medidas medindo variáveis meteorológicas e de solo localizada na Fazenda Escola da Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA, nas coordenadas $01^{\circ} 07' 59''$ S e $47^{\circ} 36' 55''$ W.



Figura 2.5 - Estação meteorológica automática no sítio área agrícola – Igarapé-Açu

Rego et al. (1993) classificou o tipo de solo predominante no município como Latossolo Vermelho Amarelo, além de outros tipos de solo como Podzólicos Vermelho Amarelo Álico, e Areia Quartizosa. Na região em estudo, o solo é identificado como Latossolo Vermelho Amarelo. Tratam-se de solos formados a partir de materiais do pré-Cambriano e possuem baixa fertilidade natural que aparecem com textura média, argilosa a muito argilosa, onde a argila apresenta alto grau de floclulação.

No município, a paisagem natural encontra-se bastante modificada pela intensa atividade antrópica. A cobertura vegetal é dividida em quatro classes: Floresta Ombrófila Densa (matas de igapó e várzea), e os estágios avançado, intermediário e inicial da sucessão secundária. A sucessão secundária é a mudança na composição florística da vegetação que se desenvolve em áreas que sofreram distúrbios (KANASHIRO e DENICH, 1998).

Quando se consideram as áreas de vegetação secundária, independente do estágio de sucessão em que se encontram, verifica-se que, juntas, elas podem chegar a ultrapassar até 73% da superfície do município (KANASHIRO e DENICH, 1998).

O clima da região é do tipo A_{mi} , na classificação de Köppen, quente e úmido, tipicamente equatorial, com uma temperatura média de 26°C e precipitação média anual de 2500 mm, sendo que 60% desse total cai durante o período chuvoso entre janeiro e abril (EMBRAPA, 2002).

O município de Igarapé-Açu compreende uma área de 769,75 km². Segundo o IBGE (2002), no ano de 2000 o município apresentava densidade demográfica de 40,6 hab/km². Dos 32.361 habitantes do município, 60% residem na área urbana (19.443 hab) e 40% (12.944 hab) na área rural, sem saneamento básico e energia.

A exploração agrícola é a principal atividade econômica do município, sendo constituída predominantemente por pequenas áreas cultivadas pelo método de corte e queima. Tratam-se principalmente de culturas de ciclo curto como feijão, milho, arroz, mandioca, melancia e maracujá. No município encontram-se também outros agrossistemas incluindo o dendê, pimenta-do-reino, pastagem e sistemas agroflorestais (BASTOS e PACHECO, 2000).

Como mostrado na figura 2.3, os sítios experimentais de pastagem e área agrícola estão situados próximos ao litoral e o sítio floresta encontra-se mais adentro do continente.



Figura 2.6 – Localização dos sítios experimentais do Projeto MILÊNIO-LBA.

Fonte: ESRI (2004)

2.2 Temperatura do solo

A temperatura do solo é uma das propriedades físicas mais importantes na identificação e determinação de medidas dos processos físicos do solo como troca de energia e massa, evaporação e aeração, além de influenciar no grau de crescimento de plantas e na taxa de decomposição de matéria orgânica. Estudos que envolvem propriedades térmicas e água no solo são voltados em grande parte para a produtividade agrícola, pois suas variações no espaço e no tempo influenciam as taxas de reações químicas e processos biológicos como germinação de sementes, brotamento e crescimento, desenvolvimento do sistema radicular e processos biológicos (MOROIZUMI e HORINO, 2002; ANDRADE e ABREU, 2002) e o uso do calor no subsolo como armazenador de energia térmica em regiões desérticas (NASSAR et al., 2006). Nos trabalhos em que foram comparados perfis de temperatura em solo coberto por gramíneas e cobertura vegetal (VIANELLO et al., 1982; ALVALÁ et al., 2002; SOUZA et al., 2002), as variações diárias das temperaturas do solo próximas à superfície em solo semi descoberto, como esperado, tiveram uma amplitude superior às temperaturas do solo coberto com vegetação de porte alto, além de ressaltarem que a temperatura do solo possui uma variabilidade sazonal significativa.

De um modo geral, a maior flutuação da temperatura do solo é observada próxima à superfície, dentro de 20 centímetros de profundidade. Abaixo de aproximadamente 1 metro existe uma pequena variação de temperatura associada ao ciclo diário, embora o sinal do ciclo anual ainda seja muito evidente nesta profundidade (STULL, 1988). Na figura 2.5 é mostrada uma variação idealizada da temperatura do solo com o tempo em várias profundidades. Neste caso o solo é descoberto e uniforme com difusividade de $8,1 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

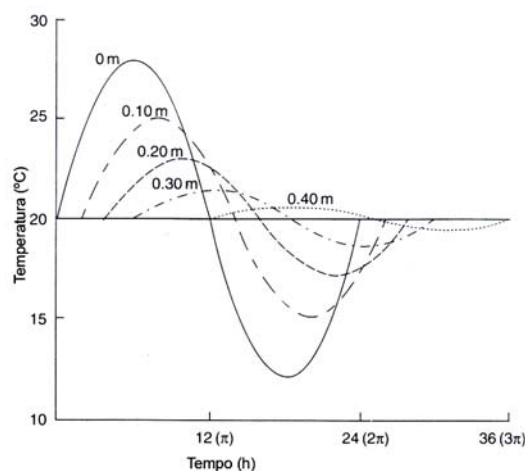


Figura 2.7 – Variação idealizada da temperatura do solo com o tempo em várias profundidades. (Adaptado de Hillel, 2004)

O leste da Amazônia possui vários tipos de ecossistemas como florestas de terra firme, várzeas, manguezais e áreas modificadas para a atividade pastoril e agrícola. Portanto vários regimes de temperatura são encontrados e, conseqüentemente, diferentes balanços de energia.

2.3 Fluxo de calor no solo e seus componentes

O fluxo de calor no solo (G) é controlado pela sua condutividade térmica e pelos gradientes de temperatura. Os gradientes térmicos podem ser determinados experimentalmente, instalando-se sondas térmicas a várias profundidades ou pela lei de Fourier (ANTONINO et al., 1997; VIANELLO et al., 1982). A Lei de Fourier expressa o fluxo de calor em uma camada plana e homogênea de solo, da seguinte forma (VAN LOON et al., 1998):

$$G = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

onde T é a temperatura, x é a profundidade e λ é a condutividade térmica.

A condutividade térmica (λ) é resultado do produto da capacidade calorífica volumétrica do solo (C), pela sua difusividade térmica (α). Segundo

Rosenberg (1983), a condutividade do solo depende da mineralogia, da porosidade, do conteúdo de umidade e de matéria orgânica no mesmo. Além do mais, a condutividade térmica dos solos determina a taxa de transferência de calor. É na verdade um fator de proporcionalidade determinado empiricamente ao invés de uma constante física (ROSENBERG, 1974).

A difusividade térmica (α) é descrita como a variação da temperatura numa unidade de volume pela quantidade de calor que flui através do volume por unidade de tempo sob um gradiente de temperatura. É obtida pelo quociente entre condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, com unidade dada em $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$. Ela determina a velocidade de penetração da onda de temperatura no solo enquanto que a condutividade determina a razão do transporte de calor (ROSENBERG, 1974). Vários métodos existem para estimar a difusividade térmica. O método analítico consiste em calcular α a partir de uma série temporal de temperaturas medidas ao longo de um dia em dois ou mais níveis do solo (HORTON e WIERENGA, 1983). Tais métodos são considerados periódicos. A maior parte desses métodos baseia-se na resolução da equação unidimensional da condução do calor e, para fins teóricos, é suposto que a camada considerada do solo é homogênea, isotrópica, sem fontes ou sumidouros de calor (VIANELLO et al. 1982; SANTOS et al., 1988). Também pode ser calculada diretamente a partir dos valores de condutividade, densidade e calor específico volumétrico do solo amostrado, obtidos em laboratório (SOUZA et al., 2006). Embora se obtenha resultados mais precisos em relação aos métodos analíticos, a determinação de propriedades térmicas no solo por métodos laboratoriais requer controle muito rigoroso no manuseio das amostras e se torna inviável para estudos de aplicação imediata, como por exemplo, análises de solos para aptidão agrícola. Nesse contexto, a opção por métodos analíticos e estimativas para a determinação das propriedades térmicas do solo é uma boa alternativa, principalmente devido à praticidade em relação aos procedimentos laboratoriais e pelos resultados satisfatórios.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral:

Determinar os regimes térmico e hídrico nos solos em áreas de floresta, pastagem e área de cultivo agrícola no leste da Amazônia, representados pelos sítios do Projeto Milênio LBA/UFPA de acordo com as características climáticas encontradas nessa região, além de avaliar estimativas de fluxo de calor para cada sítio.

3.2 Específicos:

- Analisar a variação horária, diária e sazonal das temperaturas dos solos a 5, 20 e 50 cm de profundidade nos sítios do projeto Milênio-LBA/UFPA e umidade volumétrica do solo na camada de 30 cm de profundidade.
- Propor um método matemático-estatístico de classificação de períodos chuvosos e secos (menos chuvosos) para os sítios estudados.
- Analisar as temperaturas dos solos nessas três profundidades pela análise harmônica.
- Estimar e comparar a difusividade térmica do solo nos sítios pelos métodos da amplitude e da fase.
- Quantificar as perdas aproximadas de umidade na Floresta e na Pastagem por meio de estudo de casos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Critérios de Classificação de Períodos Secos e Chuvosos

Para os três sítios experimentais, foi desenvolvido para este trabalho um critério a fim de separar as estações seca e chuvosa, além da transição entre essas duas estações. Este procedimento é uma alternativa válida que determina de forma geral a duração dos períodos, haja vista que estes variam de ano para ano e de um local para o outro.

Para a obtenção quantitativa do período chuvoso (PC), foi utilizada a seguinte expressão:

$$PC \geq \frac{\bar{P}}{2} \quad (4.1)$$

onde \bar{P} é média da precipitação do período estudado.

O resultado dessa expressão representa um limite. Os valores diários de precipitação que estão acima deste limite indicam a estação chuvosa.

O Período seco (PS) é considerado pela seguinte expressão:

$$PS \leq \frac{\bar{P}}{4} \quad (4.2)$$

Como na expressão 4.1, também é representado um limite. No entanto, os valores que não ultrapassam esse limite caracterizam o período seco. A média móvel de 7 dias de precipitação foi utilizada para ser o indicador de período. Se ela estiver acima do limite determinado por PC (eq. 4.1), o período é considerado chuvoso ou, se estiver abaixo da reta que representa PS (eq. 4.2), o período é considerado seco. Entre os limites obtidos há a caracterização do período de transição (PT), que se optou não considerar neste trabalho por haver poucos dados no sítio da área agrícola. A equação que representa o Período de Transição é:

$$\frac{\bar{P}}{4} < PT < \frac{\bar{P}}{2} \quad (4.3)$$

Para a caracterização e análise corretas dos períodos secos e chuvosos nos sítios, é necessário que não haja interrupções significativas na série, ou seja, paralisações maiores que 2 meses consecutivos podem comprometer os limites que definem os períodos secos e chuvosos. Como mostrado na tabela 4.1, os limites para classificação de períodos secos e chuvosos no sítio floresta e pastagem foram semelhantes. Esses limites foram maiores na pastagem, com 3,5 mm/dia para a estação chuvosa e 1,8 para a estação seca. Na floresta, 3,1 mm/dia e 1,6 mm/dia caracterizaram a estação chuvosa e seca, respectivamente. Devido à coleta dos dados de chuva na área agrícola ter iniciado a partir de agosto de 2003 e possuir paralisações de mais de dois meses, os valores de 1,3 mm/dia no período chuvoso e 0,7 mm/dia no período seco não foram suficientes para caracterizar os períodos sazonais no sítio. De um modo geral, o estabelecimento dos períodos secos e chuvosos está relacionado como a distribuição mensal da precipitação ao longo do ano.

Tabela 4.1: Limites para classificação de períodos secos e chuvosos

Limites (mm/dia)	Floresta	Pastagem	Área Agrícola
Estação Chuvosa	3,1	3,5	1,3
Estação Seca	1,6	1,8	0,7

Segundo a classificação sazonal proposta, o início dos períodos é muito variável nos sítios, como é mostrado no quadro 4.1. Entretanto, a duração dos períodos em meses é aproximadamente a mesma com diferença de alguns dias de um ano para outro. Este resultado indica que o critério aparentemente arbitrário adotado para a separação das estações apresentou caráter funcional satisfatório, pelo menos para o leste da Amazônia.

Quadro 4.1: Períodos secos e chuvosos segundo as expressões 4.1 e 4.2 e porcentagem dos dados válidos.

Sítios	Período Seco	Dias	Período Chuvoso	Dias	Total
Floresta Caxiuanã	04/06/02 – 16/01/03	221	01/12/2001 – 03/06/2002	129	01/12/01 – 30/06/03
	05/04/03 – 11/11/03	203	26/01/2003 – 23/06/2003	149	14/07/03 – 15/11/03
	24/07/03 – 13/01/04	121	14/01/2004 – 23/07/2004	192	01/01/04 – 21/08/04
	14/08/04 – 17/01/05	29			
		574 (54%)		470 (46%)	1044
Pastagem Soure	01/12/01 – 04/01/02	35	05/01/02 – 25/06/02	172	01/12/01 – 21/11/02
	15/07/02 – 21/11/02	130	26/01/03 – 28/08/03	211	26/01/03 – 11/02/04
	29/08/03 – 11/01/04	136	12/01/04 – 24/05/04	74	12/04/04 – 24/05/04
	03/09/04 – 12/01/05	128	15/01/05 – 28/02/05	45	22/06/04 – 28/02/05
		429 (46%)		502 (54%)	931
Agricultura Igarapé-Açu	30/09/03 – 31/10/03	32	19/12/04 – 28/02/05	72	26/08/03 – 31/10/03
	06/10/04 – 16/01/05	139			26/09/04 – 28/02/05
		171 (70%)		72 (30%)	243

Nas figuras 4.6, 4.8 e 4.10 são mostradas as aplicações das expressões 4.1 e 4.2 para os 3 sítios estudados durante 10 semanas do período seco (ou menos chuvoso) do ano de 2002. Nesta época foram observadas precipitações de natureza convectiva de até 10 a 14 mm/dia que duraram em torno de 3 ou quatro dias na floresta, pastagem e área agrícola. Essas ocorrências de chuvas fizeram a média móvel ultrapassar o valor que representa o período chuvoso. Entretanto, este curto período de tempo não foi considerado chuvoso porque depois de aproximadamente 7 dias, a curva da média móvel voltou a ficar abaixo do limiar que representa o período seco (ou menos chuvoso).

De acordo com a Climatologia, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema precipitante no leste de Amazônia durante o período chuvoso, como é mostrado nas figuras 4.6, 4.8 e 4.10. No período considerado os picos de precipitações diárias registradas foram de 53 mm/dia na floresta (23/02/2003), 270 mm/dia na pastagem (14/03/2003) e 65 mm/dia na Área agrícola (28/12/2004). As médias móveis dos três sítios sempre estiveram acima do valor considerado chuvoso, apesar da ausência de chuvas em alguns dias.

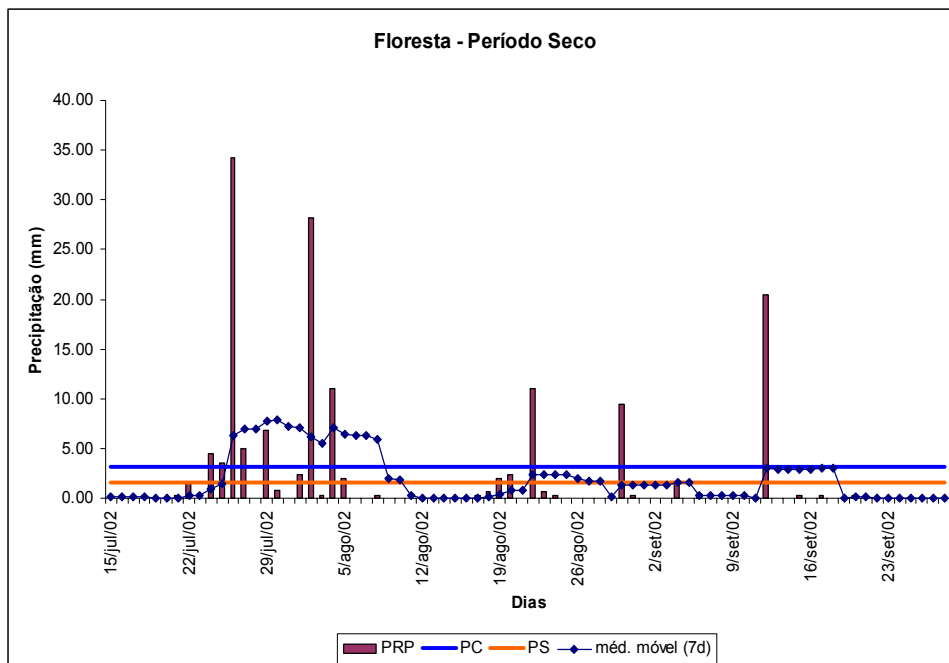


Figura 4.5 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Floresta no período de 15/07 a 28/09/2002.

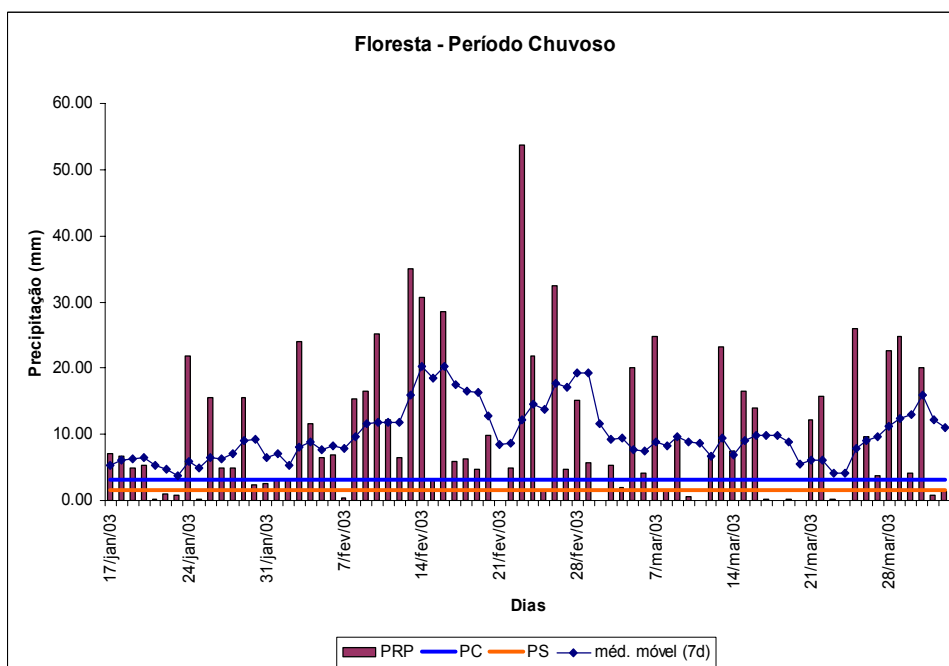


Figura 4.6 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Floresta no período de 17/01 a 02/04/2003.

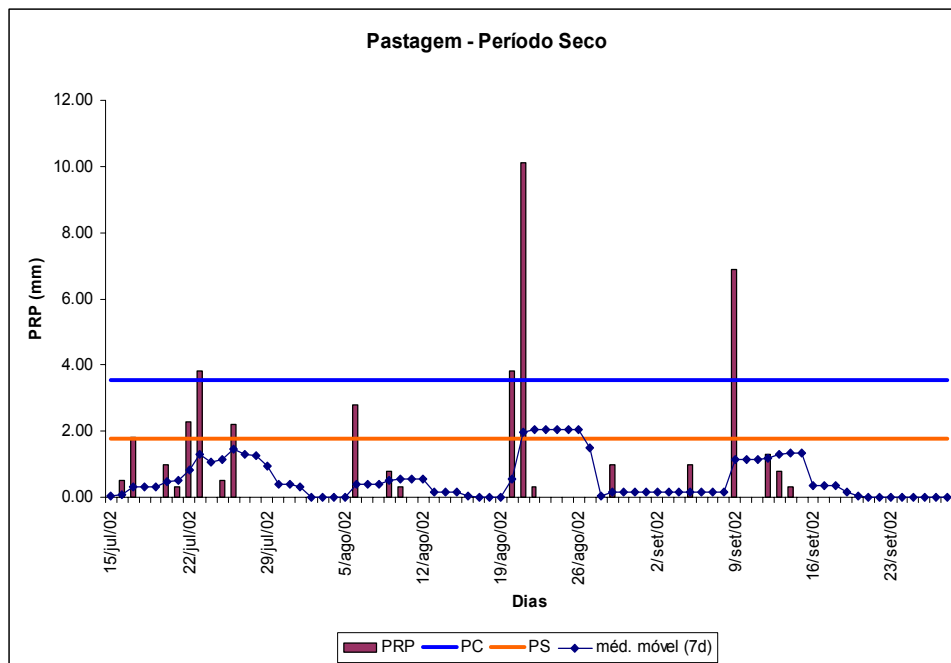


Figura 4.7 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Pastagem no período de 15/07 a 28/09/2002.

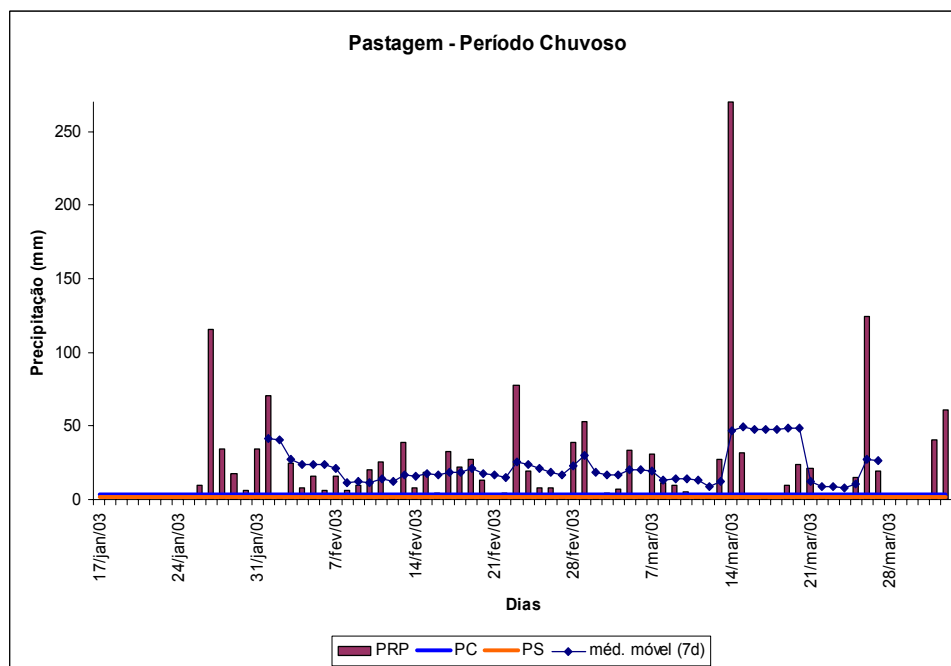


Figura 4.8 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Pastagem no período de 17/02 a 02/04/2003.

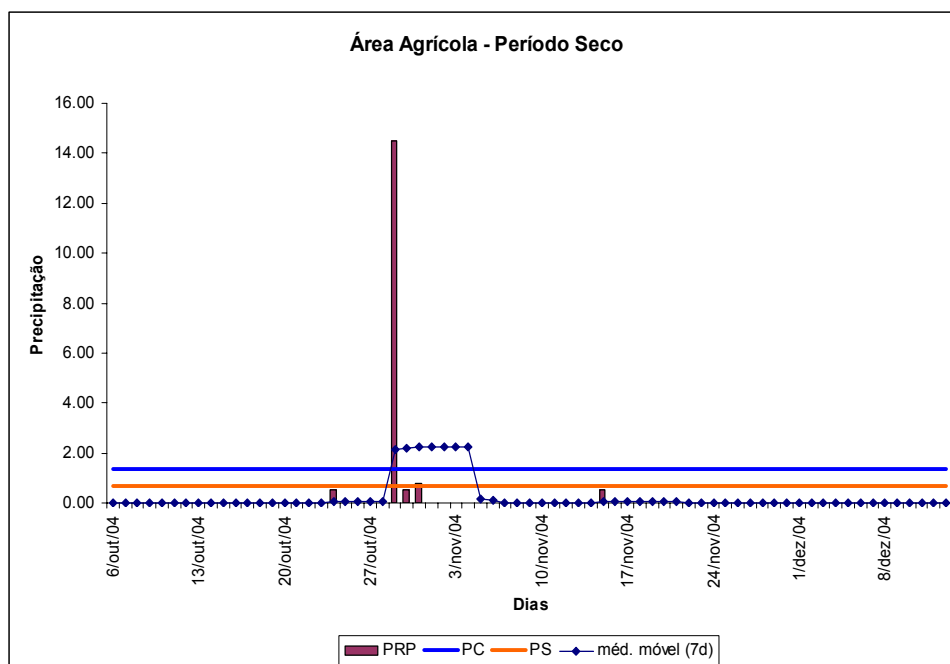


Figura 4.9 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Área agrícola no período de 06/10 a 13/12/2004.

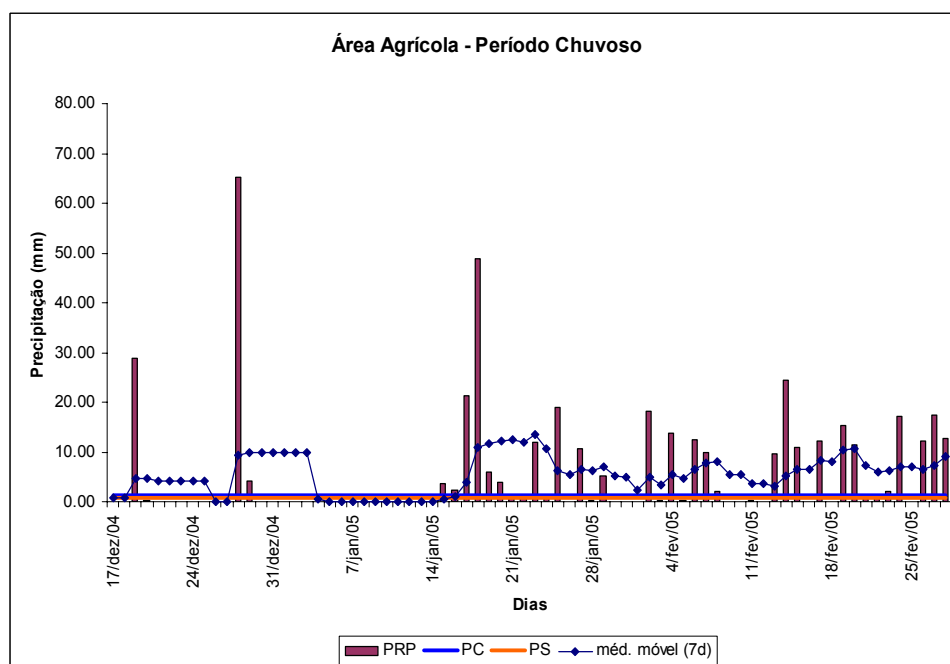


Figura 4.10 - Totais diários de precipitação, limites indicativos de período chuvoso e seco e média móvel de 7 dias para o sítio Área agrícola no período de 17/12 a 28/02/2005.

4.2 Teoria

4.2.1 Cálculo da Difusividade Térmica Aparente

Uma equação que descreve uma transferência de calor por condução em um meio unidimensional isotrópico é (HORTON e WIERENGA, 1983)

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.4)$$

onde T é a temperatura, t o tempo, z a profundidade, C a capacidade calorífica volumétrica, e λ é a condutividade térmica. Num solo com variação de umidade, C e λ dependem da profundidade e do tempo. Antes de escrever e resolver equações muito mais complicadas similares à eq. (4.4) para a água e calor, é preciso examinar o impacto dos contornos térmicos aproximados e mais exatos sobre o valor da difusividade térmica (λ/C) que é suposta ser constante. Considerando C e λ independentes da profundidade e do tempo, a equação 4.4 se torna:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (4.5)$$

onde α é a difusividade térmica aparente do solo.

4.2.1.1 Método da Amplitude

Com as condições de contorno

$$T(0,t) = \bar{T} + T_o \text{ sen } \omega t, \quad (4.6)$$

$$T(\infty,t) = \bar{T}, \quad (4.7)$$

A solução da equação 4.5 é (Jackson e Kirkham, 1958)

$$T(z,t) = \bar{T} + T_o \exp(-z\sqrt{\omega/2a}) \text{ sen}(\omega t - z\sqrt{\omega/2a}), \quad (4.8)$$

onde \bar{T} é a temperatura média do solo, assumida ser a mesma em todas as profundidades, T_o é a amplitude da onda da temperatura na superfície e ω a

freqüência radial ($2\pi/P$), sendo P o período do ciclo fundamental. A difusividade aparente do solo pode ser resolvida explicitamente a partir da equação 4.8 com a equação da amplitude

$$\alpha = \frac{\omega}{2} \left[\frac{z_2 - z_1}{\ln A_1 / A_2} \right]^2 \quad (4.9)$$

onde A_1 e A_2 são as amplitudes nas profundidades z_1 e z_2 , respectivamente.

4.2.1.2 Método da Fase

Se o intervalo de tempo entre ocorrências medidas da temperatura máxima do solo nas profundidades z_1 e z_2 é δt ($= t_2 - t_1$), a equação da fase originária da equação (4.8) é

$$\alpha = \frac{1}{2\omega} \left[\frac{z_2 - z_1}{\delta t} \right]^2. \quad (4.10)$$

4.2.2 Análise Harmônica das Séries Temporais de Temperatura do Solo

A análise harmônica consiste em decompor uma série temporal numa combinação linear de contribuições a partir de harmônicos (ou ondas) com cada harmônico definido por uma escala de tempo definida (figura 4.11). Neste caso, a série temporal original é considerada o domínio temporal enquanto que a análise harmônica pode ser usada para explicar as variações nessa série temporal no domínio da freqüência. O principal objetivo da análise harmônica é isolar as componentes periódicas dominantes que, atuando em conjunto, expliquem o comportamento do evento analisado (Assis et al, 1996).

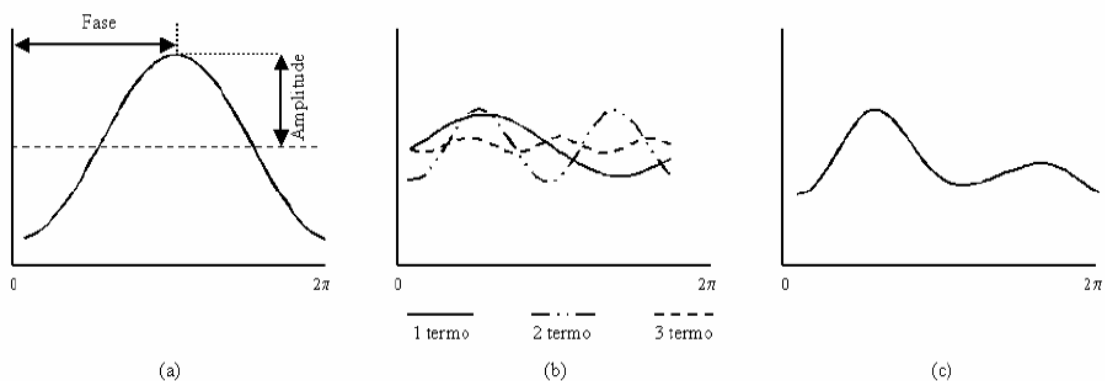


Figura 4.11 - (a) Curva de coseno representando o primeiro harmônico; (b) curvas para os primeiros três harmônicos; (c) curva resultante da somatória dos três harmônicos da Figura 4.11 (b). Fonte: Modificado de Jakubauskas et al. (2001, p. 462).

Este tipo de análise usa as funções trigonométricas seno e cosseno para definir os fenômenos periódicos, como na equação a seguir (ASSIS, 1996):

$$Y_t = P_0 + \sum_{k=1}^{n/2} \left[P_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + Q_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) \right] \quad (4.11)$$

Onde P_0 é a média (harmônico 0) e é usada para definir tendência linear com o tempo. A razão t/T é a fração do período fundamental que define o tempo de uma observação específica Y_t e a razão kt/T como o tempo da t -ésima observação relativa ao k -ésimo harmônico. Para uma análise qualquer, o harmônico ou onda de número $k=1$ indica que existe 1 máximo e 1 mínimo em todo o comprimento da série, denominado de harmônico fundamental. $k=2$ corresponde a 2 picos e 2 vales, $k=3$ corresponde a 3 picos e 3 vales, até $k=n/2$ corresponder a $n/2$ máximos e $n/2$ mínimos, conforme explicado por Horel (2006). Os termos P_k e Q_k são chamados de coeficientes de Fourier e de acordo com Panofsky e Brier (1968), são determinados pelas seguintes expressões:

$$P_k = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{t=N-1} \left[Y_t \cos \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) \right] \quad (4.12)$$

$$Q_k = \frac{2}{N} \sum_{t=0}^{t=N-1} \left[Y_t \sin \left(\frac{2\pi kt}{T} \right) \right] \quad (4.13)$$

$$a_k^2 = P_k^2 + Q_k^2 \quad (4.14)$$

Onde a_k é a amplitude do harmônico considerado. Se o número de dados da série de eventos é N , o número de harmônicos k é igual a $N/2$ quando é par e igual a $(N-1)/2$ quando é ímpar.

De acordo com as equações 4.12 e 4.13, a fase A_k pode ser deduzida da seguinte equação:

$$\tan A_k = \frac{P_k}{Q_k} \quad (4.15)$$

Por conseguinte,

$$A_k = \arctan \left(\frac{P_k}{Q_k} \right) \quad (4.16)$$

Se todos os harmônicos forem calculados e adicionados à média, o resultado é exatamente a série de dados original do evento analisado. Porém, nem sempre é necessária a determinação de todos os harmônicos porque, em geral, os primeiros explicam a maior proporção da variação total da série de dados analisados. Outra informação importante que pode ser obtida da análise harmônica é a fração da variância total causada por cada harmônico, obtida por:

$$\text{Var}_k = \frac{a_k^2}{2s^2} \quad (4.17)$$

Onde s^2 é a variância da série temporal estudada.

Ghuman e Lal (1982) realizaram estudo sobre o regime de temperatura sob diferentes condições de superfície com análise harmônica em uma área agrícola na Nigéria e concluíram que os primeiros dois harmônicos descreveram satisfatoriamente a temperatura do solo em 5 cm de profundidade; o primeiro harmônico foi suficiente para descrever a temperatura do solo em 35 cm de profundidade. Andrade e Abreu (2002) utilizaram a série de Fourier para estudar os ciclos diários e anuais nos perfis de temperatura em dois tipos de solo em Portugal e mostraram que o curso diário da temperatura do solo é bem descrito por dois harmônicos, e o curso anual é descrito somente pelo primeiro harmônico.

4.3 Instrumentos e Coleta dos Dados

As observações de campo representam médias registradas a cada 30 minutos e em 10 minutos devido ao experimento CiMELA (Circulações de Mesoescala na Amazônia) realizado em outubro de 2003. O sistema de registro e armazenamento dos dados CRTX-10 (Campbell Scientific, EUA) recebe e converte em planilha digital as medidas nas seguintes unidades: temperatura (°C), umidade do solo (conteúdo de água em m^3/m^3), fluxo de radiação solar incidente (W/m^2) e a precipitação (mm) integrada no mesmo intervalo de tempo.

4.3.1 Radiação Solar Incidente

O fluxo de radiação global incidente foi medido com um piranômetro SP-LITE, (Kipp & Zonen, Holanda), com erro de cerca de 10% para ângulos zenitais de incidência de até 80°.

4.3.2 Precipitação

A precipitação foi medida por pluviômetro de reservatório basculante CS700-L (Campbell Scientific Instruments, EUA) o qual tem resolução de 0,25 mm de precipitação e erro de 2%, para intensidades de chuva em torno de 100 mm/h. A figura 4.12 mostra imagens do conjunto de alguns sensores usados durante o projeto Milênio/LBA.

4.3.3 Temperatura do Solo

Para as medidas de temperatura do solo foram instalados sonda de termistores TEMP108 (Campbell, EUA) com erro máximo de $\pm 0,03$ °C, nas profundidades de 5, 20 e 50 cm em todos os sítios. Os valores de fluxo de calor no solo foram obtidos por fluxímetros HFP01 (Huksefluks, Holanda) instalados a 5 cm de profundidade em Igarapé-Açu e a 5 e 20 cm de profundidade em Caxiuanã e Soure.

4.3.4 Umidade do Solo

A umidade volumétrica do solo foi medida com sensores de Reflectometria no Domínio do Tempo – TDR CS 615 (Campbell, EUA) com precisão nominal especificada da medida em solo poroso e pouco argiloso, tem erro aproximadamente 2%. Os valores usados para a análise desta variável foram da profundidade de 30 cm, em todos os sítios.

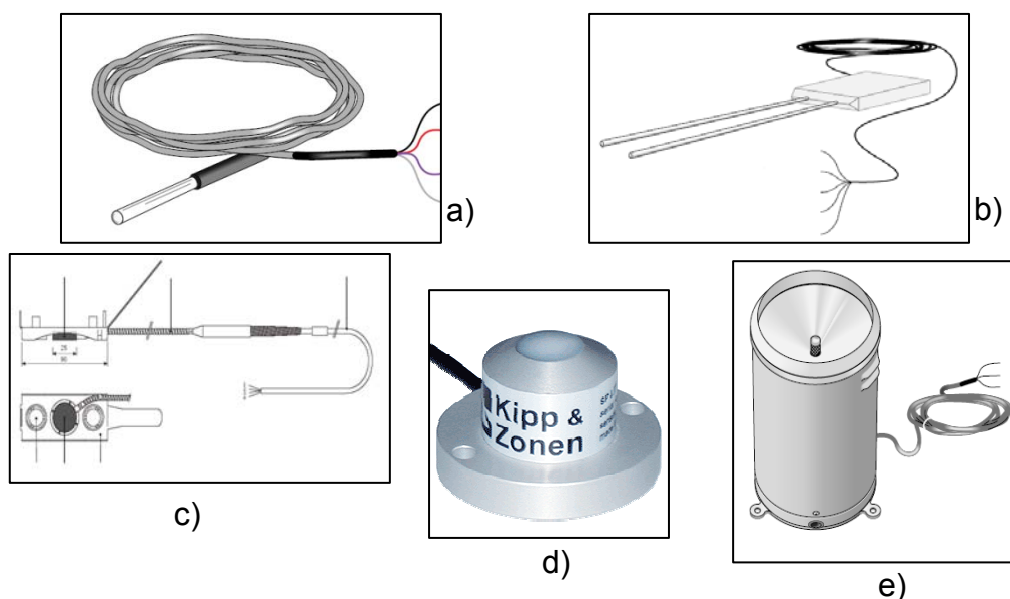


Figura 4.12 - Instrumentos utilizados durante o experimento: a) sonda de termistores; b) sensor TDR; c) fluxímetro; d) piranômetro e e) pluviômetro.

4.3.4.1 Medida da umidade do solo por TDR

A Reflectometria no Domínio do Tempo, mais conhecida como TDR (Time Domain Reflectometer), é um método relativamente novo introduzido por Fellner-Feldegg (1969) e se baseia no domínio que a alta constante dielétrica da água tem nessa propriedade, em relação aos outros constituintes dos solos. A constante dielétrica (ϵ) depende da natureza do material. Geralmente, considera-se que o valor de ϵ para o ar seco é 1. Para os constituintes minerais do solo, os valores variam de 3 a 7. Em contraste com estes valores, a constante dielétrica da água é aproximadamente 80 e faz do TDR um instrumento muito útil para o monitoramento da umidade do solo.

A obtenção da umidade volumétrica do solo por meio de reflectometria no domínio do tempo tem sido amplamente utilizada tanto em pesquisas de campo (SOUZA et. al., 2002) e na agricultura (JOAQUIM JUNIOR, 2003). Tal método é considerado o mais vantajoso por preencher a maioria das características desejáveis para o monitoramento de água no solo como:

- a) evitar amostragem destrutiva;
- b) permitir repetição no espaço e no tempo;

- c) permitir automação;
- d) promover a segurança do operador por dispensar o uso de radioatividade (como no uso da sonda de nêutrons);
- e) rapidez na obtenção dos resultados.

O custo de sensores é, no entanto, alto e por medir propriedades físicas do solo dependentes da umidade (método indireto), requer procedimentos de calibração para cada tipo de terreno. Segundo Tomaselli (2001), as variáveis que afetam a resposta dielétrica do solo além do conteúdo de água são: textura, estrutura, quantidade de sais solúveis, temperatura, densidade e frequência eletromagnética do sinal da sonda. Mesmo assim, a variável que mais afeta a resposta dielétrica do solo é o conteúdo de água contido no mesmo, com um peso relativo de 93%.

O sensor de TDR emite um pulso na frequência de microondas (1 a 20 GHz). Neste caso, o tempo de trânsito do pulso é da ordem de décimos de segundo e a leitura é efetuada aproximadamente a cada milésimo de segundo. Para leituras dessa ordem de grandeza, um circuito elétrico adequado é necessário para mostrar ao usuário dados convertidos em umidade de solo através de ajustes correlacionais (CRESTANA et. al. 1996, apud GOMIDE, 2001).

Para a medida da umidade utiliza-se um testador de cabo, que mede variações no tempo de propagação de um trem de pulsos, provocadas por descontinuidades na sonda. A descontinuidade do sinal do pulso transmitido é causada pela mudança de valor da constante dielétrica no sistema solo-água. O testador de cabos então lê o tempo de propagação da onda (figura 4.13). A equação que relaciona o tempo com a constante dielétrica (ϵ) é a seguinte (JOAQUIM JUNIOR, 2003):

$$\epsilon = \frac{ct}{2L} \quad (4.18)$$

onde c é a velocidade da luz, t é o tempo de propagação, lido com o TDR e L é o comprimento da haste da sonda. Se o a quantidade da água aumenta, a velocidade de propagação diminui devido à demora da polarização das moléculas de água. Para a obtenção dos valores da umidade do solo com maior precisão, é importante conhecer a curva de calibração do solo, que relaciona a constante dielétrica e a umidade volumétrica.

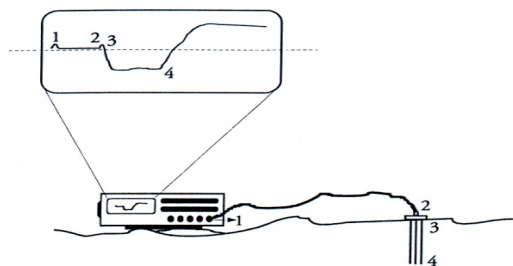


Figura 4.13 - Representação esquemática do processo de medida com o sistema TDR Adaptado de Joaquim Junior (2003).

4.3.4.1.2 Calibração

Tendo em vista os fatores inerentes ao solo que podem afetar a leitura do sensor TDR (TOMASELLI, 2001; JOAQUIM JUNIOR, 2003), é válido aferi-lo de acordo com as condições de umidade do solo obtidos pelo método gravimétrico, por ser uma medida direta da umidade do solo. A razão entre o valor registrado pelo TDR e o valor obtido pelo método gravimétrico resulta no valor que determina a precisão do aparelho em relação às condições reais da umidade do solo. Alvalá et al. (2002) utilizaram esse procedimento para comparar valores de umidade do solo obtidos de um sensor FDR (Frequency Domain Reflectometer) e método gravimétrico em um sítio de pastagem e floresta no Estado de Rondônia. Como é mostrado na Tabela 4.2, os valores da razão TDR/Gravimétrico se aproximam de 1, confirmando uma apreciável precisão alcançada pelo sensor.

Tabela 4.2: Razão da umidade Volumétrica do solo na camada de 0-30 cm determinada pelos métodos TDR e Gravimétrico.

Método	Umidade Volumétrica do solo ($m^3.m^{-3}$)	
	Floresta	Área Agrícola*
Gravimétrico	0,554	0,484
TDR	0,509	0,395
TDR/Gravim.	0,9	0,8

*Experimento realizado em área de Plantio de Soja localizada em Paragominas-PA

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente convém mencionar que o conjunto de dados analisados apresenta algumas lacunas de informação devido a paralisações na coleta de dados, especialmente no que tange a temperatura e umidade do solo sob a floresta de Caxiuanã. Vale ainda frisar que o início da leitura das variáveis em estudo localizado no sítio de Igarapé-Açu começou no mês de agosto de 2003.

5.1 Radiação Solar Incidente

A radiação solar, principal elemento que desencadeia todo o processo meteorológico que afeta todos os elementos do tempo, dentre os quais se incluem as temperaturas e fluxos de calor no solo, tiveram valores próximos se comparados entre os sítios. Na análise dessa variável, deve se notar a variação significativa da amplitude da radiação solar incidente média durante o período chuvoso devido, principalmente, à constante presença de nebulosidade.

Como observado na figura 5.1, o comportamento da radiação solar incidente na floresta seguiu um padrão relativamente estável no período seco, com um valor médio diário de $418,3 W.m^{-2}$. No período chuvoso, o sinal dessa variável oscila consideravelmente e reduz a radiação incidente média em $100 W.m^{-2}$ comparado ao período chuvoso, sugerindo forte presença da

nebulosidade nesse local (Figura 5.2). Como visto na análise de períodos secos e chuvosos, a floresta de Caxiuanã possui um regime de precipitação bastante homogêneo em relação aos sítios estudados, evidenciando o grande potencial da vegetação de grande porte em manter o ciclo hidrológico bem dinâmico independente das variações sazonais.

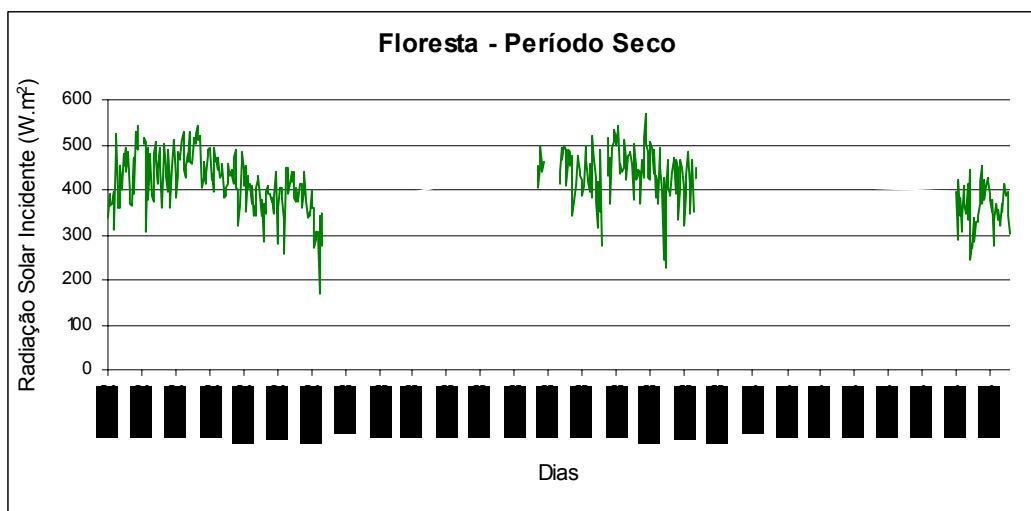


Figura 5.1 – Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Floresta durante o período seco.

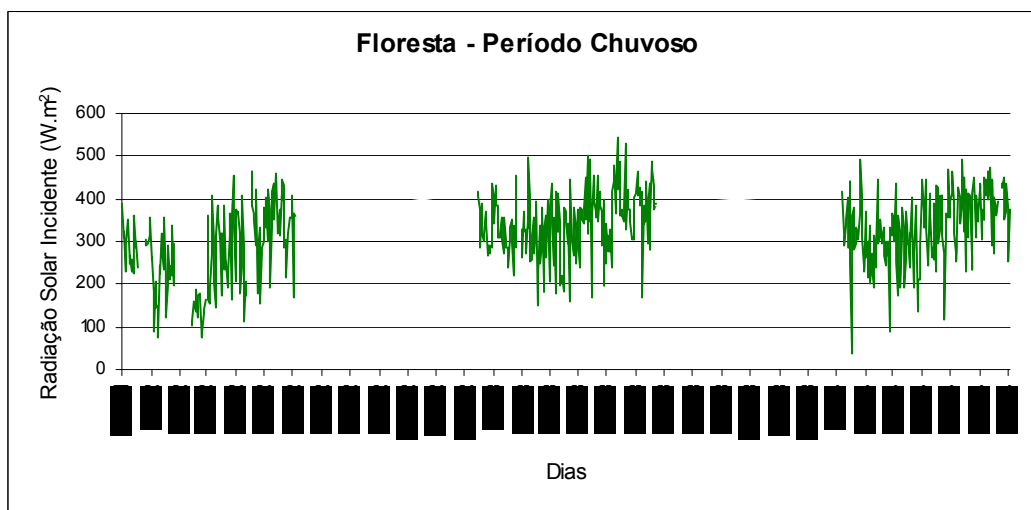


Figura 5.2 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Floresta durante o período chuvoso.

Na pastagem, os valores de radiação solar incidente no período seco seguiram-se com estabilidade como na floresta, com média de $465,7 \text{ W.m}^{-2}$,

com eventuais quedas no sinal diário devido à ocorrência de precipitações de natureza convectiva muito comuns na região (Figura 5.3). O período chuvoso é marcado por flutuações elevadas de radiação solar e valor médio de radiação solar de 365 W.m^{-2} . Neste período é notável a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que se instala no litoral norte e nordeste do estado do Pará no trimestre janeiro-fevereiro-março, ocasionando dias de muita nebulosidade e valores elevados de precipitação (figura 5.6).

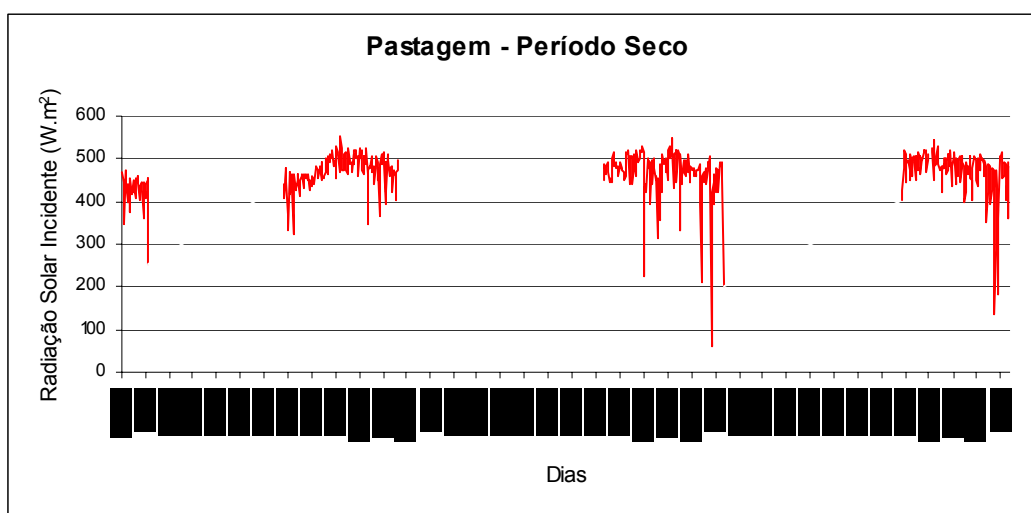


Figura 5.3 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Pastagem durante o período seco.

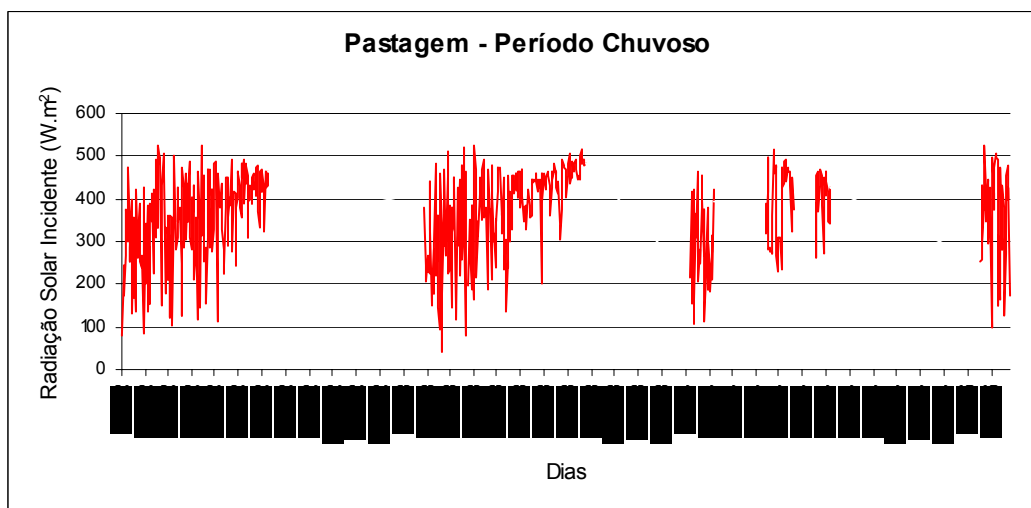


Figura 5.4 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Pastagem durante o período chuvoso.

Na área destinada ao cultivo agrícola (figuras 5.5 e 5.6), é observado um padrão de radiação solar incidente aproximadamente similar ao observado na pastagem, devido a curta distância que separa o município de Igarapé-Açu do litoral paraense (~65 km). No período seco, os valores observados foram de 350 W.m^{-2} diários com alguns valores reduzidos em decorrência de chuvas convectivas nessa região (figura 5.5). No período chuvoso é observada a flutuação da radiação devido à presença da ZCIT e uma redução da média para 150 W.m^{-2} por dia (figura 5.6).

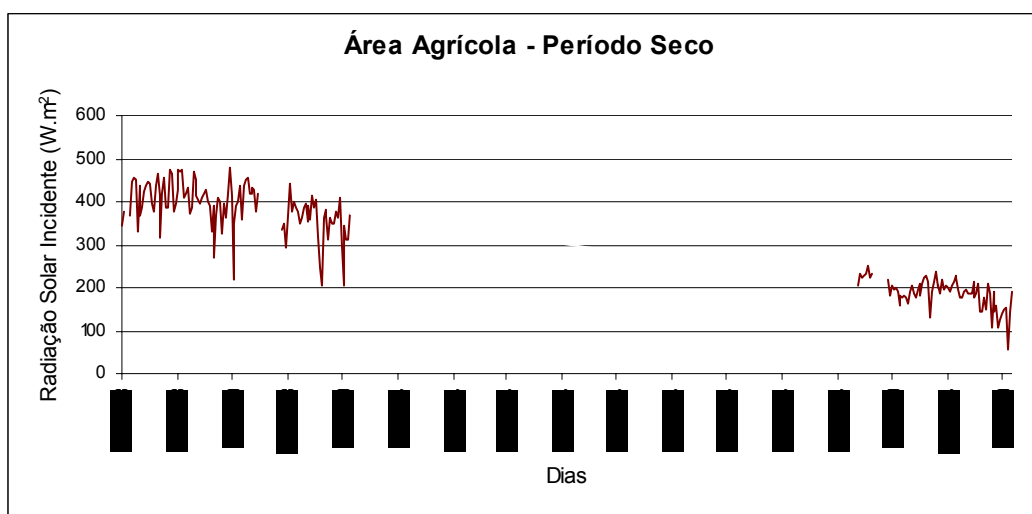


Figura 5.5 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Área Agrícola durante o período seco.

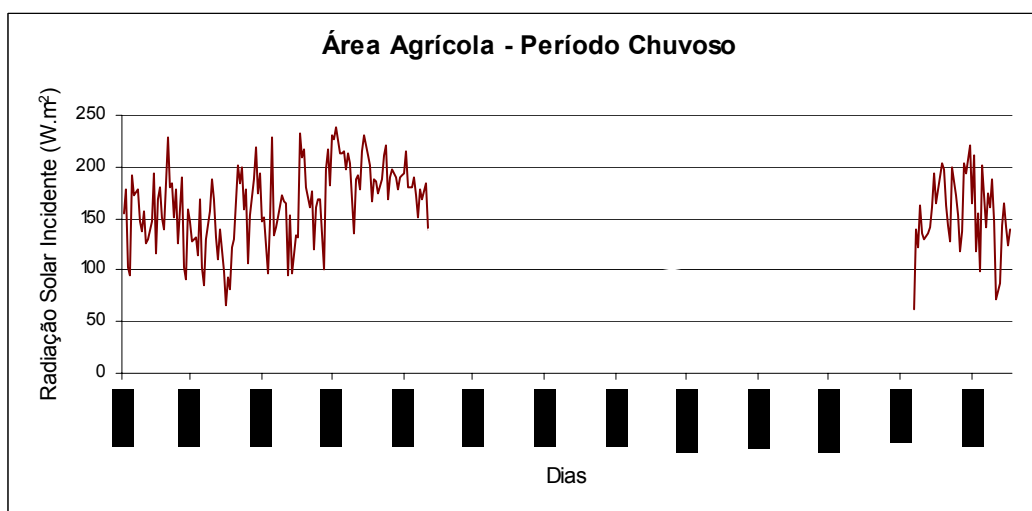


Figura 5.6 - Variação diária média do fluxo de radiação solar incidente no sítio Área Agrícola durante o período chuvoso.

A figura 5.7 mostra o ciclo diário da radiação solar incidente sobre os sítios estudados. Observa-se uma pequena defasagem de aproximadamente 30 minutos entre os máximos diários dos fluxos de radiação registrados, devido às localizações geográficas dos sítios em direção a oeste, na seguinte ordem: Área Agrícola , Pastagem e Floresta.

O sítio Pastagem, com um máximo de 747 W.m^{-2} às 13:00 h local, apresentou os maiores valores de radiação incidente em relação à Área Agrícola, com 625 W.m^{-2} às 12:00 h local e Floresta, 616 W.m^{-2} às 13:00 h local. Os valores elevados de radiação solar incidente na pastagem podem ser explicados pelo baixo índice de nebulosidade sobre esse local, enquanto que na Floresta os altos valores de umidade na atmosfera favorecem a formação de nuvens em várias horas do dia. No sítio Área Agrícola, o sistema local de circulação de brisa marítima torna propícia a formação de nuvens à partir da costa paraense, afetando a configuração da radiação incidente nesse local.

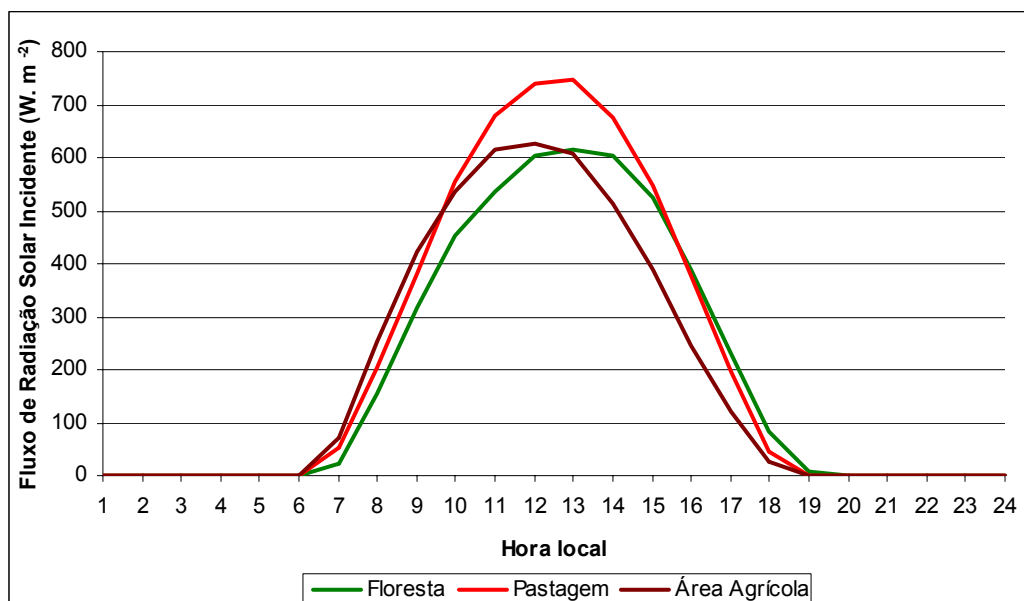


Figura 5.7 - Evolução diurna do fluxo de radiação solar incidente nos sítios estudados.

5.2 Regime Térmico do Solo

Numa breve avaliação da temperatura no solo nos ecossistemas estudados, pôde ser constatado que essa variável possui um comportamento

bastante distinto, sobretudo quando se compara o sítio floresta em relação à pastagem. Deste modo, o sítio com considerável cobertura vegetal, como Caxiuanã, apresentou menor variação diurna das temperaturas do que os sítios Soure e Igarapé-Açu, que ostentam uma vegetação menos vigorosa. Outro fator de controle das temperaturas é a variabilidade sazonal da precipitação, devido ao movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Como pode ser visto na Tabela 5.1, a quantidade de cobertura vegetal exerce influência nas magnitudes médias mensais das temperaturas do solo, com a atenuação dos desvios-padrão (DP) das temperaturas dos solos. Para comparação pode-se citar as temperaturas médias em 5 cm de profundidade na seqüência de diminuição da cobertura vegetal, a saber: 25,3 °C (floresta), 28,9 °C (área agrícola) e 30,2 °C (pastagem). Deste modo, os sítios com cobertura vegetal de grande porte como Caxiuanã apresentaram valores médios de temperatura menores do que os sítios de Soure e Igarapé-Açu, que ostentam uma vegetação de gramíneas e leguminosas, respectivamente. Outro fator de controle das temperaturas é a variabilidade sazonal da precipitação, devido ao movimento latitudinal Norte-Sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Na floresta, a profundidade de 50 cm esteve mais aquecida de janeiro a novembro em relação às camadas imediatamente superiores, e alcançou um máximo de 25,6 °C em novembro, enquanto a temperatura mínima foi de 24,8 °C na camada de 20 cm em fevereiro. No trimestre Set-Out-Nov a temperatura em 5 cm apresentou valores aproximados aos da camada de 50 cm. A temperatura em 20 cm acompanhou a curva da camada de 5 cm com valores menores. A floresta apresentou a menor variabilidade em relação aos três sítios, com desvios-padrão de 0,25 °C (5 cm), 0,24 °C (20 cm) e 0,18 °C (50 cm).

No sítio localizado na pastagem, a camada de 5 cm apresentou temperaturas mais elevadas em relação às profundidades de 20 e 50 cm, em torno de 33,7 °C, no mês de novembro (figura 5.9). A temperatura mínima foi de 27,9 °C em 20 cm no mês de fevereiro. A pastagem foi o sítio que teve a

maior variabilidade da onda de temperatura, com desvios-padrão de 1,97 °C (5 cm), 1,90 °C (20 cm) e 1,73 °C (50 cm).

Apresentando um comportamento variável das temperaturas do solo nas 3 camadas ao longo do ano, as camadas mais profundas em Igarapé-Açu foram em média mais aquecidas que à superfície. A temperatura máxima foi de 32,2 °C na profundidade de 20 cm no mês de novembro e a temperatura mínima foi de 26,5 °C em 5 cm de profundidade no mês de março. Os desvios-padrão registrados foram de 1,71 °C (5 cm), 1,46 °C (20 cm) e 1,41 °C (50 cm).

Tabela 5.1 - Valores mensais de temperatura dos solos em 5, 20, e 50 cm de profundidade para os sítios Caxiuanã, Soure e Igarapé-Açu no período de dezembro de 2001 a fevereiro de 2005.

Temperatura do solo (°C)									
Mês	Floresta Caxiuanã			Área Agrícola Igarapé-Açu			Pastagem Soure		
	5cm	20cm	50cm	5cm	20cm	50cm	5cm	20cm	50cm
Jan	25,41	25,44	25,49	28,50	29,21	29,39	29,09	29,16	29,91
Fev	24,87	24,81	25,05	27,90	29,01	28,61	28,11	27,94	28,45
Mar	24,88	24,86	25,10	26,51	27,53	27,40	28,65	28,43	28,76
Abr	25,18	25,17	25,35	26,68	27,73	27,48	28,85	28,55	28,86
Mai	25,45	25,42	25,53	28,42	29,36	28,90	29,14	28,80	29,05
Jun	25,18	25,19	25,39	27,42	28,47	28,33	29,21	28,94	29,21
Jul	25,24	25,20	25,35	27,32	28,26	28,11	29,15	28,88	29,18
Ago	25,40	25,37	25,43	29,68	29,32	29,51	29,68	29,32	29,51
Set	25,51	25,48	25,55	29,56	29,85	29,69	31,15	30,67	30,62
Out	25,55	25,49	25,57	30,94	31,14	31,04	33,24	32,74	32,57
Nov	25,56	25,50	25,59	31,62	32,15	31,46	33,70	33,24	33,19
Dez	25,64	25,45	25,54	30,68	31,41	31,29	32,83	32,71	32,93
Máxima	25,64	25,50	25,59	31,62	32,15	31,46	33,70	33,24	33,19
Mínima	24,87	24,81	25,05	26,51	27,53	27,40	28,11	27,94	28,45
DP	0,25	0,24	0,18	1,71	1,46	1,41	1,97	1,90	1,73

Na figura 5.8 são mostrados os valores de temperatura do solo nas 3 camadas (5, 20 e 50 cm) no sítio floresta. A camada de 50 cm esteve mais aquecida de janeiro a novembro, alcançando um máximo de 25,6 °C em novembro, mostrando que o fluxo de calor se dirige das camadas mais profundas para as mais superficiais. Em dezembro, a temperatura em 5 cm se torna mais alta que as demais, o que garante a entrada de calor para as camadas mais profundas durante este período. A amplitude térmica em torno

de 0,6 °C mostrou que, além da contribuição da intensa cobertura vegetal, a distribuição quase homogênea de chuvas no sítio da floresta atuou como uma barreira da entrada do fluxo de radiação solar incidente, além da própria cobertura das copas das árvores.

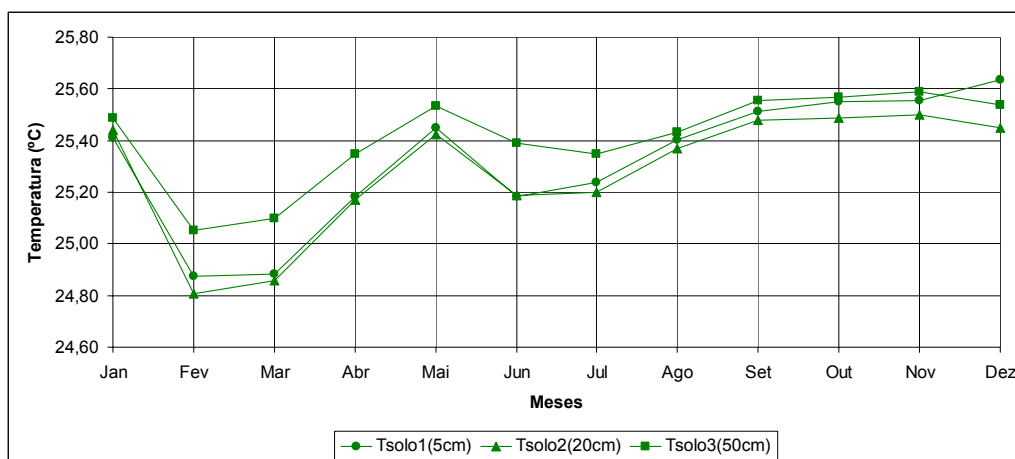


Figura 5.8 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na Floresta.

O sítio localizado em Soure mostrou uma boa relação entre variabilidade sazonal da precipitação e temperaturas do solo (Fig. 5.9), com elevadas amplitudes sazonais. A pouca cobertura vegetal no local ocasiona um aumento na temperatura do solo nas camadas estudadas. No período chuvoso local, que compreende os meses de dezembro a junho, a temperatura na camada mais profunda fica elevada devido à precipitação que resfria as camadas superiores do solo. A partir de julho até novembro, a situação se inverte com a temperatura em 5 cm, de 33,5 °C, mais quente em relação às temperaturas de 20 e 50 cm, fazendo o fluxo térmico dirigir-se para as camadas mais profundas.

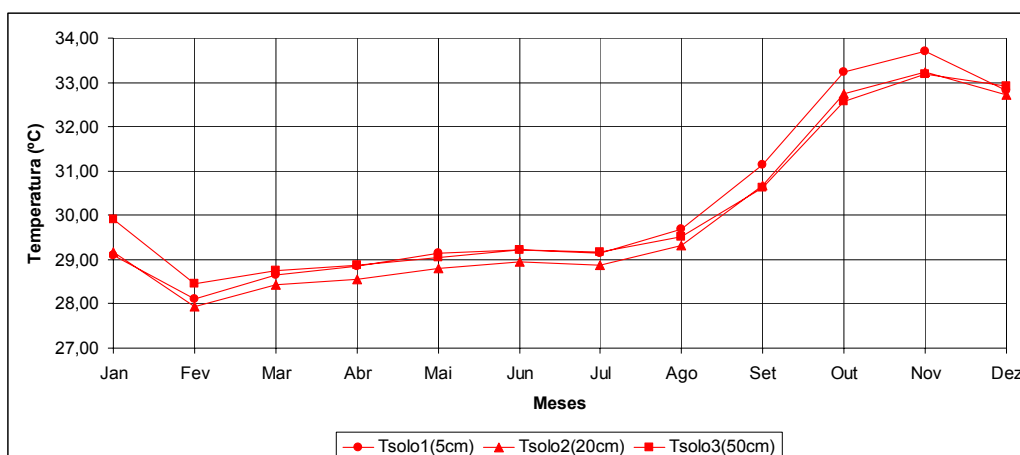


Figura 5.9 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na Pastagem.

Nas médias mensais de temperatura do solo no sítio área agrícola (figura 5.10), pôde ser observado que as temperaturas nas profundidades de 20 e 50 cm foram mais altas em relação do que na profundidade de 5 cm nos meses de dezembro a julho. Nos meses de agosto a novembro, as temperaturas nas 3 profundidades foram aproximadamente similares e mais elevadas em relação às temperaturas observadas durante o período chuvoso. Esse comportamento mostra que a camada rasa conserva o calor nas profundidades de 20 e 50 cm durante o período chuvoso.

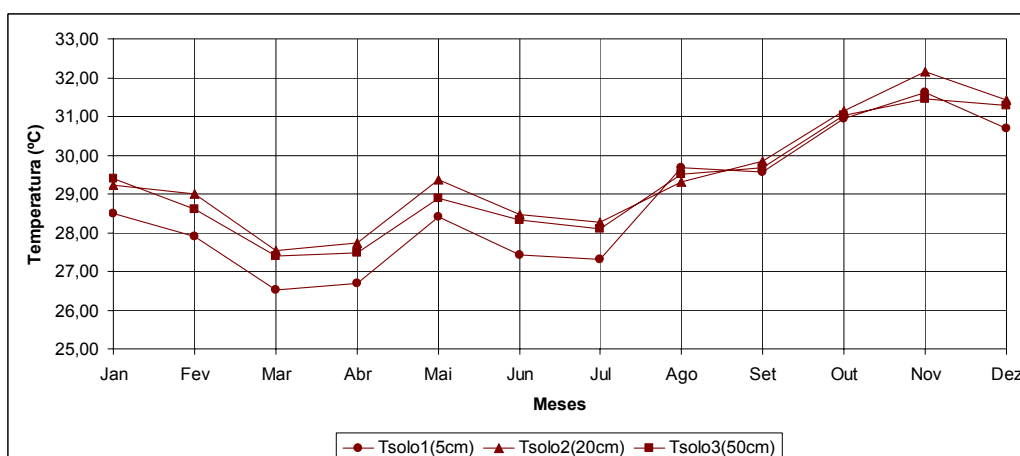


Figura 5.10 - Média Mensal das Temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm na área de cultivo agrícola.

Os regimes mensais de temperatura do solo nos sítios do leste da Amazônia mostraram comportamentos bem distintos entre si. Comportamento

parecido também foi encontrado por Souza et al. (2002) para situações de floresta e pastagem abrangendo aproximadamente 5 anos de dados.

O que se observa nas figuras 5.8, 5.9, e 5.10 é que, no ciclo sazonal, os solos sob floresta, pastagem e área agrícola armazenam valor em profundidades a partir de 20 cm durante o período chuvoso. No período seco, as temperaturas do solo na profundidade de 5 cm foi mais alta do que as temperaturas em 20 e 50 cm na pastagem. Esse comportamento justifica a entrada de calor no solo e não é tão visível no sítio floresta, devido este possuir uma distribuição pluviométrica homogênea mesmo no período seco. No caso da área agrícola, ainda faltam suficientes para visualizar este comportamento.

5.2.1 Variação Diurna da Temperatura do Solo

As figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram o comportamento diário das temperaturas do solo em 5, 20 e 50 cm nos três sítios estudados, separados sazonalmente em período seco e chuvoso e todo o período, que representa o comportamento médio das series temporais. Nas três figuras pode-se notar a defasagem entre os máximos (ou mínimos) das ondas de temperatura, indicando a propagação diária de calor tanto para cima quanto para baixo, dependendo da hora.

As temperaturas do solo na floresta mostram que, no período seco, as temperaturas dos solos nas profundidades de 20 e 50 cm foram mais altas do que a temperatura em 5 cm durante a noite e nas primeiras horas da tarde (de 01:00 h até às 13:00 h local), sendo notado o sentido negativo do fluxo de calor no solo das camadas mais profundas para as mais superficiais, e a camada superficial representada pela temperatura em 5 cm de profundidade ficou aquecida nas horas seguintes depois da temperatura máxima em 5 cm de 26 °C ocorrida às 18:00 h, sendo observado o sentido positivo do fluxo térmico. Da camada de 5 cm para 20 cm foi registrado uma defasagem entre os máximos

de temperatura do solo de 3 horas e desta última para 50 cm, foi observado aproximadamente 7 horas de atraso entre os máximos da temperatura do solo.

As amplitudes das ondas de temperatura em 5, 20 e 50 cm, mostradas na tabela 5.2, foram de 0,5 °C, 0,17 °C e 0,02 °C, respectivamente. A presença de dois picos de temperatura em 50 cm durante o período seco sugere que esta camada conserva resíduos de calor de dois dias e provavelmente seja justificada pela alta difusividade térmica aparente encontrada na camada 20-50 cm (tabela 5.6).

No período chuvoso, a temperatura em 50 cm foi maior que a temperatura em 20 cm durante todo o ciclo de 24 horas. Isto indica perda de calor do solo para a atmosfera. Ademais, há uma convergência de calor na camada 20-50 cm durante 7 horas do dia a partir de 01:00 h local, duas a mais do que no período seco. As amplitudes foram ligeiramente menores do que no período seco, 0,45 °C em 5 cm, 0,16 °C em 20 cm e em 50 cm foi observado um aumento de 0,05 °C. Embora a precipitação se eleve, não houve uma diminuição significativa da temperatura dos solos em relação ao período menos chuvoso (seco).

As baixas temperaturas do solo observadas na floresta com relação aos demais sítios significam que a copa das árvores absorve a maior parte da radiação solar incidente, funcionando como uma primeira superfície, o que deixa o solo em grande parte sombreado.

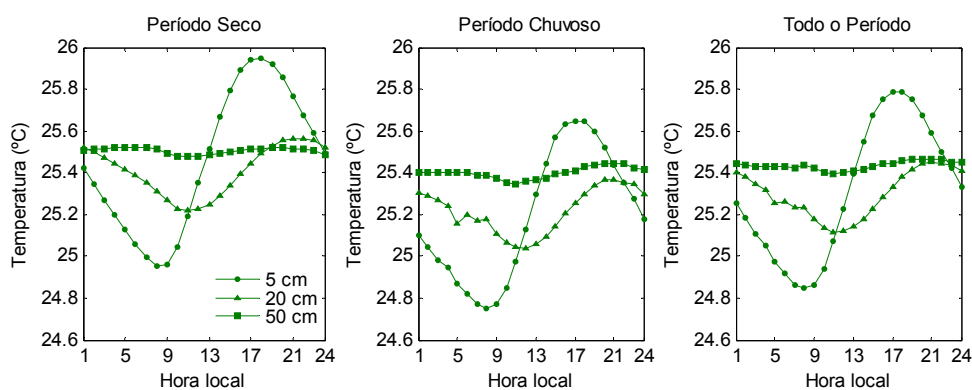


Figura 5.11 – Temperaturas médias horárias do solo no sítio Floresta nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

Na pastagem, também se observa no período seco o sentido negativo do fluxo de calor no solo durante a madrugada e parte (01:00 h até 09:00 h local) e a inversão deste a partir do horário da temperatura máxima de 35,5 °C em 5 cm às 16:00 h, duas horas a menos em relação à floresta. O atraso entre os máximos de temperatura do solo em 5 cm e em 20 cm, como na floresta, também foi de 3 horas e de 20 para 50 cm, a defasagem foi de 6 horas.

O regime de chuvas fez com que as temperaturas ficassem abaixo de 31 °C, porém, as defasagens entre as camadas permaneceram as mesmas em relação ao período seco. Analisando as amplitudes e os desvios-padrão nos períodos seco e chuvoso (tabelas 5.2 e 5.3), há uma diminuição desses parâmetros no período chuvoso de uma maneira geral, que segundo Hillel (2004), é esperado para solos com pouca cobertura vegetal.

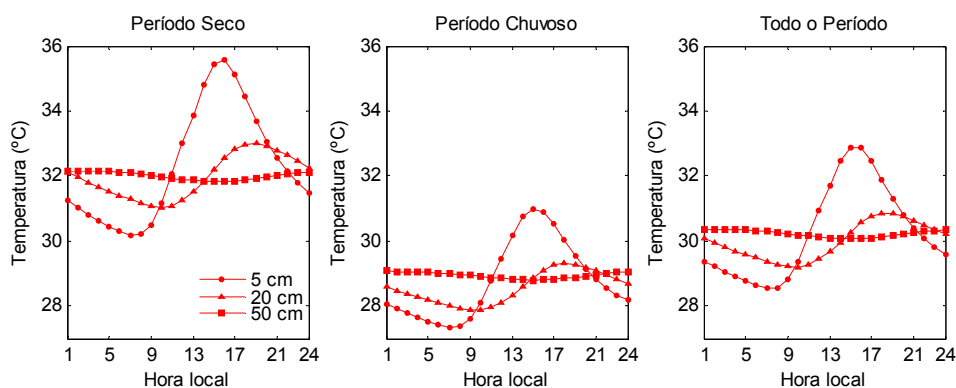


Figura 5.12 – Temperaturas médias horárias do solo no sítio Pastagem nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

A variação diurna verificada na área agrícola (figura 5.13) teve um comportamento similar ao da pastagem, porém, bastante diferente nos sentidos dos fluxos de calor. Durante a noite e madrugada, as temperaturas em 20 e 50 cm caracterizaram uma convergência do fluxo térmico verificada pelas temperaturas do solo em 20 cm e em 50 cm mais altas que no nível de 5 cm, e somente após a temperatura máxima de 33,4 °C às 15:00 h pôde ser observado o sentido do fluxo de calor da superfície para as camadas mais profundas que durou 3 horas, tanto no período seco, quanto no período

chuvoso. Vale ressaltar que no período seco, essa penetração de calor se deu de forma mais intensa.

No período chuvoso, além da diminuição significativa das temperaturas do solo, o comportamento de convergência do fluxo térmico em 20 cm e em 50 cm durante a noite e madrugada, ainda persiste devido as elevadas temperaturas encontradas em 20 cm e em 50 cm em relação à temperatura de 5 cm. Os valores de desvio-padrão e amplitude (tabelas 5.2 e 5.3) mostraram que, assim como na pastagem, tendem a diminuir no período chuvoso.

Como mostrado nas figuras 5.10 5.11 e 5.12, a entrada de calor no solo é melhor identificada no ciclo diário. Durante o dia, a temperatura do solo em 5 cm é maior que em 20 cm e 50 cm, na pastagem e área agrícola, confirmando o modelo do ciclo diário da temperatura do solo mostrado na figura 2.5, porém, essa generalização não se aplica para a floresta.

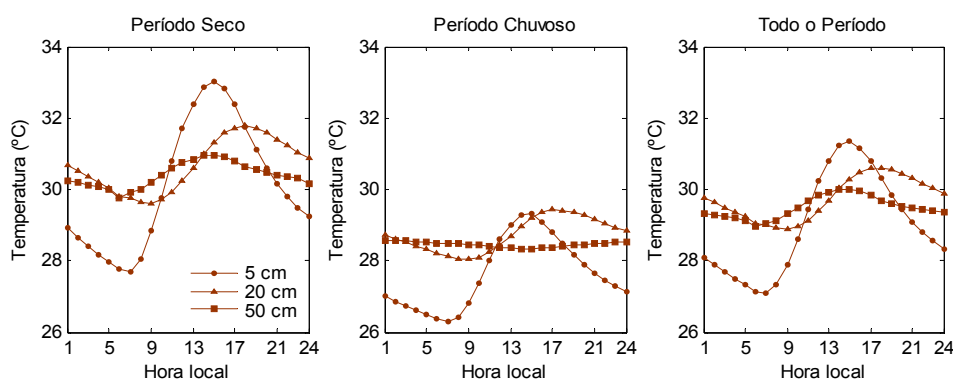


Figura 5.13 – Temperaturas médias horárias do solo no sítio Área Agrícola nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

A Figura 5.14 mostra a evolução diária da temperatura do solo em 5 cm de profundidade durante o período seco, a qual apresenta maior flutuação. A pastagem e a área de cultivo agrícola mostraram as maiores amplitudes. A temperatura mínima ocorreu às 7:00 h local nos dois sítios e a temperatura máxima foi registrada às 15:00 h em Igarapé-Açu e uma hora depois em Soure. A floresta mostrou amplitude menor que 1°C. A temperatura mínima registrada foi na floresta, de 24,8 °C às 8:00 h.

Comparando as temperaturas do solo a 5 cm de profundidade entre os sítios no período seco (julho a novembro), onde existe uma maior flutuação da onda de temperatura e que, é mostrado na figura 5.11 que os sítios de Soure, com temperatura média do solo de $32,3 \pm 2,7$ °C e Igarapé-Açu, com $30,1 \pm 2,67$ °C possuem a maior variação de temperatura na camada mais rasa em relação ao sítio de Caxiuanã, que teve o valor diário de temperatura do solo de $25,32 \pm 0,5$ °C. Por isso, a maior entrada de fluxo de calor para as camadas mais profundas do solo ocorrerá naturalmente nos sítios onde há pouca vegetação.

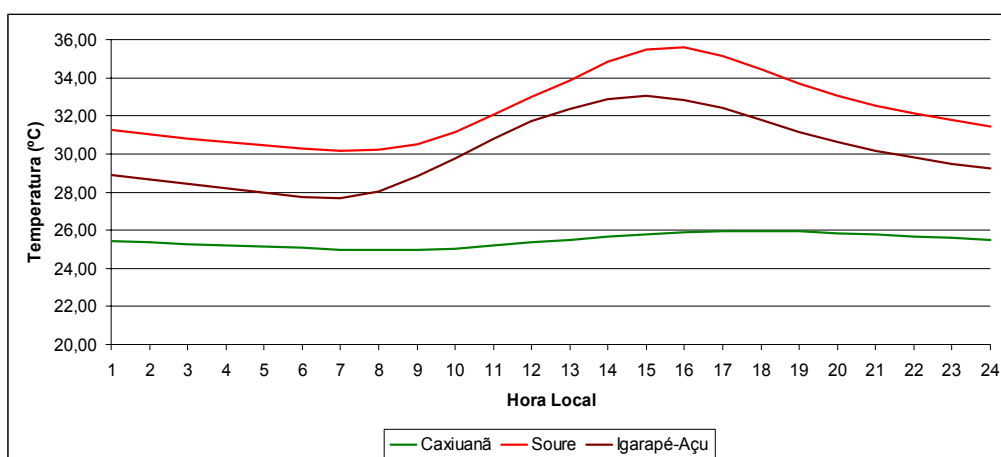


Figura 5.14 - Média horária da temperatura do solo na camada de 5 cm nos 3 sítios – Período Seco.

No período chuvoso (dezembro a junho), a precipitação atenua a onda de temperatura em todos os sítios, ocasionando a diminuição dessa variável em até 4 °C tanto em Soure como em Igarapé-Açu (figura 5.15). No entanto, a amplitude de variação desses locais ainda é maior que na floresta. Em Caxiuanã a amplitude entre período seco e chuvoso não é significativa, mostrando uma mínima variação diurna nesses sítios.

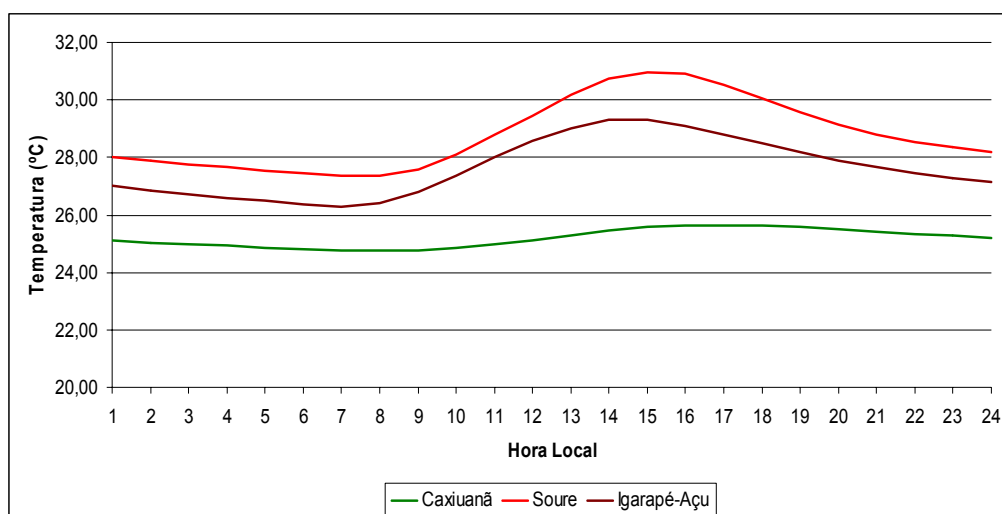


Figura 5.15 - Média horária da temperatura do solo na camada de 5 cm nos 3 sítios – Período Chuvoso.

Tabela 5.2 – Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola – período seco.

	Floresta			Pastagem			Área Agrícola		
	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm
máximo	25,95	25,56	25,52	35,57	33,00	32,15	33,04	31,77	30,95
média	25,46	25,41	25,51	32,32	31,97	32,01	30,11	30,68	30,40
mínimo	24,95	25,22	25,48	30,16	31,02	31,84	27,71	29,62	29,74
desvio-padrão	0,34	0,12	0,02	1,80	0,68	0,12	1,80	0,74	0,35
amplitude	0,50	0,17	0,02	2,70	0,99	0,16	2,67	1,08	0,60

Tabela 5.3 – Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola – período chuvoso.

	Floresta			Pastagem			Área Agrícola		
	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm
máximo	25,65	25,36	25,44	30,97	29,31	29,07	29,33	29,42	28,56
média	25,19	25,22	25,40	28,79	28,55	28,94	27,63	28,73	28,46
mínimo	24,75	25,04	25,35	27,35	27,89	28,79	26,30	28,03	28,34
desvio-padrão	0,31	0,11	0,03	1,22	0,49	0,10	1,01	0,48	0,07
amplitude	0,45	0,16	0,05	1,81	0,71	0,14	1,52	0,69	0,11

Tabela 5.4 – Estatística diária da temperatura do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola – todo o período estudado.

	Floresta			Pastagem			Área Agrícola		
	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm	5 cm	10 cm	50 cm
máximo	25,79	25,45	25,47	32,87	30,85	30,36	31,34	30,60	30,00
média	25,31	25,30	25,44	30,27	29,99	30,23	29,00	29,75	29,50
mínimo	24,85	25,12	25,40	28,53	29,20	30,08	27,10	28,90	28,95
desvio-padrão	0,33	0,11	0,02	1,46	0,57	0,11	1,42	0,59	0,31
amplitude	0,47	0,17	0,04	2,17	0,82	0,14	2,12	0,85	0,53

5.2.2 Análise Harmônica da Temperatura do Solo

As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 mostram as temperaturas dos solos em cada nível bem como seus respectivos harmônicos obtidos a partir da equação 4.10. A escala dos gráficos foi ajustada de forma a evidenciar os formatos das ondas, embora apresentar amplitudes muito baixas como no caso das temperaturas dos solos sob a floresta. A linha tracejada preta mostra o primeiro harmônico e a linha contínua representa a soma dos quatro primeiros harmônicos, que geralmente são suficientes para representar os valores observados da temperatura do solo no ciclo diário, como pode ser visto no estudo de Andrade e Abreu (2002). Para os três sítios, a soma dos quatro primeiros harmônicos foi suficiente para descrever as temperaturas do solo com bastante precisão. Os coeficientes de determinação (R^2) entre os valores de temperaturas dos solos observados e a soma dos 4 primeiros harmônicos para cada sítio estudado mostraram valores que variaram de 0,9351 a 1, mostrando uma considerável concordância entre os valores observados e os valores calculados.

Tabela 5.5 – Coeficientes de determinação (R^2) entre a temperatura do solo observada e a soma dos 4 primeiros harmônicos nos sítios floresta, pastagem e área agrícola.

Sítios	Período Seco			Período Chuvoso			Todo o Período		
	5 cm	20 cm	50 cm	5 cm	20 cm	50 cm	5 cm	20 cm	50 cm
Floresta	0,9998	0,999	0,9351	0,9997	0,9871	0,9832	0,9999	0,9958	0,976
Pastagem	0,9995	0,9998	0,9989	0,9998	1	0,9996	0,9997	1	0,9998
Área Agrícola	0,9998	0,9996	0,9989	0,9997	0,9999	0,9987	0,9999	0,9995	0,9954

Na Floresta (figura 5.16), o primeiro harmônico descreveu as temperaturas do solo com uma pequena defasagem nas profundidades 5 e 20 cm nos períodos seco, chuvoso e durante o período estudado. Porém, no nível de 50 cm, não foi suficiente estabelecer uma descrição adequada somente com o harmônico fundamental devido à grande flutuação de temperatura ocorrida nessa profundidade, ainda que em pequena amplitude.

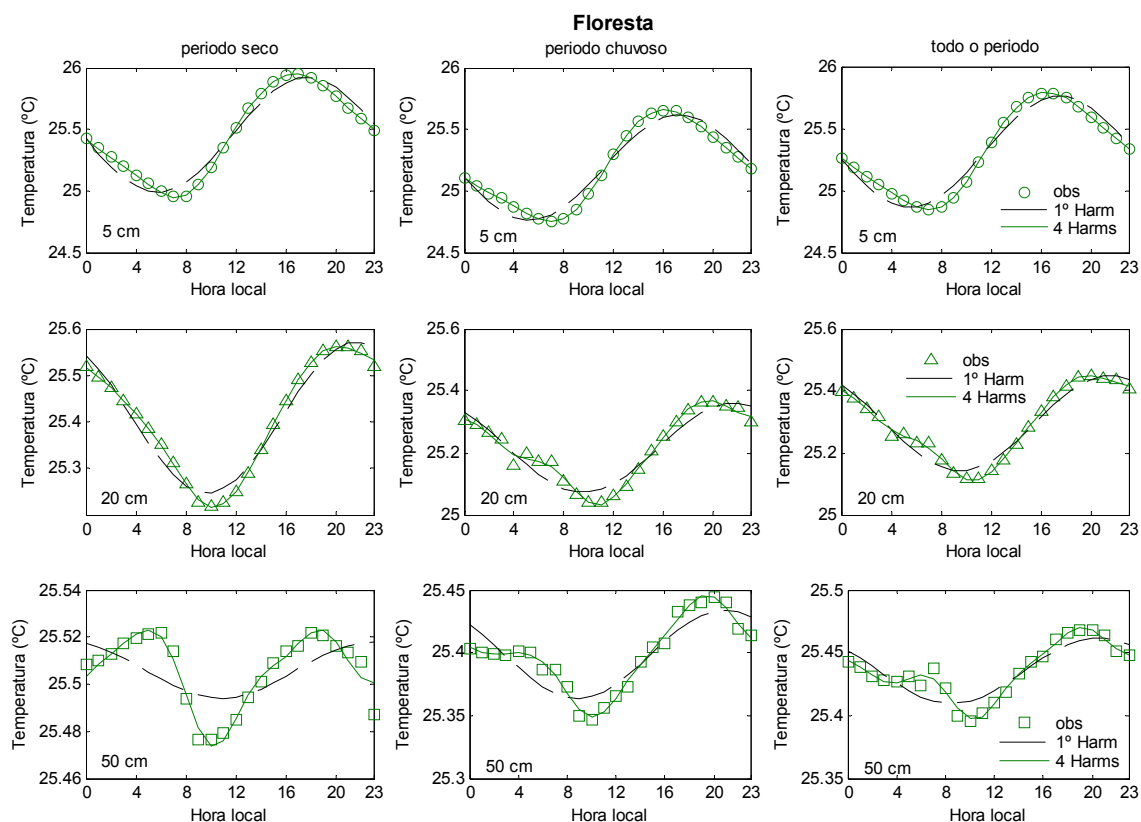


Figura 5.16 – Evolução diária das temperaturas do solo na floresta em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos.

Na pastagem (Figura 5.17), o primeiro harmônico ajustou-se razoavelmente à onda da temperatura no solo na profundidade de 5 cm nos três períodos devido à alta amplitude encontrada nesse sítio. Com o amortecimento natural da temperatura com a amplitude, os ajustes feitos com o primeiro e a soma dos 4 primeiros harmônicos foram suficientes para descrever a temperatura, sobretudo na profundidade de 50 cm, onde tanto o primeiro harmônico como a soma dos 4 primeiros harmônicos pode descrever a temperatura nesse nível de profundidade.

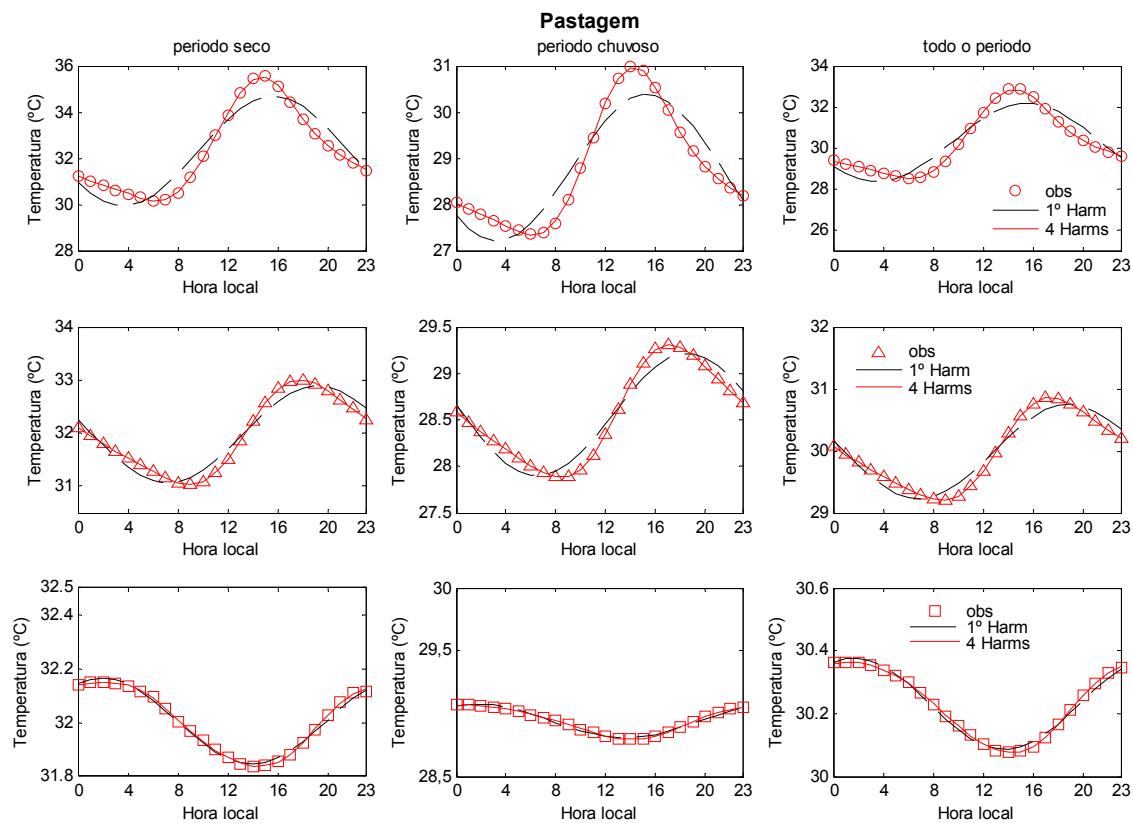


Figura 5.17 – Evolução diária das temperaturas do solo na pastagem em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos.

Na área agrícola, o primeiro harmônico descreveu aproximadamente as ondas de temperatura em 5 cm e em 20 cm, assim como na pastagem (Figura 5.18), mas uma melhor aproximação foi encontrada em 50 cm nas três situações: seco, chuvoso e todo o período.

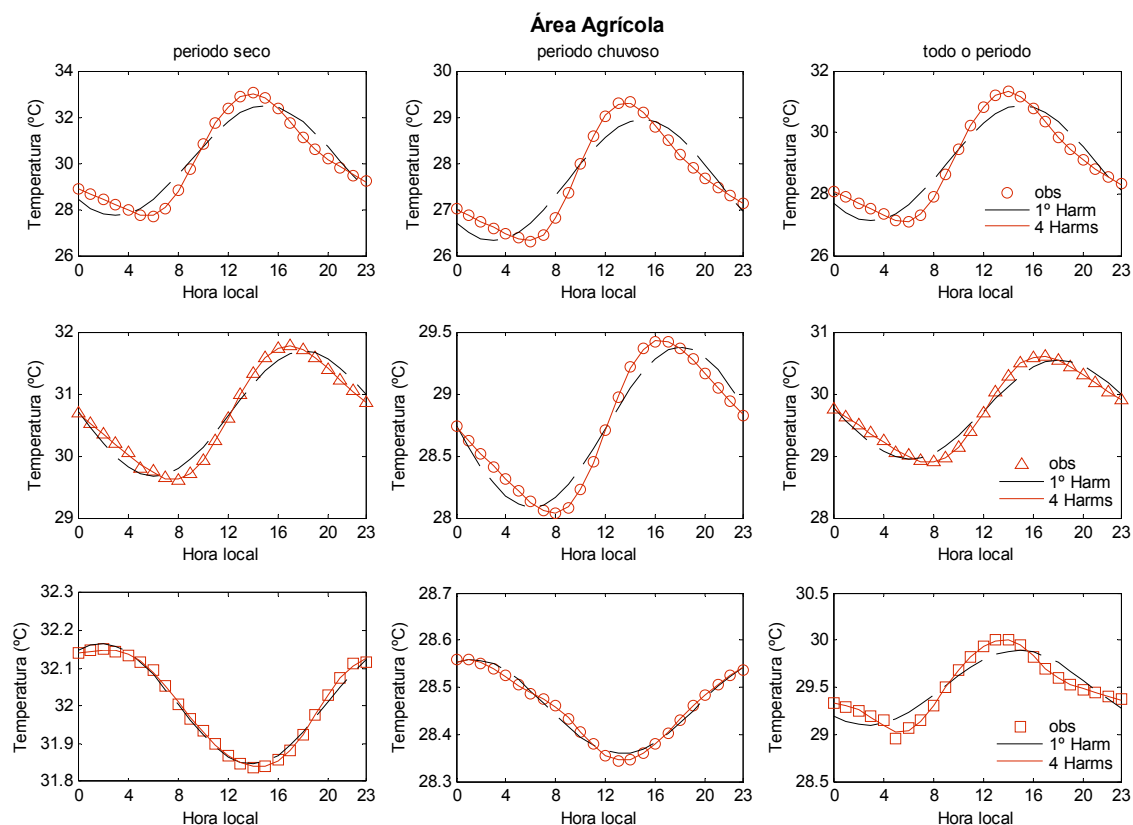


Figura 5.18 – Evolução diária das temperaturas do solo na área agrícola em 5, 20 e 50 cm nos períodos seco, chuvoso e todo o período e seus respectivos harmônicos.

5.3 Fluxo de Calor no Solo

De uma forma geral, os fluxos de calor sob os solos da floresta, pastagem e da área agrícola não apresentaram variações sazonais de grande amplitude. Porém, apresentaram maiores variações, quando comparados com vegetação e sem vegetação. Conseqüentemente, pode-se obter mais informações importantes sobre o processo de desmatamento.

Na floresta, os fluxos de calor no solo em 5 cm e em 20 cm foram aproximadamente iguais ao longo do dia (figura 5.19), exceto no período chuvoso, onde se pode observar um distanciamento entre os fluxos durante à tarde. É mostrado também que os maiores valores de fluxo de calor foram observados no período chuvoso, de aproximadamente $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ às 14:00 h, enquanto que no período seco, o valor máximo foi de $9,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

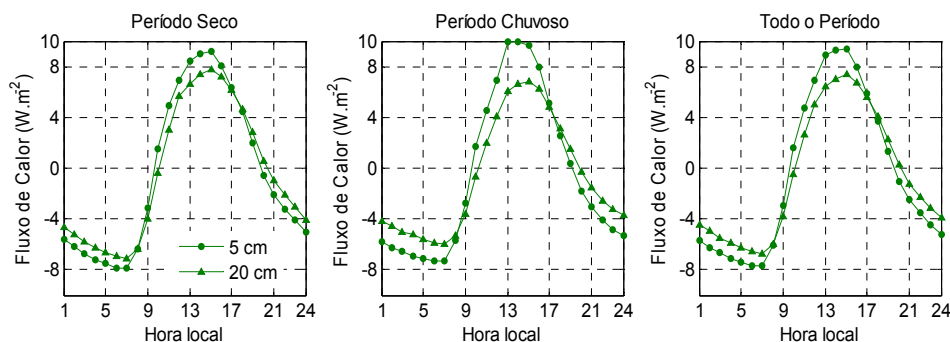


Figura 5.19 – Evolução diária do fluxo de calor no solo na floresta nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

Na pastagem, a amplitude dos fluxos de calor não sofreu diferenças muito significativas entre os períodos seco e chuvoso (figura 5.20). A defasagem entre os máximos foi diferente no período seco e chuvoso, sendo 3 horas no primeiro e 2 horas no segundo. Este fato mostra que o alto calor específico da água proveniente da precipitação faz com que o calor se propague com mais eficiência. Outro fato relevante é o valor do fluxo de calor no solo da pastagem atingir um máximo 54 W.m^{-2} no período seco, 6 vezes maior em relação à floresta. Contudo, as perdas térmicas alcançam até -20 W.m^{-2} durante a noite.

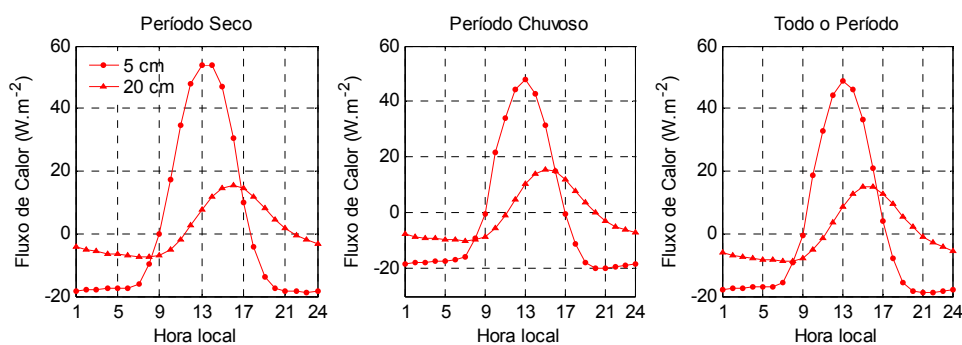


Figura 5.20 – Evolução diária do fluxo de calor no solo na pastagem nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

Apesar da ausência de dados do fluxo de calor medido na área agrícola em 20 cm (figura 5.21), a variação diurna é similar ao da pastagem, embora a diferença do valor máximo entre o período seco e chuvoso na pastagem seja maior do que na área agrícola. O máximo do fluxo de calor no

período seco, de 50 W.m^{-2} , foi observado às 13:00 h e no período chuvoso ocorreu uma diminuição de cerca de 10 W.m^{-2} .

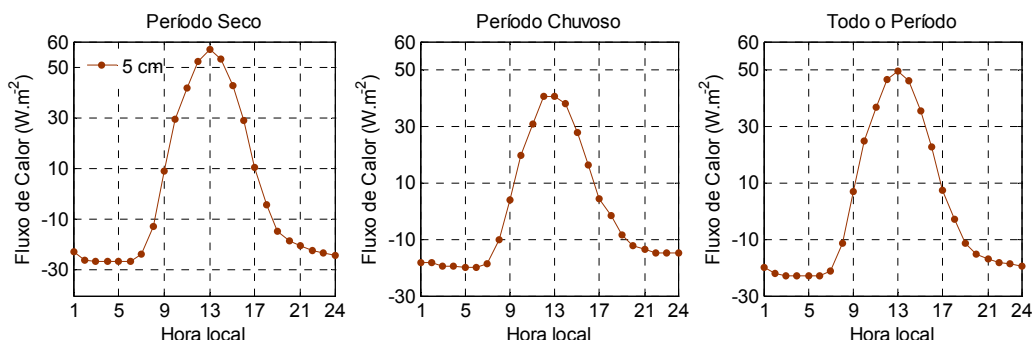


Figura 5.21 – Evolução diária do fluxo de calor no solo na área agrícola nos períodos seco, chuvoso e todo o período.

5.4 Difusividade Térmica Aparente do solo (α)

Os valores de difusividade térmica aparente, obtidos pelo método da amplitude (equação 4.8) e pelo método da fase (equação 4.9), foram bastante diferentes (Tabela 5.6). Nos sítios floresta e área agrícola as difusividades encontradas pelo método da amplitude na camada 5-20 cm foram menores que as encontradas pelo método da fase, e na camada 20-50 cm ocorreu o contrário. No entanto, os valores de difusividade térmica aparente calculados pelo método da amplitude foram compatíveis com os valores obtidos por Souza et al., (2006), Alvalá et al., (2002) e Antonino et al., (1997), isto é, as difusividades térmicas aparentes foram menores nas camadas superiores e maiores nas camadas inferiores. Ainda considerando o método da amplitude, é observado que a pastagem e a área agrícola possuem valores maiores de difusividade térmica em relação à floresta na camada de 5-20 cm tanto no período seco quanto no chuvoso, com uma média sazonal global de $0,87 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na pastagem, $0,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na área agrícola e $0,76 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na floresta. Na camada 20-50 cm, os maiores valores de difusividade foram encontrados na floresta, com um valor médio de difusividade de $3,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $3,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ da pastagem durante todo o período analisado. Esses resultados confirmam o fato que a difusividade térmica aparente é altamente heterogênea ao longo do perfil de solo devido principalmente à presença de

água, que aumenta a capacidade calorífica e a condutividade térmica do solo, diretamente associados à difusividade térmica.

Tabela 5.6 – Difusividades térmicas aparentes do solo nos sítios Floresta, Pastagem e Área de cultivo agrícola segundo os métodos da amplitude e da fase.

		Difusividades Térmicas Aparentes ($\times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)					
		Período Seco		Período Chuvoso		Todo o Período	
Camadas		Amp	Fase	Amp	Fase	Amp	Fase
Floresta	5-20 cm	0,72	1,32	0,79	1,32	0,76	0,75
	20-50 cm	2,70	0,19	4,50	0,02	3,60	0,48
Pastagem	5-20 cm	0,81	0,75	0,93	1,30	0,87	3,00
	20-50 cm	3,00	0,97	3,30	0,24	3,10	1,90
Área Agrícola	5-20 cm	1,00	1,30	1,30	3,00	0,98	1,30
	20-50 cm	9,40	0,11	2,90	0,19	6,15	0,12

5.5 Regime Hídrico do solo

Nas figuras 5.22, 5.23 e 5.24 são mostrados as médias mensais, máximos e mínimos da umidade volumétrica do solo na profundidade de 30 cm nos sítios Floresta, Pastagem e Área Agrícola no período de dezembro de 2001 a fevereiro de 2005. O conteúdo de umidade do solo possui uma relação direta com a precipitação, com uma pequena defasagem entre a ocorrência desta e o umedecimento da camada do solo medida pelo reflectômetro.

De fevereiro até junho, a umidade do solo na Floresta ficou em torno de $0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, como é mostrado na figura 5.22. A partir de julho até novembro, registrou-se um valor mínimo médio de $0,32 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

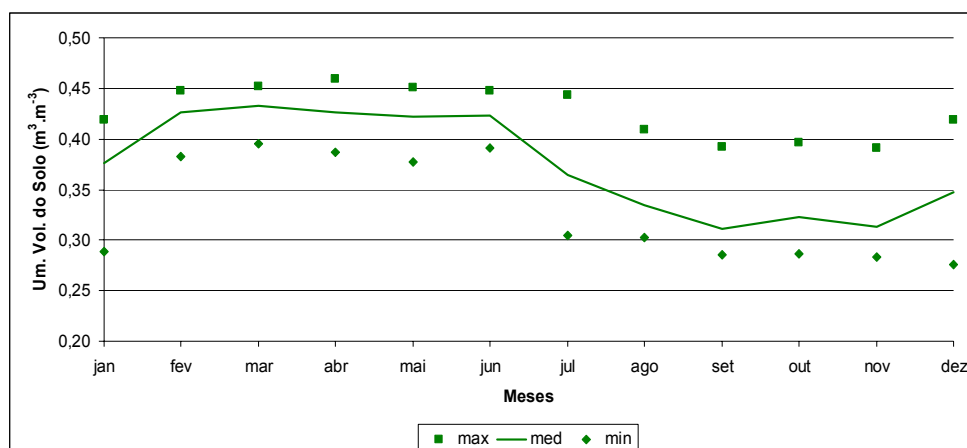


Figura 5.22 – Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na Floresta.

Na Pastagem (figura 5.23), o conteúdo de umidade do solo ficou em torno de $0,24 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ até o mês de maio, quando diminuiu gradativamente e atingiu $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ nos meses de setembro a novembro. Nesse período ocorre a estiagem nessa região, ocasionando secamento total do capim devido ao ponto de murcha, como indicado em Souza et al., (2002).

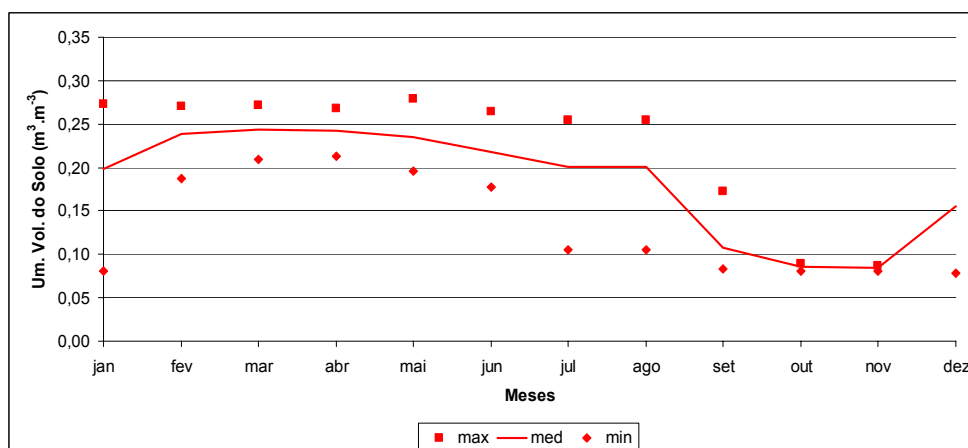


Figura 5.23 – Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na Pastagem.

Em Igarapé-Açu (figura 5.24), no período chuvoso a umidade volumétrica do solo sempre esteve acima de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, alcançando valores de até $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Após agosto essa variável diminuiu até chegar aproximadamente $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em novembro, portanto, o dobro da umidade observado na Pastagem.

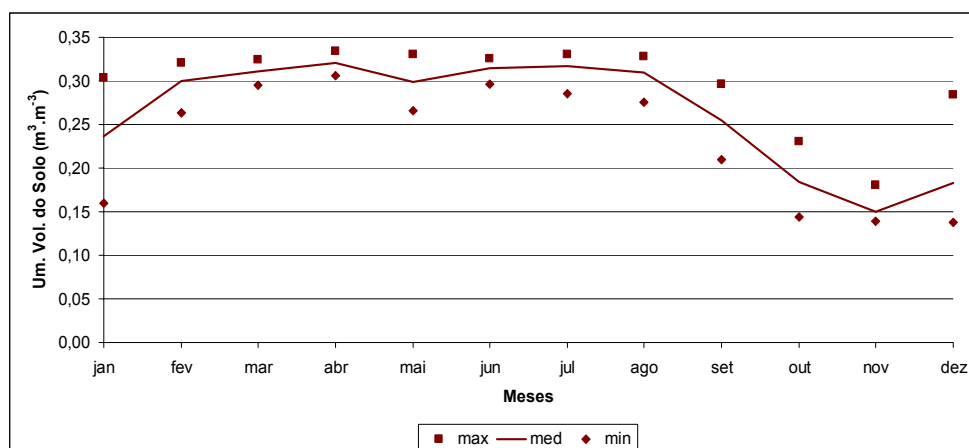


Figura 5.24 – Média, máxima e mínima da umidade volumétrica do solo na área agrícola.

5.5.1 Padrões Sazonais

Na Figura 5.25 é mostrado o comportamento médio diário da umidade volumétrica do solo durante a transição e no período seco no ano de 2002, em intervalos semanais. O sítio da floresta registrou valores três vezes maiores que o sítio da pastagem durante o estio. Pode-se também notar que a flutuação da umidade é muito mais expressiva na floresta. Os valores de umidade na pastagem mantiveram-se praticamente estáveis durante todo o período seco.

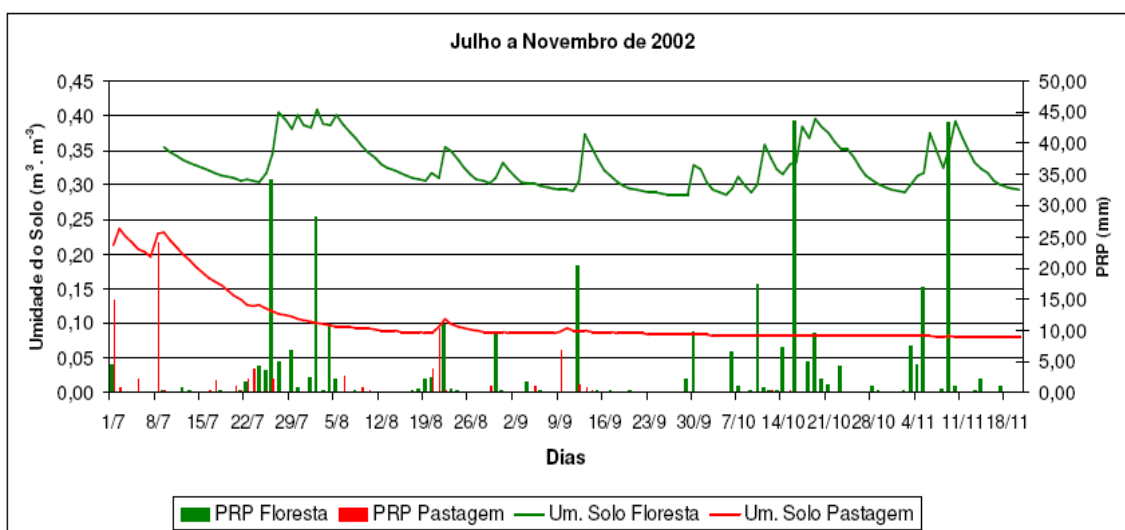


Figura 5.25 – Médias diárias da umidade volumétrica dos solos na camada de 30 cm abaixo da superfície sob floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure) e totais diários de precipitação. Comportamentos na estação de transição e no período seco de 2002. Fonte: Souza et al. 2006

No período chuvoso (Figura 5.25), a diferença de conteúdo de umidade no solo diminuiu entre os dois sítios. Ainda em relação umidade do solo, observa-se que nos dois sítios a variabilidade dentro do período chuvoso é significativa. No entanto, como confirmado na tabela 5.6, a maior flutuação foi encontrada na pastagem.

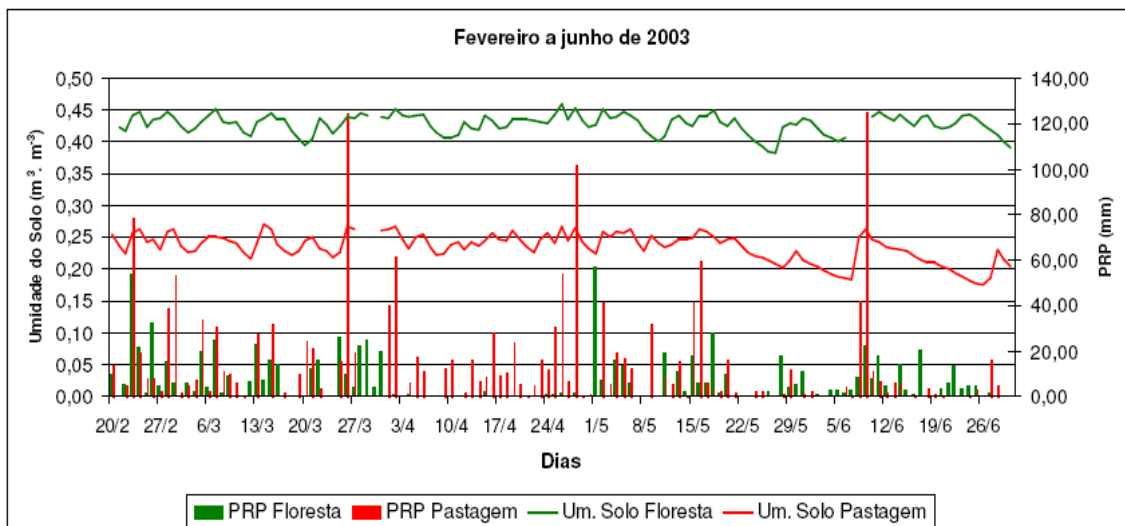


Figura 5.26 – Médias diárias da umidade volumétrica dos solos na camada de 30 cm abaixo da superfície sob floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure) e totais diários de precipitação no período chuvoso de 2003. Fonte: Souza et al. 2006

Na Figura 5.26 encontra-se a média mensal das umidades dos solos e a precipitação total correspondente de cada mês na floresta e na pastagem dentro do período estudado. Na floresta e na pastagem, os meses mais chuvosos se concentram nos meses de janeiro a março, sendo que na pastagem os valores de precipitação são maiores em relação à floresta. Ao longo dos outros meses, o total de precipitação na pastagem decai até não haver ocorrência de chuva significativa nos meses mais secos, de agosto a novembro. No entanto, na floresta o regime de chuvas foi sempre bem distribuído ao longo dos meses.

Os comportamentos médios mensais da umidade do solo na floresta e pastagem são bem distintos. Na pastagem, os maiores valores de umidade do solo ocorreram na época dos máximos de precipitação. Assim que iniciou a estiagem, a umidade do solo diminuiu até a faixa de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Na floresta, a

ocorrência de chuvas em todos os meses permitiu uma suavização no comportamento da umidade do solo, com valores de até $0,42 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ nos meses chuvosos. No período seco, a umidade do solo da floresta teve valores mínimos, superiores a $0,30 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$.

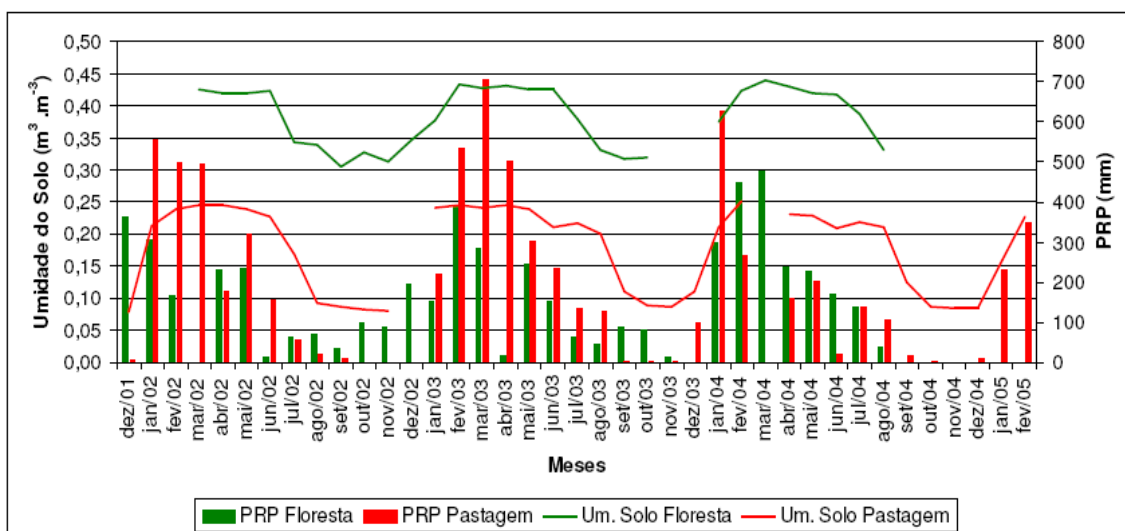


Figura 5.27 – Médias mensais das umidades dos solos e precipitação na Floresta e Pastagem no período experimental (01/12/2001 a 28/02/2005). Fonte: Souza et al. 2006.

Na Tabela 5.7 são apresentados os valores máximos, médios, mínimos e os desvios padrão da umidade volumétrica do solo na floresta e na pastagem durante o período seco no ano de 2002 e no período chuvoso do ano seguinte. Os valores máximos de umidade do solo registrados na floresta foram $0,396 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ no período seco e $0,459 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ no período chuvoso. Os valores mínimos encontrados na pastagem no período seco e chuvoso foram respectivamente $0,081 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $0,177 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Pode-se observar ainda que, em termos de variabilidade sazonal, o desvio-padrão da umidade do solo foi alto na floresta durante o período seco, em torno de $0,027 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ e $0,004 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na pastagem. Durante o período chuvoso esta situação se inverte, sendo observado $0,022 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na pastagem e apenas $0,015 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ na floresta. A cobertura vegetal de alto porte, bem como a porosidade no solo da floresta, permitem um armazenamento hídrico mais eficaz neste ecossistema quando comparado à pastagem, cujo solo é arenoso e a vegetação é de pequeno porte.

Tabela 5.7 – Valores Sazonais da Umidade dos Solos nos sítios de floresta (Caxiuanã) e pastagem (Soure).

Umidade Volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Período Seco (11/08/2002) - 20/11/2002)		Período Chuvoso (20/02/2003 - 30/06/2003)	
	Floresta	Pastagem	Floresta	Pastagem
Máxima	0,396	0,106	0,459	0,272
Média	0,318	0,085	0,428	0,235
Mínima	0,285	0,081	0,383	0,177
DP	0,027	0,004	0,015	0,022

5.5.2 Estudos de Casos de Variações Diárias e Horárias

A amostragem dos sensores TDR em intervalos de 30 minutos na Pastagem e na Floresta propiciou uma boa visualização na variabilidade diurna da umidade do solo. Um evento de chuva na pastagem de 10 mm no dia 21/08/2002, entre 15:00 h e 19:00 h local, propiciou uma recarga de água no solo no dia seguinte de $0,024 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Figura 5.28). Nos dias subsequentes, a evaporação da água no solo foi observada durante a intensa insolação do dia e quase cessou à noite, formando vários degraus de acordo com a disponibilidade de água. Pode ser notado na tabela 5.7 que a diferença de umidade decresce quase linearmente. Depois do dia 27/08, foram observados valores de água no solo abaixo de $0,09 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, sendo esta água considerada fortemente retida pelas partículas e indisponível para evaporação. Deve-se ressaltar que a umidade do solo registrada pelo sensor nunca vai a zero devido este detectar a água de capilaridade, água higroscópica e água de cristalização.

Tabela 5.8 – Médias diárias de Umidade Volumétrica do solo, Precipitação e diferença da Umidade do solo observada na pastagem no período de 21 a 31/08/2002. Os valores em negrito representam os valores máximos das variáveis.

Agosto/2002 Dias	Umidade do Solo ($m^3.m^{-3}$)	Precipitação (mm)	Varição de umidade
21	0,096	10,10	
22	0,106	0,30	
23	0,100	0,00	-0,006
24	0,095	0,00	-0,005
25	0,093	0,00	-0,003
26	0,091	0,00	-0,002
27	0,089	0,00	-0,001
28	0,088	0,00	-0,001
29	0,088	1,00	-0,001
30	0,088	0,00	0,000
31	0,088	0,00	0,000

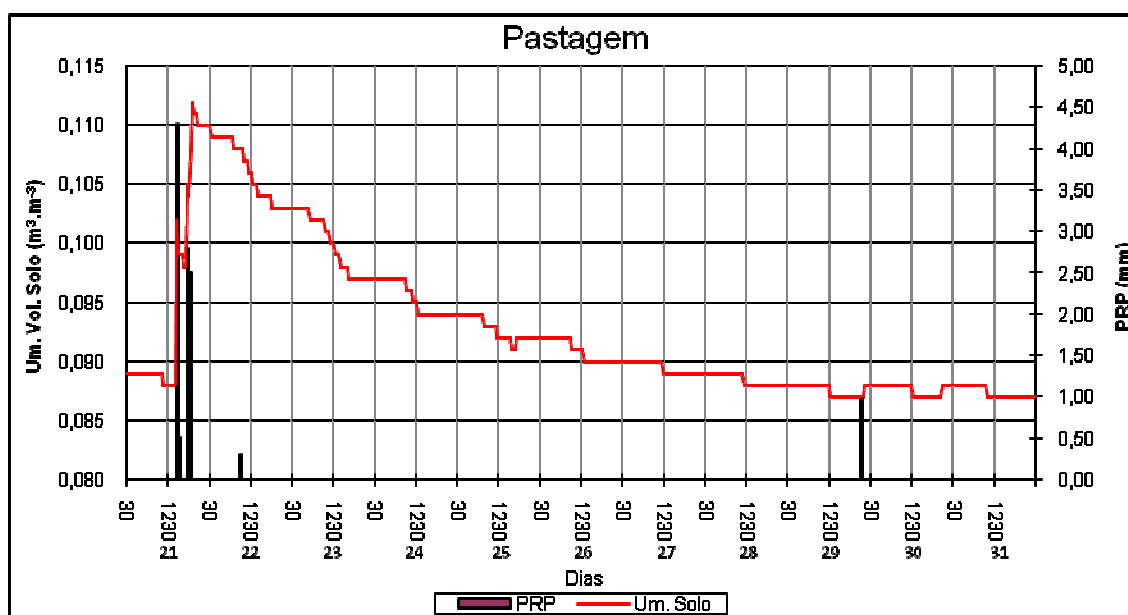


Figura 5.28 – Umidade do solo e Precipitação no sítio Pastagem – Período de 21 a 31/08/2002.

Às 02:30 h local do dia 22/08/2002, cinco horas depois da precipitação observada na Pastagem, ocorreu um evento de chuva na Floresta de 10,8 mm causando uma recarga de água no solo no mesmo dia de $0,064 m^3.m^{-3}$. Essa recarga corresponderia a um acréscimo na coluna líquida de 6,4 mm. Presume-se que a diferença entre o valor em mm da precipitação e a recarga na mesma unidade corresponda à soma do escoamento e da infiltração durante o evento

de chuva no sítio considerado. O padrão de degraus da perda de umidade durante o dia aparece como na pastagem, porém, a perda inicial de umidade na floresta é mais rápida do que no pasto. Apesar disso, a retenção ou armazenamento de umidade no solo da floresta permanece alta, como mostrada na figura 5.28. À noite e ao longo da madrugada, uma pequena flutuação aparentemente associada à subida de água por capilaridade da camada imediatamente abaixo, na coluna de solo, foi detectada pelo sensor TDR a partir do dia 24, quando as chuvas cessaram totalmente. É interessante observar que este efeito de recarga noturna sob a floresta já se manifesta em níveis de umidade em torno de $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, enquanto que no pasto observamos esse efeito quando a umidade atinge valores muito baixos, em torno de $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (vide Tabela 5.8).

Vale ressaltar que este padrão de umidade na floresta e na pastagem somente é observado na camada rasa. Conforme estudo feito por Souza et al, (2006), no município de Marabá-PA, a partir de 1 m de profundidade, a umidade do solo medida na pastagem é maior do que na floresta.

Tabela 5.9 – Médias diárias de Umidade Volumétrica do solo, Precipitação e diferença da Umidade do solo observada na floresta no período de 21 a 31/08/2002. Os valores em negrito representam os valores máximos das variáveis.

Agosto/2002 Dias	Umidade do Solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Precipitação (mm)	Varição de umidade
21	0,310	0,00	
*22	0,355	11,00	
23	0,348	0,60	-0,006
24	0,336	0,20	-0,012
25	0,324	0,00	-0,012
26	0,315	0,00	-0,009
27	0,309	0,00	-0,006
28	0,305	0,00	-0,004
29	0,303	0,00	-0,003
*30	0,310	9,40	0,007
31	0,332	0,20	0,023

*dias de PRP significativa

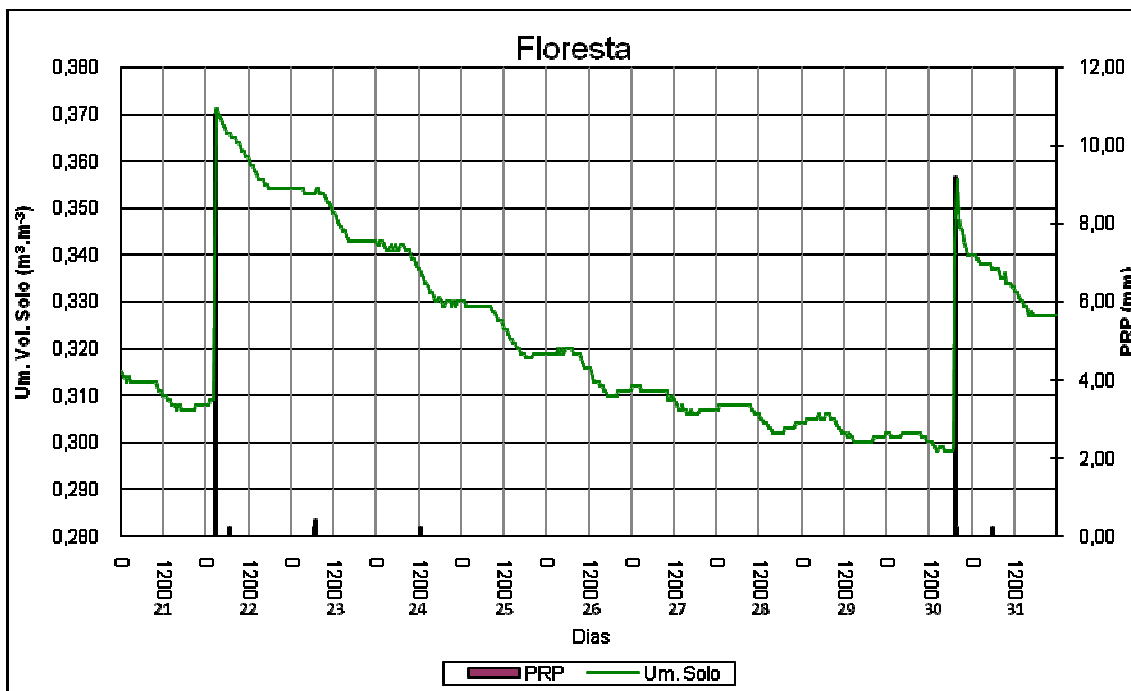


Figura 5.29 – Umidade do solo e Precipitação no sítio Floresta – Período de 21 a 31/08/2002.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O critério para classificação de períodos secos e chuvosos proposto teve um bom desempenho nos sítios estudados. O período chuvoso foi caracterizado por intensa nebulosidade e interferiu principalmente no sinal da radiação solar incidente, sendo observado significativas flutuações. Por outro lado, o período seco apresentou um padrão inverso, com pouca nebulosidade durante as horas de brilho solar, exceto por pequenas ocorrências de chuva convectiva localizadas, muito comuns nos sítios estudados. O sítio floresta apresentou uma boa distribuição da precipitação ao longo do ano, superior a 50 mm. A pastagem teve as maiores quantidades de chuva nos meses de janeiro a março, tendendo a diminuição dessa variável nos demais meses.
- Este trabalho analisou a maior série temporal dos dados de temperatura e umidade dos solos coletados com alta frequência de amostragem disponível até o momento, para o leste da Amazônia. Foi possível caracterizar as diferenças dos regimes destas variáveis físicas, abaixo de três ecossistemas importantes desta região.
- As temperaturas dos solos em 5, 20 e 50 cm tiveram suas características bastante distintas sazonalmente. Em geral, as temperaturas diminuem nos sítios durante o período chuvoso. As temperaturas do solo na pastagem e na área agrícola e na pastagem apresentaram maior variabilidade em 5 e 20 cm de profundidade, enquanto que na floresta esse comportamento foi observado no nível de 50 cm.
- Na análise harmônica das temperaturas, o primeiro harmônico descreveu mais de 90% da variação da onda de temperatura na pastagem e área agrícola nas profundidades de 20 e 50 cm, por outro lado, na floresta, o primeiro harmônico descreveu a mesma porcentagem da variação diária nas camadas de 5 e 20 cm.

- Os fluxos de calor no solo observados na pastagem e área agrícola foram cerca de 6 vezes maiores que os da floresta.
- Estudos de caso da umidade volumétrica do solo na camada de 30 cm de profundidade mostraram que a floresta armazena mais água que a pastagem e área agrícola devido à grande parte à vegetação de grande porte e pelo próprio regime de chuvas no período seco, que é bem distribuído temporalmente em relação aos outros sítios estudados. Foram observados nos períodos sem chuvas, a ocorrência do fenômeno de subida de água por capilaridade nos solos sob a pastagem e a floresta durante a noite e madrugada.
- As estimativas de difusividade térmica aparente do solo foram feitas pelos métodos da amplitude e da fase usando os dados de propagação do pulso diário de calor nesses solos. Os resultados mostraram valores bem diferentes, porém, o primeiro método pareceu mais confiável e adequado para o modelamento numérico.
- As diferenças das respostas térmicas e hídricas encontradas nos ecossistemas estudados estão associadas à variação climática sazonal e principalmente, às diferenças da cobertura vegetal característica de cada sítio estudado.

Considerando as limitações e os resultados obtidos na realização deste trabalho, é preciso estabelecer algumas recomendações para futuros estudos que utilizem esta metodologia ou parte dela.

A aplicação desta metodologia de trabalho em outras áreas da Amazônia é de grande importância para a validação da metodologia em si, como para a comparação dos resultados obtidos.

Como o sítio localizado na área agrícola não teve o mesmo volume aproximado de dados, recomenda-se reunir uma base de dados maior.

Como alguns resultados deste trabalho foram obtidos através de equações analíticas, como a difusividade térmica aparente do solo, sugere-se que seja feito um detalhado experimento de análise do solo em todos os sítios

estudados. Estudos futuros dos minerais e materiais orgânicos nestes solos, bem como dos índices de área foliar e da biomassa das coberturas vegetais desses ecossistemas, melhoraria a compreensão dos regimes descritos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVALÁ, R. C. S.; et al. Intradiurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux, soil moisture content, and thermal properties under forest and pasture in Rondônia. **Journal of Geophysical Research - Atmospheres**, v. 107, p. 10-1-10-20. 2002.

_____. Thermal diffusivity of Amazon soils. In: GASH, J. H. C. et al. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester England: John Wiley & Sons, 1996. cap. 7, p. 139-150.

ANDRADE, J. A.; ABREU, F.G,. Modelling Daily Annual Cycles of Temperature in two Types of Soil. In: WORLD CONGRESS ON SOIL SCIENCE, 17, 2002, Thailand. **Proceedings...** Thailand, 2002. p. 1820-1-10.

ANTONINO, A. C. D., LIRA, C. A. B. O., DALL'OLIO, A., AUDRY, P., PINTO, A. X. M. Influência do Posicionamento de Sondas Térmicas na Determinação da Difusividade Térmica e do Fluxo de Calor no Solo em Condições de Campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 165-172. 1997.

ARAÚJO, R. L. C. et al. Influência Ambiental sobre a Estrutura Geotermal Rasa. **Revista brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 1, p. 33-44. 2004.

_____. A Influência da Umidade sobre os Valores de Condutividade Térmica da Subsuperfície. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 13, n. 2 p. 111-118, 1995.

_____. A Influência da Umidade sobre os Valores de Condutividade Térmica da Subsuperfície. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 13, n. 2 p. 111-118, 1995.

_____. Variações no fluxo geotermal raso. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. **Anais...** Belém, 1994, p. 103-105.

_____. Configuração normal de um perfil geotermal raso. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. 3., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1993 p. 978-982.

ASSIS, F.N. DE.; et al. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**, Pelotas: Ed. Universitária/ UFPel, 1996. 161 p.

BASTOS T.X. Viabilidade e limitações climáticas para as culturas permanentes e anuais com possibilidades de expansão na Amazônia Brasileira. In: IPEAN (Belém,PA). **Zoneamento agrícola da Amazônia (1ª Aproximação)**. Belém: 1972. p. 13-53. (IPEAN. Boletim Técnico, 54).

BASTOS, T. X.; PACHECO, N. A. Características Agrometeorológicas no Município de Igarapé-Açu. In: SEMINÁRIO SOBRE MANEJO DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA PARA A SUSTENTABILIDADE DA AGRICULTURA FAMILIAR NA AMAZÔNIA ORIENTAL, 2000, Belém. **Anais...** Belém: EMBRAPA/CNPq, p. 51-58.

BRAGA, P.I.S. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta amazônica. **Acta Amazônica**, v. 9, n. 4, p. 53-80. 1979.

EMBRAPA, Boletim Agrometeorológico 1977-2002, EMBRAPA-CPATU, Belém, PA, 2002.

EMBRAPA. Caracterização Físico-hídrica dos principais Solos da Amazônia Legal: Estado do Pará. 1991. 600 p. (Relatório Técnico),

_____. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1999. 412 p.

FEDDEMA, J. J. The Importance of land-cover change in simulating future climates. **Science**, v. 310, p. 1674-1676. 2005.

FELLNER-FELDEGG, J. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, v. 73, p. 616-623. 1969.

GHUMAN, B. S. e LAL, R. Temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier analysis, **Soil Science**. v.134 , p. 133–140. 1982.

GOMIDE, R. L. Importância da automação nos sistemas agrícolas irrigados, visando à irrigação inteligente e a agricultura de precisão. In: APLICAÇÕES DA TÉCNICA DE TDR NA AGRICULTURA. Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2001. p. 1-36.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego Elsevier/Acad. Press, 2004. 494 p.

HOREL, J. Applied math for environmental scientists. [s. l]: Spring, 2006

HORTON, R.; WIERENGA, P. J., Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 25-32. 1983.

IBGE. **Censo agropecuário** 2002. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em 28/02/2007.

IDESP. **Estudo integrado da Ilha do Marajó**. Belém, 1974. 333p.

JACKSON, R. D.; KIRKHAM, D. Method of measurement of the real thermal diffusivity of moist soil. **Soil Science Society of America Proceedings**. v. 22, p. 479-482. 1958.

JAKUBAUSKAS, M.E. et al. Harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 67, n. 4, p. 461-470, 2001.

JOAQUIM JÚNIOR, G. O. Desempenho do reflectômetro do domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo. 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba.

KANASHIRO, M; DENICH, M. **Possibilidades de utilização e manejo adequado de áreas alteradas e abandonadas na Amazônia Brasileira: Estudos dos Impactos Ambientais nas Florestas e Áreas Abandonadas nos Trópicos-Shift**. Brasília;MCT/CNPq, 1998.

KATO, O. R. et al. época de preparo de área e plantio de milho no sistema de corte e trituração no município de Igarapé-Açu-PA.. Belém: EMBRAPA, 2002. (Comunicado Técnico).

LISBOA, P. L. B. (org). **Caxiuanã**. Belém: CNPq/Museu Paraense Emílio Goeldi, 1997. 150 p.

MAKINO, M; et al. Solução Numérica da Equação do calor e sua aplicação em geotermia rasa. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 9, n. 1, p 37-46, 1991.

MORAES, J. C.; COSTA, J. de P. R.; ROCHA, E. J. P. e SILVA, I. M. O. **Estudos hidrometeorológicos na Bacia do rio Caxiuanã**. In: LISBOA, P. L. B. (org). **Caxiuanã**. Belém: CNPq/Museu Paraense Emílio Goeldi, 1997, p. 85-95.

MOROIZUMI, T.; HORINO, H. The effects of tillage on soil temperature and soil water. **Soil Science**. V. 167, n. 8, p. 548-559, 2002.

MOTA, M. A. S.; GALVÃO, J. A. C. Análise da estrutura termodinâmica da atmosfera durante o RBLE-3: Comparação pasto x floresta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 1996, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, 1996. p. 1133-1140.

NASSAR, Y. et al. evaluation of the underground soil thermal storage properties in lybia. **Renewable Energy**. v.31, p. 593-598. 2006.

PANOFSKY, H.; BRIER, G. **Some Applications of Statistics to Meteorology**. The Pennsylvania State University Press, 1958. 224 p.

PARRY, M. M. et al. Estado Nutricional do Arroz cultivado em diferentes Épocas e Adubações sob Cobertura Morta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.1, p.57-65, 2004.

PIELKE, R. A. Land Use and Climate Change. **Science**, v 310, p. 1625-1626, 2005.

PINHEIRO, F. M. A.; et al. Regimes Térmico e Hídrico no Solo sob Floresta e Pastagem na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, 1994. Belo Horizonte, 1994. **Anais...** Belo Horizonte, 1994. p. 71-74.

PIRES, J.M. **Tipos de vegetação da Amazônia**. In: O MUSEU GOELDI NO ANO DO SEQUICENTENÁRIO. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1973, cap. 20 p. 179-202.

BRASIL. DNPM. RADAMBRASIL. **Folha SA.22. Belém: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1974. (Levantamento de Recursos Naturais, 3)

REGO, R.S.; SILVA, B.N.R.; OLIVEIRA JUNIOR, R.S. Detailed soil survey in an area in the municipality Igarapé-Açu. **Resumos e palestras apresentadas no 1º workshop da SHIFT. EMBRAPA-CPATU**, Belém, p. 146, 1993.

ROSENBERG. N. J. **Microclimate, the biological environment**. John Wiley and Sons, 1983, 469 p.

SOUZA, J. R. S. et al. Difusividade Térmica em Solos de Marabá-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10., 1998, Brasília. **Anais...**, Brasília-DF, 1998. 1 CD-ROM.

_____. Fluxo de calor em solos sob floresta e pastagem em Marabá-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. 1 CD-ROM

_____. Heat transfer and thermal properties of the subsoil in Belém. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 07, n. 01, p. 19-28. 1989.

_____. Temperatura do subsolo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de

Geofísica, 3., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: SBGf, 1993. p. 1174-1179

_____. Temperature and moisture profiles in soil beneath forest and pasture areas in Eastern Amazonia. In: GASH, J. H. C. et al. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester-England: John Wiley and Sons, 1996. p. 125-137.

_____. **Thermal properties and heat fluxes in soils under forest and pasture, in Marabá, PA, Brazil**. Revista Brasileira de Meteorologia – Edição Especial do LBA. **Brasil, v.21, n. 3, p. 1-15. 2006.**

_____. Umidade do subsolo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 3., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1993. p.1195-1200.

_____. Variação sazonal de temperatura e umidade em solos sob floresta, manguezal e pastagem na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2004.

_____. Variação temporal dos perfis geotérmicos rasos associados a alterações microclimáticas na Amazônia. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2., 1991, Salvador. **Anais...** Salvador, 1991. p. 965-970.

_____. Variabilidade da temperatura e umidade em solos sob floresta, pastagem e manguezal, no Leste da Amazônia. In: CONGRESSO DE METEOROLOGIA, 12., Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...**, Foz do Iguaçu, 2002. 1CD-ROM

SANTOS, R. C.; VISWANADHAM, Y.; SANTOS, J. M. Propriedades Térmicas os Solos: um estudo de casos. **Ciência e Cultura**, v. 40, n. 12, p. 1227-1231. 1988.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. 666 p.

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (SUDAM). Projeto de hidrologia e Climatologia da Amazônia (SUDAM/PHCA). **Atlas climatológico da Amazônia Brasileira**. Belém, 1984.

TOMASELLI, J. T. G. Critérios para Calibração de Sondas de TDR. In: MATSURA, E. E. et al. (Ed.). **Aplicações da técnica de TDR na agricultura**. Campinas: UNICAMP/FEAGRI, 2001. p. 85-114.

VAN LOON, W. K. P.; BASTINGS, H. M. H.; MOORS, E. J. Calibration of Soil Heat Sensors. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, [s. n.] p. 1-8, 1998.

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

VIANELLO, R. B., ANDRÉ, R. G. B., MARQUES, V. S. Comportamento térmico do solo de Jaboticabal, SP, sob três diferentes Coberturas. **Revista Ceres**, Campinas, n. 29 v. 161, p. 73-88. 1982.

APENDICE

APÊNDICE A - TABELAS DOS VALORES DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E DE SOLO

Radiação Solar Incidente (W/m^2) – Evolução Diurna

Bragança		Caxiuana		Soure		Ilg. Açú	
Hora local	K ↓	Hora local	K ↓	Hora local	K ↓	Hora local	K ↓
1	0,00	1	0	1	0,00	1	0,00
2	0,00	2	0	2	0,00	2	0,00
3	0,00	3	0	3	0,00	3	0,00
4	0,00	4	0	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0	5	0,00	5	0,00
6	2,44	6	0	6	0,55	6	1,65
7	96,44	7	21,29	7	53,66	7	70,96
8	268,08	8	154,92	8	202,22	8	252,20
9	420,73	9	317,67	9	380,48	9	421,48
10	535,71	10	454,19	10	555,12	10	534,53
11	664,60	11	534,22	11	677,76	11	613,85
12	733,57	12	603,17	12	740,54	12	625,60
13	714,95	13	616,26	13	747,42	13	608,14
14	630,57	14	601,92	14	674,75	14	513,02
15	494,35	15	523,59	15	547,09	15	388,08
16	313,29	16	390,17	16	378,79	16	247,16
17	139,09	17	231,94	17	194,53	17	120,90
18	19,95	18	81,22	18	44,20	18	25,41
19	0,09	19	6,07	19	0,29	19	0,02
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	0,00	21	0,00	21	0,00	21	0,00
22	0,00	22	0,00	22	0,00	22	0,00
23	0,00	23	0,00	23	0,00	23	0,00
24	0,00	24	0,00	24	0,00	24	0,00

Temperatura do solo ($^{\circ}C$) – Período Seco

Caxiuana				Soure				Ilg. Açú			
Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)	Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)	Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)
100	25,43	25,52	25,51	100	31,25	32,11	32,14	100	28,91	30,69	30,24
200	25,35	25,50	25,51	200	31,02	31,96	32,15	200	28,65	30,52	30,19
300	25,27	25,47	25,51	300	30,82	31,81	32,15	300	28,41	30,36	30,13
400	25,20	25,45	25,52	400	30,63	31,66	32,15	400	28,18	30,20	30,07
500	25,13	25,42	25,52	500	30,45	31,53	32,13	500	27,98	30,05	30,02
600	25,06	25,38	25,52	600	30,29	31,40	32,12	600	27,76	29,80	29,74
700	24,99	25,35	25,52	700	30,16	31,28	32,10	700	27,71	29,75	29,92
800	24,95	25,31	25,51	800	30,21	31,16	32,05	800	28,05	29,65	30,01
900	24,96	25,27	25,49	900	30,50	31,06	32,00	900	28,84	29,62	30,19
1000	25,05	25,23	25,48	1000	31,15	31,02	31,97	1000	29,76	29,71	30,41
1100	25,19	25,22	25,48	1100	32,07	31,09	31,93	1100	30,81	29,93	30,60
1200	25,35	25,23	25,48	1200	33,00	31,25	31,90	1200	31,72	30,24	30,75
1300	25,51	25,25	25,49	1300	33,88	31,52	31,87	1300	32,39	30,61	30,86
1400	25,67	25,29	25,49	1400	34,83	31,84	31,85	1400	32,88	30,99	30,94
1500	25,79	25,34	25,50	1500	35,45	32,22	31,84	1500	33,04	31,33	30,95
1600	25,89	25,39	25,51	1600	35,57	32,57	31,84	1600	32,84	31,58	30,90
1700	25,94	25,45	25,51	1700	35,13	32,84	31,86	1700	32,39	31,73	30,78
1800	25,95	25,49	25,52	1800	34,43	32,98	31,88	1800	31,76	31,77	30,65
1900	25,92	25,53	25,52	1900	33,69	33,00	31,92	1900	31,13	31,72	30,55
2000	25,85	25,55	25,52	2000	33,06	32,93	31,98	2000	30,61	31,58	30,47
2100	25,77	25,56	25,52	2100	32,56	32,80	32,03	2100	30,18	31,40	30,41
2200	25,68	25,56	25,51	2200	32,15	32,63	32,07	2200	29,81	31,22	30,37
2300	25,59	25,55	25,51	2300	31,81	32,46	32,11	2300	29,48	31,04	30,33
2400	25,49	25,52	25,49	2400	31,46	32,24	32,12	2400	29,24	30,86	30,15
máximo	25,95	25,56	25,52	máximo	35,57	33,00	32,15	máximo	33,04	31,77	30,95
média	25,46	25,41	25,51	média	32,32	31,97	32,01	média	30,11	30,68	30,40
mínimo	24,95	25,22	25,48	mínimo	30,16	31,02	31,84	mínimo	27,71	29,62	29,74
DV	0,34	0,12	0,02	DV	1,80	0,68	0,12	DV	1,80	0,74	0,35
Amplitude	0,50	0,17	0,02	Amplitude	2,70	0,99	0,16	Amplitude	2,67	1,08	0,60

Temperatura do solo (°C) – Período Chuvoso

Caxiuana				Soure				Iq. Açú			
Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)	Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)	Hora local	Ts (5cm)	Ts (20cm)	Ts (50cm)
100	25,10	25,31	25,40	100	28,04	28,58	29,07	100	27,00	28,73	28,56
200	25,04	25,29	25,40	200	27,90	28,48	29,07	200	26,86	28,62	28,56
300	24,98	25,27	25,40	300	27,77	28,38	29,06	300	26,73	28,52	28,55
400	24,94	25,24	25,40	400	27,65	28,28	29,05	400	26,60	28,41	28,54
500	24,87	25,16	25,40	500	27,54	28,18	29,04	500	26,48	28,31	28,52
600	24,82	25,20	25,40	600	27,43	28,09	29,02	600	26,37	28,22	28,51
700	24,77	25,17	25,39	700	27,35	28,00	28,99	700	26,30	28,13	28,49
800	24,75	25,17	25,39	800	27,38	27,93	28,97	800	26,43	28,06	28,48
900	24,77	25,11	25,37	900	27,60	27,90	28,94	900	26,81	28,03	28,46
1000	24,85	25,07	25,35	1000	28,09	27,89	28,91	1000	27,37	28,09	28,43
1100	24,98	25,04	25,35	1100	28,80	27,96	28,88	1100	27,99	28,23	28,41
1200	25,13	25,04	25,36	1200	29,45	28,12	28,85	1200	28,59	28,45	28,38
1300	25,30	25,06	25,37	1300	30,19	28,34	28,82	1300	29,02	28,70	28,35
1400	25,45	25,09	25,37	1400	30,74	28,61	28,80	1400	29,30	28,98	28,34
1500	25,57	25,15	25,39	1500	30,97	28,89	28,79	1500	29,33	29,22	28,35
1600	25,63	25,20	25,40	1600	30,90	29,11	28,80	1600	29,09	29,37	28,36
1700	25,65	25,25	25,41	1700	30,53	29,26	28,82	1700	28,79	29,42	28,38
1800	25,65	25,30	25,43	1800	30,04	29,31	28,85	1800	28,50	29,42	28,40
1900	25,60	25,34	25,44	1900	29,56	29,28	28,89	1900	28,17	29,37	28,43
2000	25,52	25,36	25,44	2000	29,14	29,20	28,93	2000	27,89	29,28	28,46
2100	25,43	25,36	25,44	2100	28,81	29,08	28,97	2100	27,66	29,16	28,48
2200	25,35	25,35	25,44	2200	28,55	28,94	29,01	2200	27,46	29,05	28,51
2300	25,28	25,35	25,42	2300	28,35	28,81	29,04	2300	27,29	28,94	28,52
2400	25,18	25,30	25,41	2400	28,18	28,69	29,05	2400	27,14	28,83	28,54
máximo	25,65	25,36	25,44	máximo	30,97	29,31	29,07	máximo	29,33	29,42	28,56
média	25,19	25,22	25,40	média	28,79	28,55	28,94	média	27,63	28,73	28,46
mínimo	24,75	25,04	25,35	mínimo	27,35	27,89	28,79	mínimo	26,30	28,03	28,34
DV	0,31	0,11	0,03	DV	1,22	0,49	0,10	DV	1,01	0,48	0,07
Amplitude	0,45	0,16	0,05	Amplitude	1,81	0,71	0,14	Amplitude	1,52	0,69	0,11

Evolução Diária do Fluxo de Calor no Solo (W/m²) – Período Seco

Caxiuana			Soure			Iq. Açú	
	G (5cm)	G (20cm)		G (5cm)	G (20cm)		G (5cm)
100	-5,60	-4,63	100	-18,33	-4,35	100	-22,73
200	-6,20	-5,24	200	-18,14	-5,16	200	-25,84
300	-6,72	-5,78	300	-17,92	-5,82	300	-26,35
400	-7,17	-6,24	400	-17,67	-6,36	400	-26,33
500	-7,45	-6,61	500	-17,53	-6,72	500	-26,44
600	-7,82	-6,94	600	-17,34	-7,15	600	-26,41
700	-7,85	-7,13	700	-15,98	-7,49	700	-23,80
800	-6,35	-6,33	800	-9,82	-7,57	800	-12,62
900	-3,11	-3,99	900	-0,34	-6,87	900	9,23
1000	1,47	-0,36	1000	17,08	-5,12	1000	29,36
1100	4,95	3,08	1100	34,66	-1,90	1100	41,98
1200	6,93	5,72	1200	48,01	2,65	1200	51,99
1300	8,39	6,67	1300	53,95	7,56	1300	56,69
1400	9,02	7,40	1400	53,93	11,78	1400	53,13
1500	9,24	7,75	1500	47,04	14,52	1500	42,70
1600	8,03	7,16	1600	30,66	15,54	1600	29,13
1700	6,39	6,11	1700	10,15	14,47	1700	10,68
1800	4,41	4,68	1800	-4,21	11,66	1800	-4,38
1900	1,96	2,80	1900	-13,73	8,04	1900	-14,42
2000	-0,59	0,58	2000	-17,31	4,51	2000	-18,27
2100	-2,06	-0,97	2100	-18,29	1,65	2100	-20,29
2200	-3,19	-2,10	2200	-18,58	-0,51	2200	-22,08
2300	-4,12	-3,06	2300	-18,66	-2,13	2300	-23,18
2400	-5,04	-4,03	2400	-18,63	-3,39	2400	-24,06
máximo	9,24	7,75	máximo	53,95	15,54	máximo	56,69
média	-0,52	-0,48	média	2,21	0,91	média	1,32
mínimo	-7,85	-7,13	mínimo	-18,66	-7,57	mínimo	-26,44
DV	6,21	5,38	DV	27,10	8,05	DV	31,61
Amplitude	8,54	7,44	Amplitude	36,31	11,55	Amplitude	41,56

Evolução Diária do Fluxo de Calor no Solo (W/m^2) – Período Chuvoso

	Caxiuana			Soure			Ig. Açú	
	G (5cm)	G (20cm)		G (5cm)	G (20cm)		G (5cm)	
100	-5,79	-4,14	100	-18,26	-7,88	100	-18,31	
200	-6,22	-4,53	200	-17,97	-8,49	200	-18,27	
300	-6,54	-4,99	300	-17,77	-8,92	300	-19,57	
400	-6,95	-5,24	400	-17,46	-9,33	400	-19,73	
500	-7,14	-5,60	500	-17,20	-9,71	500	-19,85	
600	-7,34	-5,86	600	-17,01	-9,84	600	-19,87	
700	-7,29	-5,96	700	-15,66	-10,03	700	-18,68	
800	-5,69	-5,31	800	-9,14	-9,81	800	-10,21	
900	-2,77	-3,58	900	-0,20	-8,46	900	3,81	
1000	1,71	-0,65	1000	21,48	-5,43	1000	19,53	
1100	4,58	2,04	1100	34,06	-1,14	1100	30,96	
1200	6,96	4,09	1200	44,07	4,65	1200	40,49	
1300	9,93	6,10	1300	47,92	10,13	1300	40,69	
1400	9,97	6,65	1400	42,96	14,08	1400	38,24	
1500	9,69	6,85	1500	31,61	15,70	1500	27,96	
1600	7,98	6,25	1600	15,04	14,98	1600	16,10	
1700	5,09	4,79	1700	-0,56	12,13	1700	4,29	
1800	2,60	3,11	1800	-11,06	8,02	1800	-1,50	
1900	0,33	1,51	1900	-18,03	3,62	1900	-8,50	
2000	-1,77	-0,24	2000	-19,87	-0,02	2000	-12,24	
2100	-3,06	-1,54	2100	-20,12	-2,86	2100	-13,69	
2200	-4,06	-2,52	2200	-19,68	-4,85	2200	-14,74	
2300	-4,85	-3,18	2300	-19,02	-6,27	2300	-14,77	
2400	-5,32	-3,74	2400	-18,46	-7,16	2400	-14,71	
máximo	9,97	6,85	máximo	47,92	15,70	máximo	40,69	
média	-0,66	-0,65	média	-0,85	-1,12	média	-0,11	
mínimo	-7,34	-5,96	mínimo	-20,12	-10,03	mínimo	-19,87	
DV	6,23	4,56	DV	24,17	9,09	DV	21,79	
Amplitude	8,66	6,40	Amplitude	34,02	12,86	Amplitude	30,28	

APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO POR MEIO DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO.

Procedimentos para coleta dos solos:

- Escolha de 4 pontos de coleta ao redor do sensor TDR;
- Coleta das amostras de solo a cada 5 cm, até 40 cm de profundidade;
- Armazenamento das amostras em sacolas plásticas;
- Pesagem das amostras na balança de precisão;
- Secagem das amostras em estufas à 105 °C durante 24 h.
- Pesagem das amostras secas;
- Cálculo da umidade do solo por meios das equações do método gravimétrico.

Equações – Método Gravimétrico

Conteúdo gravimétrico de água:

$$\theta_g = \frac{m_{úmida} - m_{seca}}{m_{seca}}$$

onde m é a amostra do solo.

Densidade volumétrica (ρ_v):

$$\rho_v = \frac{m_{seca}}{V_{cilindro}}$$

onde $V_{cilindro}$ é o volume do cilindro.

Umidade volumétrica da água (m^3/m^3):

$$\theta_g * \rho_v$$

Obtenção da umidade do solo pelo método gravimétrico - Caxiuanã

Pesagem das amostras úmidas (g)					
Camadas (cm)	Furos				Média
	1	2	3	4	
[1] 0-5	110,653	137,894	129,328	130,893	127,192
[2] 5-10	165,295	125,235	149,850	115,830	139,053
[3] 10-15	112,780	156,214	175,107	144,186	147,072
[4] 15-20	145,907	148,687	143,880	154,613	148,272
[5] 20-25	122,296	133,006	159,155	153,115	141,893
[6] 25-30	143,786	135,773	124,516	163,735	141,953
[7] 30-35	117,095	175,582	135,128	143,221	142,757
[8] 35-40	116,890	152,051	225,937	124,645	154,881
	Méd. Geral				142,884

Pesagem das amostras secas (g)

Camadas (cm)	Furos				Média
	1	2	3	4	
[1] 0-5	78,623	101,807	89,330	100,132	92,473
[2] 5-10	123,843	95,327	113,985	90,188	105,836
[3] 10-15	85,981	118,840	132,703	110,400	111,981
[4] 15-20	109,561	109,477	110,697	119,721	112,364
[5] 20-25	93,612	100,280	121,300	118,030	108,306
[6] 25-30	109,764	103,118	94,430	126,614	108,482
[7] 30-35	89,057	130,973	102,240	108,700	107,743
[8] 35-40	88,659	115,420	169,350	95,957	117,347
	Méd. Geral				108,066

Volume do cilindro = 62,8 cm³

Conteúdo gravimétrico de água (θ_g) = 0,322 Kg

Densidade Volumétrica $\rho_v = 1,72$ g/cm³

Conteúdo de Água Gravimétrica (θ_{gr}) = 0,554 m³/m³

Obtenção da umidade do solo pelo método gravimétrico – Paragominas

Pesagem das amostras úmidas (g)

Camadas (cm)	Furos				Média
	1	2	3	4	
[1] 0-5	125,300	98,220	103,950	96,520	105,998
[2] 5-10	137,870	100,730	86,800	111,530	109,233
[3] 10-15	121,020	154,330	145,310	130,560	137,805
[4] 15-20	151,800	151,850	100,100	123,710	131,865
[5] 20-25	127,670	144,330	116,370	138,380	131,688
[6] 25-30	139,210	143,190	153,520	124,600	140,130
[7] 30-35	134,600	110,330	80,260	135,450	115,160
[8] 35-40	145,450	143,330		114,150	134,310
	Méd. Geral				125,773

Pesagem das amostras secas (g)

Camadas (cm)	Furos				Média
	1	2	3	4	
[1] 0-5	92,360	76,740	80,630	72,480	80,553
[2] 5-10	103,600	77,270	65,600	82,460	82,233
[3] 10-15	91,280	118,590	111,300	96,870	104,510
[4] 15-20	116,410	116,400	77,040	92,060	100,478
[5] 20-25	97,740	110,230	88,200	101,450	99,405
[6] 25-30	106,920	109,830	118,430	104,330	109,878
[7] 30-35	103,450	84,400	61,910	93,810	85,893
[8] 35-40	111,720	109,660		79,000	100,127
	Méd. Geral				95,384

Volume do cilindro = $62,8 \text{ cm}^3$

Conteúdo gravimétrico de água (θ_g) = $0,319 \text{ Kg}$

Densidade Volumétrica $\rho_v = 1,518 \text{ g/cm}^3$

Conteúdo de Água Gravimétrica (θ_v) = $0,484 \text{ m}^3/\text{m}^3$



Figura A1: Coleta das amostras de solo.



Figura A2: Pesagem das amostras de solo.



Figura A3: Preparação das amostras para secagem.