



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA: ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE
PRODUTOS AGRÍCOLAS



ESTÁGIO SUPERVISIONADO

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE BURITI

ALUNO: DÉBORA RAFAELLY SOARES SILVA

MATRÍCULA: 2011.1141

ORIENTADORA: PROF^a. ROSSANA MARIA FEITOSA DE FIGUEIRÊDO

Campina grande - Paraíba

Maió – 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Abril de 2021.

Sumé - PB



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DO ESTÁGIO SUPERVISIONADO

DÉBORA RAFAELLY SOARES SILVA

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE BURITI

BANCA EXAMINADORA:

NOTA

Rossana M^a F. de Figueiredo

8,5

Rossana Maria Feitosa de Figueiredo – Orientadora

Alexandre J M Queiroz

8,5

Alexandre José de Melo Queiroz – Examinador

Josivanda P. Gomes

8,5

Josivanda Palmeira Gomes – Examinadora

MÉDIA FINAL

8,5

MAIO - 2007

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DE BURITI

DÉBORA RAFAELLY SOARES SILVA

Estágio supervisionado apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de graduada em Engenharia Agrícola.

Área: Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

Campina Grande - Paraíba

Maio – 2007

AGRADECIMENTOS

A *Deus*, por ser a minha fortaleza em todos os momentos difíceis da vida.

Aos meus pais. A minha mãe em especial por estar comigo em todos os momentos alegres e tristes, sem o seu apoio incondicional jamais teria superado os obstáculos. Aos meus irmãos por terem participado, me apoiado e confortado nesta jornada.

A todos os meus familiares, tios, primos e avôs, que contribuíram direta ou indiretamente.

A todos os meus professores que tive oportunidade de conviver e aprender, em especial a Prof^a. Hieldina Lúcia, Prof^a. Rossana, Prof^a. Josivanda, Prof. Alexandre e o Prof. João Miguel.

Aos amigos que conquistei na universidade: Alberto, Aline, Aluska, Clarice, Conceição, Denise, Edvaldo, Janildo, Jean, Jofran, Joelma, Kaline, Karla, Lidianne, Luciano, Marcelo, Marcelino (*in memoriam*), Marcio, Mônica, Rafael, René, Simone, Socorro, Sebastião, Tânila, por termos convivido durante todos esses anos.

Em especial as minhas amigas de todas as horas Patrícia e Niédja.

E a todos que de alguma forma contribuíram na execução deste trabalho, a exemplo de Jean, Kaline, Karla, Niédja e Patrícia.

Muito Obrigado!!!

DEDICÁTORIA

A minha mãe , **Dalva**, pelo exemplo de vida e caráter.

Aos meus irmãos **Danyella e Rodolpho**, por serem meus companheiros em todos os momentos da vida.

E a minha tia **Marlene** (*in memorian*), pelo seu incentivo e força de vontade.

1.INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Buriti	3
2.2.Características físico-químicas	5
2.2.1. Sólidos solúveis	5
2.2.2.Umidade	5
2.3. Propriedades Termofísicas	6
2.3.1. Calor específico	6
2.3.2. Massa específica	9
2.3.3. Difusividade térmica	10
2.3.4. Condutividade térmica.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Matérias-primas	17

3.1.1. Obtenção da polpa de buriti	17
3.2. Caracterização físico-química da polpa de buriti	19
3.2.1. Sólidos Solúveis (°Brix)	19
3.2.2. Sólidos totais e umidade	19
3.3. Propriedades termofísicas	19
3.3.1. Calor específico	19
3.3.2. Massa específica	21
3.3.3. Difusividade térmica	22
3.3.4. Condutividade térmica	24
3.4. Análise estatística	25
3.5. Erro percentual	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5. CONCLUSÕES	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fruto do buritizeiro (<i>Mauritia flexuosa</i> L)	17
Figura 3.2 – Fluxograma das etapas realizadas para a obtenção da polpa de buriti	18
Figura 3.3 – Desenho esquemático do calorímetro	20
Figura 3.4 – Esquema utilizado para a determinação da difusividade térmica	23
Figura 4.1 – Valores teóricos da massa específica em função da temperatura preditos por equações da literatura	32
Figura 4.2 – Diagrama tempo-temperatura das três repetições para a determinação da difusividade térmica da polpa de buriti.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química e físico-química da polpa de buriti	4
Tabela 3.1 – Equações para o cálculo do calor específico de alimentos	21
Tabela 3.2 – Equações para cálculo da massa específica em alimentos	22
Tabela 3.3 – Equações utilizadas no cálculo da difusividade térmica de produtos alimentícios	24
Tabela 3.4 – Equações para cálculo da condutividade térmica em alimentos	25
Tabela 4.1 – Valores de °Brix para a polpa de buriti	27
Tabela 4.2 – Valores dos sólidos totais e da umidade para a polpa de buriti	28
Tabela 4.3 – Massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas	28
Tabela 4.4 – Análise de variância dos valores médios da massa específica da polpa de buriti	29
Tabela 4.5 – Valores médios da massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas	29
Tabela 4.6 – Regressão na análise de variância dos valores médios da massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas	30
Tabela 4.7 – Equações propostas para o cálculo da massa específica do buriti	31

Tabela 4.8 – Valores teóricos da massa específica (kg/m^3) para a polpa de buriti e os erros percentuais	31
Tabela 4.9 – Valores experimentais do calor específico da polpa de buriti	33
Tabela 4.10 – Valores teóricos do calor específico para a polpa de buriti e os erros percentuais	34
Tabela 4.11 – Valores experimentais da difusividade térmica da polpa de buriti	36
Tabela 4.12 – Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa de buriti e os erros percentuais	37
Tabela 4.13 – Valores experimentais da condutividade térmica da polpa de buriti	37
Tabela 4.14 – Valores teóricos da condutividade térmica ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$) da polpa de buriti e os respectivos erros percentuais	38

1 - INTRODUÇÃO

Pertencente a família das palmáceas, o buritizeiro (*Mauritia vinifera* Mart. e *M. flexuosa* L.) predomina numa extensa área que cobre praticamente todo o Brasil central e o sul da planície amazônica. O buritizeiro é encontrado principalmente na Amazônia Ocidental, onde em cada hectare é possível distribuir até 550 plantas. A planta feminina apresenta 2 a 8 florações durante o ano e cada cacho contém em média 850 frutos. A produção média de frutos é de 200 kg, sendo possível obter 20 kg de óleo/planta/ano (FREITAS et al., 1996).

Das 11 espécies disseminadas no Brasil, a *M. flexuosa* é restrita à América do Sul e bem distribuída por toda a região Amazônica, sendo utilizada por comunidades indígenas e extrativistas representando grande potencial econômico. No entanto, esta espécie ainda continua pouco explorada com relação a estudos que viabilizem o manejo de suas populações (CAVALCANTE, 1991; FERNANDES, 2001).

De acordo com DONADIO et al. (2002) o buritizeiro floresce durante boa parte do ano, com mais intensidade de dezembro a abril, com maturação do fruto em dezembro a junho. A polpa tem sabor agridoce e cor variável do laranja ao laranja-avermelhado, representando de 12 a 13% do peso do fruto. O óleo extraído da polpa é muito rico em ácido oléico. Esse mesmo óleo também é utilizado contra queimaduras, por possuir um efeito aliviador e cicatrizante. O tronco é utilizado para fazer canoas, as raízes para a medicina popular (chá para intestino, vermífugo e outros usos). Os frutos são utilizados de diversas formas como doces, sorvetes, vinho, óleo, cremes, geléias, licores e outros. Também se utiliza o palmito e as folhas no fabrico de cordas e coberturas.

O conhecimento das propriedades termofísicas condutividade térmica, difusividade térmica, densidade e calor específico de produtos agrícolas são de extrema importância e desempenham uma importante função para o correto dimensionamento das instalações e equipamentos necessários para o processamento, transporte e estocagem em especial de sucos e polpas de frutas, além de influenciarem no retardamento dos processos metabólicos e microbiológicos (SINGH, 1982; SARRIA & HONÓRIO, 2004).

Para situações onde a transferência de calor ocorre em regime transiente, a propriedade denominada difusividade térmica torna-se bastante importante, pois é a razão entre a habilidade de transferir calor e a capacidade de armazenar calor, a qual fornece uma medida de como a temperatura de um material pode variar em uma situação de aquecimento ou resfriamento (SINGH, 1982). Com o valor do calor específico dos

alimentos determina-se a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento (MOHSEIN, 1980). A medida da massa específica é também usada na determinação da concentração de soluções, de sólidos solúveis, de adulterações e textura de frutas (CECCHI, 1999). A condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor, sendo um parâmetro fundamental em qualquer processo térmico, tanto no que diz respeito ao dimensionamento de equipamentos quanto a sua otimização e conservação de energia, bem como a caracterização de substâncias (PIETROBON et al., 1987).

1.1 - Objetivo

Este trabalho foi realizado com o objetivo de determinar as propriedades termofísicas: calor específico, massa específica, difusividade térmica e condutividade térmica da polpa de buriti.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Buriti

As palmeiras constituem-se em um dos grupos de plantas mais importantes para a região Amazônica por estarem diretamente relacionadas à subsistência do homem desta região. Entre as palmeiras mais utilizadas destaca-se a *Mauritia flexuosa* L., conhecida popularmente como buriti, é encontrada no seu estado silvestre em várias formações vegetais, principalmente em áreas de inundação permanente ou periódica, em agrupamentos mais ou menos homogêneos, sobre solos hidromórficos, formando populações quase mono-específicas, às quais se dá o nome de miritizais ou buritizais (STORTI, 1993; FERNANDES, 2001).

O termo buriti é a designação comum a plantas dos gênero *Mauritia*, *Mauritiella*, *Trithrinax* e *Astrocaryum*, da família das palmáceas, de folhas geralmente penatífidas e flabeliformes, coletadas para coberturas de casas rústicas e suas fibras na confecção de artesanatos bem diversificados. Caracteristicamente, são restritas a uma coroa terminal dispostas em leque, com três a cinco metros de comprimento e dois a três de largura, costapalmadas, com inserção espiral, lâmina reduplicada, segmentada até quase a porção basal, possuindo aproximadamente 200 segmentos foliares tesos ou pendulosos (KAHN, 1990; CAVALCANTE, 1991; HENDERSON et al., 1995; FERNANDES, 2001). Contudo o termo pode se referir ainda à *Mauritia flexuosa*, uma palmeira muito alta, nativa de Trinidad e Tobago e do Norte da América do Sul.

O habitat preferido do **buriti** é a várzea, no entanto, devido a sua ampla dispersão, pode-se inferir que esta espécie seja submetida a períodos de seca ocasionais. Mesmo plantas que vivem em comunidades muito úmidas como, por exemplo, florestas pluviais tropicais de locais baixos, podem experimentar estresses hídricos ao longo do dia e em anos mais secos serem submetidas a déficit de água severo (SCHULZE et al., 1987).

O buriti é um fruto ovóide cujo peso varia de 25 a 40 g, sendo 32% de polpa, 48% de casca e 20% de semente. Possui uma casca escamosa e vermelha que recobre uma massa oleaginosa de cor vermelho-amarelada e consistência amilácea e oleosa. O caroço é duro e lenhoso, separado da polpa por um envoltório celulósico. O teor de óleo na polpa seca é cerca de 20% (LORENZI, 1992).

A polpa de buriti pode ser congelada e conservada por mais de um ano, sendo utilizada praticamente da mesma forma que a polpa fresca. Tem-se ainda a produção de

óleos a partir da polpa e semente, fornecendo os óleos oléicos e láuricos, respectivamente. Os frutos do buriti podem produzir até 3,6 t/ha, quantidade maior que as de culturas como a soja, girassol e amendoim (LORENZI et al., 1996). O óleo é mais rico em betacaroteno, com 300 mg/100g, do que o óleo de dendê, com 98,5 mg/100g, e tem seu uso na medicina popular para queimaduras na pele, além de auxiliar na cicatrização, pode ser usado ainda para produzir sabão (YUYAMA et al., 1998). O óleo absorve radiações no espectro ultravioleta, sendo um eficiente filtro solar, tem sido empregado recentemente pela indústria cosmética entrando na composição de sabonetes, cremes e xampus.

De acordo com ALBUQUERQUE et al. (2005) o buriti caracteriza-se como um fruto relativamente ácido. Apresenta alto conteúdo de lipídios, o qual influencia significativamente na sua conservação e estabilidade. Tem, ainda, pelo seu valor nutritivo, sabor e aroma característico grandes perspectivas para o aproveitamento industrial na forma de doces, geléias, sorvetes e refrescos.

Na Tabela 2.1 são apresentadas às características químicas e físico-químicas da polpa de buriti.

Tabela 2.1 - Composição química e físico-química da polpa de buriti

Parâmetro	Valor
pH	4,58
Sólidos solúveis totais (°Brix)	2,10
Índice de refração	0,66
Acidez total titulável (% ácido cítrico)	0,58
Umidade (%)	72,93
Proteínas (%)	2,70
Lipídeos (%)	11,24
Cinzas (%)	0,98
Carotenóides (%)	2,10

Fonte: ALBUQUERQUE et al. (2005)

2.2 - Características físico-químicas

2.2.1 - Sólidos solúveis

Os sólidos solúveis indicam a quantidade, em gramas, dos sólidos que se encontram dissolvidos no suco ou polpa. São designados como °Brix, e tendem a aumentar com o estado de maturação, porém variam de acordo com os frutos. Os sólidos solúveis podem ser medidos no campo ou na indústria com o auxílio de refratômetro. São constituídos principalmente por compostos solúveis em água, que representam substâncias, tais como açúcares, ácidos, vitamina C e algumas pectinas (CHITARRA & CHITARRA, 1990).

De acordo com ARAÚJO et al.(2002) a análise do °Brix, na indústria tem grande importância no controle dos ingredientes a serem adicionados e na qualidade final do produto. A determinação do °Brix é realizada nas indústrias de doces, sucos, néctar, polpas, leite condensado, álcool, açúcar, sorvetes, licores e bebidas, etc

O °Brix nos frutos é muito importante, pois, quanto maior a quantidade de sólidos solúveis existentes, menor será a quantidade de açúcar a ser adicionada aos frutos, quando processados pela indústria, diminuindo, assim, o custo de produção e aumentando a qualidade do produto (RODRIGUES et al., 1977).

2.2.2 - Umidade

A água contida nos alimentos é excelente meio de transmissão de calor, sendo eficiente tanto para resfriar quanto para aquecer. Existe pelo menos dois tipos de água contida nos alimentos: a água livre, fracamente ligada ao substrato e que funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e as reações químicas; e a água combinada fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada, e que não é utilizada como solvente nem para o crescimento de microrganismos e nem para reações químicas (CASTRO et al., 1998).

A umidade corresponde à perda em peso sofrida pelo produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida. Na realidade, não é somente a água a ser removida, mas outras substâncias que se volatilizam nessas condições. O resíduo obtido no aquecimento direto é chamado de resíduo seco. O aquecimento direto da amostra a 105°C é o processo mais usual (BRASIL, 2005).

2.3 - Propriedades termofísicas

O conhecimento das propriedades termofísicas dos materiais biológicos, é de extrema importância para o correto dimensionamento das instalações e dos equipamentos necessários para manipulação, transporte e estocagem de polpas de frutas e no retardamento dos processos metabólicos e microbiológicos (SARRIA & HONÓRIO, 2004).

O uso das equações de transferência de calor e massa é condicionado à disponibilidade de dados sobre as características termofísicas dos materiais. Estimativas de dispêndios e trocas energéticas podem ser realizadas a partir dos valores de massa específica, difusividade térmica, calor específico e condutividade térmica dos materiais. ARAÚJO (2004).

2.3.1 - Calor específico

De acordo com MOHSEIN (1980), nos processos de transferência de calor, a que são submetidos os materiais biológicos, a variação de pressão é muito pequena. Portanto, utiliza-se o conceito de calor específico à pressão constante. Para se determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida nos processos de aquecimento e resfriamento, faz-se necessário conhecer o valor do calor específico dos alimentos. O conhecimento desse valor nos processos contínuos pode ter influência sobre as dimensões do equipamento.

O calor específico é uma propriedade termofísica definida como a quantidade de calor necessária para mudar a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um grau. O calor específico dos alimentos é significativamente afetado pela quantidade de água presente neste alimento e pelo estado físico desta água (LEWIS, 1993).

Diversos pesquisadores estudaram o comportamento dessa propriedade térmica com a variação do teor de água de vários materiais biológicos e observaram existir uma relação em que o aumento do teor de água provoca elevação dos valores de calor específico (ANDRADE et al., 2004; MOURA et al., 1998; SHARMA & THOMPSON, 1973).

Na determinação experimental do calor específico dos materiais biológicos pode-se utilizar o método das misturas. Neste método, uma amostra de massa e temperatura

conhecidas é introduzida em um calorímetro, que possui um fluido de massa e calor específico conhecidos, geralmente utiliza-se a água. Daí, o calorímetro é agitado até que seja obtido o equilíbrio térmico. Inicialmente, determina-se a capacidade calorífica do calorímetro, utilizando-se o balanço de calor da Equação 2.1 descrita em SILVA et al. (2002).

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{\text{cal}} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (2.1)$$

em que:

- C_1 e C_2 - calor específico da água (cal/g°C)
- m_1 - massa de água à temperatura ambiente (g)
- m_2 - massa de água refrigerada (g)
- C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro (cal/°C)

Na determinação do calor específico do produto, foi utilizada a Equação 2.2 descrita em SILVA et al. (2002).

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{\text{cal}} (T_5 - T_3) \quad (2.2)$$

em que:

- m_p - massa do produto (g)
- C_p - calor específico do produto (cal/g °C)
- C_1 - calor específico da água (cal/g °C)
- m_3 - soma das massas m_1 e m_2
- T_4 - temperatura inicial do produto (°C)
- T_5 - temperatura de equilíbrio (°C)

Na determinação do calor específico teórico, são utilizados valores de características químicas e físico-químicas do produto. Siebel (1982) citado por CHOI & OKOS (1986) desenvolveu uma equação para o cálculo do calor específico de produtos alimentícios com altos teores de água (Eq. 2.3).

$$C_p = (0,837 + 3,349 \cdot X_w) \quad (2.3)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

DICKERSON (1968) desenvolveu uma expressão (Eq. 2.4) que tem sido usada consideravelmente para produtos alimentícios com alto conteúdo de umidade. Essa equação tem sido usada com bastante frequência em sucos de frutas com conteúdo de água acima de 50%.

$$C_p = 1,675 + 2,512X_w \quad (2.4)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg°C)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

MANOHAR et al. (1991) desenvolveram uma equação para o cálculo do calor específico do suco de tamarindo (Eq. 2.5).

$$C_p = 4,18 + (6,839 \times 10^{-5} T - 0,0503) S \quad (2.5)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg°C)

S - sólidos totais (%)

T - temperatura (°C)

VIEIRA (1996) propôs a Equação 2.6 para estimar o calor específico teórico do suco de laranja.

$$C_p = 4,1713 - 0,02779B \quad (2.6)$$

em que:

C_p - calor específico (kJ/kg °C)

B - concentração (°Brix)

2.3.2 - Massa específica

A massa específica é uma propriedade física de extrema importância na caracterização, identificação e utilização de substâncias ou de materiais. Muitos processos químicos, tal como a fermentação, são controlados através da medida de massa específica (SILVA et al., 1990).

A medida da massa específica é também aplicada na determinação da concentração de soluções puras de açúcar em produtos açucarados, de álcool em bebidas alcoólicas, de sólidos solúveis em suco de tomate, em leite e de adulterações e textura de frutas (CECCHI, 1999).

De acordo com ALVARADO & ROMERO (1989) os dados da massa específica são necessários para projetar e avaliar equipamentos de processamento de alimentos, tais como evaporadores, bombas, filtros e misturadores, e servem ainda como índice de qualidade do produto final.

A determinação da massa específica em picnômetros é baseada na medida da massa da amostra em recipientes de volume conhecido, fornecendo resultados precisos, que são construídos e graduados de modo a permitir pesagem de volumes exatamente iguais de líquidos, a uma dada temperatura. Da relação estabelecida entre as massas e os volumes resulta a massa específica dos mesmos à temperatura de determinação (BRASIL, 2005).

ALVARADO & ROMERO (1989) desenvolveram equações para o cálculo da massa específica (ρ) de sucos e polpas de frutas em diferentes concentrações e temperaturas. A Equação 2.7 foi proposta para uma faixa de temperatura de 0 a 80 °C sendo aplicável a sucos e polpas de frutas em geral.

$$\rho = 1002 + 4,61 - 0,460T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3 \quad (2.7)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m³)

B - concentração (°Brix)

T - temperatura (°C)

CONSTENLA et al. (1989) obteve a Equação 2.8 para o cálculo da massa específica do suco clarificado de maçã.

$$\rho = \frac{\rho_w}{0,992417 - 3,7391 \times 10^{-3} B} \quad (2.8)$$

em que:

ρ_w - massa específica da água (kg/m^3)

B - concentração ($^{\circ}\text{Brix}$)

A Equação 2.9 foi desenvolvida por RAMOS & IBARZ (1998) para o cálculo da massa específica do suco de pêsego.

$$\rho = 1006,56 - 0,5155T + 4,1951B + 0,0135B^2 \quad (2.9)$$

em que:

ρ - massa específica (kg/m^3)

B - concentração ($^{\circ}\text{Brix}$)

T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

2.3.3 - Difusividade térmica

A difusividade térmica é uma das propriedades mais utilizadas no cálculo de transferência de calor por condução. A difusividade é a razão entre a habilidade em transferir calor e a capacidade de armazenar calor, e em situações em que a transferência de calor ocorre em regime transiente, a difusividade térmica dá uma medida de como a temperatura pode variar quando um material é submetido a uma situação de aquecimento ou resfriamento (LEWIS, 1993).

DINCER (1995) relatou que o significado físico da difusividade térmica está associado à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças da temperatura com o tempo. Um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência de calor dentro do produto e pouco tempo para o calor sair do corpo.

Utilizando condições de transferência de calor em regime transiente, DICKERSON (1965) construiu um aparato experimental que requer apenas dados de tempo-temperatura

que são necessários para os cálculos da difusividade térmica dos alimentos. Como a temperatura da amostra varia linearmente com o tempo, as dificuldades de satisfazer as condições de contorno são mínimas. Simultaneamente, a diferença de temperatura na qual a amostra é aquecida, permite o cálculo da difusividade térmica a partir de um único experimento (TELIS, 1992).

Nesta metodologia as condições necessárias são satisfeitas quando o termo geral $\frac{\partial T}{\partial t}$, na equação de transferência de calor, é constante (Eq. 2.10).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (2.10)$$

O aparelho de forma cilíndrica sugerido por DICKERSON (1965) permite a inserção dos termopares paralelos ao seu eixo ao longo de zonas de temperatura constante. Em coordenadas cilíndricas obtém-se a seguinte Equação 2.11:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (2.11)$$

Considerando-se $\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}$ igual a zero, para um cilindro longo, isolado nas extremidades, e se não são permitidos gradiente de temperatura paralelos ao eixo dos cilindros. Então, devido a ausência de ΔT 's ao redor da circunferência, pode-se considerar que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0$$

Logo:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.12)$$

Identificando a constante A, tem-se:

$$\frac{A}{\alpha} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.13)$$

A constante (A) é igual a velocidade de aquecimento em todos os pontos do cilindro. Como o gradiente da temperatura $\frac{\partial T}{\partial r}$ não é mais dependente do tempo, logo:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = \frac{A}{\alpha} \quad (2.14)$$

A solução será:

$$T = \frac{Ar^2}{4\alpha} + C_1 \ln(r) + C_2 \quad (2.15)$$

As condições de contorno a serem aplicadas na Equação 2.15, são:

$$T = A = T_s \quad (t > 0; r = 0) \quad (2.16)$$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \quad (t > 0; r = 0) \quad (2.17)$$

o que conduz a:

$$T_s - T_c = \frac{A}{4\alpha} (Rc^2 - r^2) \quad (2.18)$$

Considerando $r = 0$, tem-se:

$$T_s - T_c = \frac{ARc^2}{4\alpha} \quad (2.19)$$

Portanto,

$$\alpha = \frac{ARc^2}{4(T_s - T_c)} \quad (2.20)$$

em que:

α – difusividade térmica (m^2/s)

A – taxa constante de aquecimento ($^{\circ}C/s$)

Rc – raio do cilindro (m)

Ts – temperatura na superfície do cilindro de raio R (°C)

Tc – temperatura no centro do cilindro (°C)

VIEIRA (1996) utilizou o método de DICKERSON (1965) na determinação da difusividade térmica do suco de laranja, em diferentes concentrações, encontrando uma relação cúbica da difusividade térmica com a concentração.

$$\alpha = 1,4199 - 1,2637 \cdot 10^{-3} B + 5,5620 \cdot 10^{-5} B^2 - 1,4868 \cdot 10^{-6} B^3 \cdot 10^{-7} \quad (2.21)$$

em que:

α - difusividade térmica (m²/s)

B – concentração (°Brix)

RIEDEL (1969) verificou que a difusividade térmica de alimentos é fortemente dependente do conteúdo de água (X_w). A expressão que representa essa dependência é a Equação 2.22:

$$\alpha = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \times 10^{-6}) X_w \quad (2.22)$$

em que:

α - difusividade térmica (m²/s)

α_w – difusividade térmica da água (m²/s)

X_w – fração mássica da água (adimensional)

A Equação 2.23 foi proposta por TELIS-ROMERO et al. (1998), para o cálculo de difusividade térmica do suco de laranja.

$$\alpha = 7,9683 \cdot 10^{-8} + 5,9839 \cdot 10^{-8} \cdot X_w + 0,02510 \cdot 10^{-8} \cdot T \quad (2.23)$$

em que:

α - difusividade térmica (m²/s)

X_w – fração mássica da água (adimensional)

T – temperatura (°C)

2.3.4 - Condutividade térmica

A condutividade térmica de um material é a medida da sua capacidade para conduzir calor. Nos alimentos, a condutividade térmica depende principalmente da composição, mas também da presença de espaços vazios e de sua homogeneidade (RAO & RIVZI, 1994). Os valores numéricos da condutividade térmica podem variar de acordo com a composição química, estrutura física, estado, densidade, temperatura e teor de umidade do material.

De acordo PIETROBON et al. (1987), a condutividade térmica é um parâmetro fundamental em qualquer processo térmico, tanto no que diz respeito ao dimensionamento de equipamentos quanto a sua otimização e conservação de energia, bem como a caracterização de substâncias.

Existem vários métodos de determinação da condutividade térmica dentre eles os métodos de estado estacionário, que podem ser divididos em: método das placas paralelas, método do cilindro concêntrico e método da esfera concêntrica. Estes três métodos requerem uma solução de equações de transferência de calor para um regime de estado estacionário em coordenadas retangulares, cilíndricas e esféricas, respectivamente PARK (1997).

No método de estado estacionário, a temperatura constante é mantida em cada superfície da amostra teste. A razão constante de fluxo de calor, obtida após o equilíbrio, é medida para uma dada área seccional perpendicular ao fluxo e um gradiente de temperatura. Devido a sua simplicidade, este foi um dos primeiros métodos a serem utilizados para materiais biológicos (FREIRE, 1981).

No método de estado variável ou transiente, para determinar a condutividade térmica, utiliza-se de uma fonte linear de calor para gerar um fluxo de calor constante na amostra, a qual deverá estar inicialmente em equilíbrio térmico (MOHSENIN, 1980). Esse método apresenta algumas dificuldades como: medição da temperatura, localização dos termopares, transferência de calor convectiva em medições de propriedades térmicas de materiais granulares e controle da temperatura na amostra.

A lei de Fourier (Eq. 2.24) é conhecida como a equação fundamental de transferência de calor. Se há um gradiente de temperatura dT/dx , entre duas superfícies através do qual o calor flui, a quantidade de calor (q) irá fluir em uma unidade de tempo (t).

$$q = -k \frac{dt}{dx} \quad (2.24)$$

em que:

q – massa específica de fluxo de calor (kJ/s)

k – condutividade térmica (W/m°C)

dT/dx – gradiente de temperatura (°C/m)

Métodos empíricos de determinação da condutividade térmica tem sido empregados e um grande número de dados para produtos alimentícios foram determinados por meio de equações. Diversas equações foram desenvolvidas para a determinação da condutividade térmica, algumas destas equações são baseadas no teor de umidade, dos sólidos e na temperatura da amostra.

A equação apresentada por KOLAROV & GROMOV citada por SWEAT(1994) foi desenvolvida para suco de frutas.

$$k = 0,140 + 0,42X_w \quad (2.25)$$

em que:

k – condutividade térmica (W/m°C)

X_w – fração mássica da água (adimensional)

CONSTENLA et al. (1989) obtiveram a Equação 2.26 para o cálculo da condutividade térmica do suco clarificado de maçã.

$$k = 0,272928 - 3,5722 \cdot 10^{-3} B + 1,1357 \cdot 10^{-3} \quad (2.26)$$

em que:

k – condutividade térmica (W/m°C)

B – concentração (°Brix)

NJIE et al. (1998) desenvolveram a Equação 2.27 para o cálculo da condutividade térmica da banana.

$$k = 0,901 - 0,967 \exp(-0,014 \cdot M) \quad (2.27)$$

em que:

k – condutividade térmica experimental (W/m°C)

M – umidade (%)

TELIS-ROMERO et al. (1998), sugeriram a Equação 2.28 para a determinação da condutividade térmica do suco de laranja não clarificado.

$$K = 0,0797 + 0,5238 \cdot X_w + 0,000580 \cdot T \quad (2.28)$$

em que:

k – condutividade térmica experimental (W/m°C)

Xw – umidade (adimensional)

T – temperatura (°C)

3 - MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, no Centro de Tecnologia e Recursos Naturais no Campus I da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.1 - Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi polpa de buriti (*Mauritia flexuosa*, L.), proveniente do Município de Codó do Estado do Maranhão.

3.1.1 - Obtenção da polpa de buriti

Os buritis foram colhidos na palmeira quando os primeiros frutos começaram a se desprender dos cachos, esses cachos foram retirados, os frutos foram selecionados manualmente, para que fossem eliminados os frutos danificados. Os frutos selecionados foram envolvidos com lonas plásticas de cor preta durante um período de dois dias (48 horas), em seguida foram levados para tanques com água, onde permaneceram durante dois dias ou até que começassem a desprender a casca com facilidade (Figura 3.1).



Figura 3.1 - Fruto do buriti (PLANTAS DO SERRADO, 2007)

Os frutos selecionados foram pré-lavados em água corrente com o objetivo de eliminar sujeiras e resíduos aderidos nas frutas. A seguir os frutos foram lavados por imersão em recipiente plástico contendo solução de hipoclorito de sódio com concentração de 50 ppm, durante 15 minutos e posteriormente enxaguados em água corrente para retirar o excesso da solução de hipoclorito.

Posteriormente foi removida a polpa do fruto e foi adicionado um percentual de 20% de água em relação a massa total da amostra, para facilitar o despulpamento. A polpa assim despulpada foi congelada e transportadas em caixas de isopor via aérea para o LAPPa em Campina Grande. Ao chegarem ao laboratório às polpas foram descongeladas, homogeneizadas, reembaladas, recongeladas rapidamente por imersão em nitrogênio líquido e em seguida armazenadas em freezer até o momento da realização dos experimentos. Na Figura 3.2 são apresentadas as etapas para a obtenção da polpa de buriti.



Figura 3.2. Fluxograma das etapas realizadas para a obtenção da polpa de buriti

3.2 - Caracterização físico-química da polpa de buriti

3.2.1 - Sólidos solúveis (°Brix)

Os sólidos solúveis em °Brix foi determinado, por leitura direta, colocando-se uma gota da polpa no prisma de um refratômetro manual de marca ATAGO. A leitura realizada foi corrigida em relação a temperatura, utilizando-se a tabela contida no manual do Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

3.2.2 - Sólidos totais e umidade

Os sólidos totais e a umidade foram determinados pelo método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

3.3 - Propriedades termofísicas

3.3.1 - Calor específico

O calor específico das polpas de buriti foi determinado, em sextuplicata, utilizando-se um calorímetro de mistura, que consiste em uma garrafa térmica (frasco Dewar), com capacidade para 1.000 mL, envolvida em camada de 5 cm de isolante térmico (lã de vidro), inserida em uma carcaça de PVC. A garrafa era fechada com rolha de borracha, dotada de furo por onde era introduzida a haste de um termopar, com a finalidade de observar a temperatura interna. A Figura 3.3 apresenta o desenho do aparato utilizado.

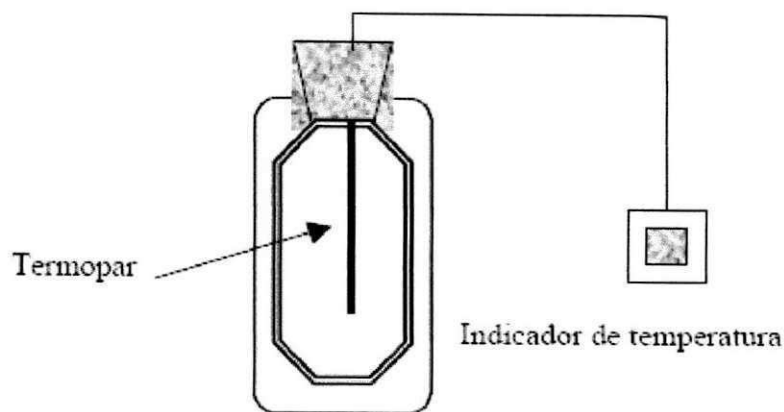


Figura 3.3 – Desenho esquemático do calorímetro

Inicialmente, determinou-se a capacidade calorífica do calorímetro, onde pesava-se uma massa de água (m_1) à temperatura ambiente (T_1). Em seguida, era adicionada uma massa de água resfriada (m_2) com uma temperatura de aproximadamente 2°C (T_2). Agitava-se o calorímetro e se registrava a massa m_3 e a temperatura T_3 no equilíbrio. Para determinar a capacidade calorífica do calorímetro, utilizou-se o balanço de calor da Equação 3.1

$$C_1 m_1 (T_1 - T_3) + C_{cal} (T_1 - T_3) = C_2 m_2 (T_3 - T_2) \quad (3.1)$$

em que:

C_1 e C_2 - calor específico da água ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)

m_1 - massa de água à temperatura ambiente (g)

m_2 - massa de água refrigerada (g)

C_{cal} - capacidade calorífica do calorímetro ($\text{cal}/^\circ\text{C}$)

Em seguida, acrescentava-se uma massa de amostra (m_p) que foi previamente embalada em saco de polietileno e imersa em banho a uma temperatura de 30°C até que atingisse a temperatura desejada (T_4), agitava-se o equipamento e media-se a temperatura no equilíbrio (T_5). Na determinação do calor específico do produto, utilizou-se a Equação 3.2:

$$m_p C_p (T_4 - T_5) = C_1 m_3 (T_5 - T_3) + C_{cal} (T_5 - T_3) \quad (3.2)$$

em que:

- m_p – massa do produto (g)
 C_p – calor específico do produto (cal/g°C)
 C_1 – calor específico da água (cal/g°C)
 m_3 – soma das massas m_1 e m_2
 T_4 – Temperatura inicial do produto (°C)
 T_5 – Temperatura de equilíbrio (°C)

Na determinação do calor específico teórico foram utilizadas as equações apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Equações para o cálculo do calor específico de alimentos

Produto	Equação	Fonte
Sucos de frutas	$C_p = 1,675 + 2,512X_w$	DICKERSON (1968)
Geral	$C_p = 0,837 + 3,349X_w$	SIEBEL (1982)
Suco de tamarindo	$C_p = 4,18 + (6,839 \times 10^{-5} \cdot T - 0,0503)S$	MANOHAR et al. (1991)
Suco de laranja	$C_p = 4,1713 - 0,02779 \cdot B$	VIEIRA(1996)

em que:

- C_p – calor específico (kJ/kg°C)
 X_w – fração mássica da água (adimensional)
 B – concentração (°Brix)
 S – sólidos totais (%)
 T – temperatura(°C)

3.3.2 - Massa específica

A massa específica, nas temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, da polpa de buriti foi determinada, em sextuplicata, utilizando-se um picnômetro de 25 mL, previamente calibrado com água destilada. O picnômetro com a amostra era colocado em um banho termostático até que atingisse a temperatura desejada. Depois era pesado em balança analítica com precisão de 0,0001g. O valor da massa específica (Eq. 3.1) foi obtido através da razão entre a massa da amostra e o volume do picnômetro.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

em que:

ρ – massa específica da amostra (kg/m³)

m – massa do produto (kg)

V – volume do picnômetro (m³)

Equações (Tabela 3.2) sugeridas por vários pesquisadores foram utilizadas para estimar os dados da massa específica teórica da polpa de buriti.

Tabela 3.2 – Equações para cálculo da massa específica em alimentos

Produto	Equação	Referência
Polpas e suco de frutas (geral)	$\rho = 1002 + 4,61B - 0,460 \cdot T + 7,001 \times 10^{-3} T^2 - 9,175 \times 10^{-5} T^3$	ALVARADO & ROMERO (1989)
Suco clarificado de maçã	$\rho = (\rho_w / 0,992417 - 3,7391 \times 10^{-3} \cdot B)$	CONSTENLA et al. (1989)
Suco de pêsego	$\rho = 1006,56 - 0,5155 \cdot T + 4,1951 \cdot B + 0,0135 \cdot B^2$	RAMOS & IBARZ (1998)

em que: ρ - massa específica (kg/m³); ρ_w - massa específica da água (kg/m³); B - concentração (°Brix); e T - temperatura (°C).

3.3.3 - Difusividade térmica

A difusividade térmica da polpa de buriti foi determinada em triplicata, de acordo com a metodologia proposta por DICKERSON (1965). O aparato utilizado consistia em um cilindro metálico com 2,45 cm de raio interno e 23,0 cm de comprimento interno útil, com rolhas de nylon nas extremidades para vedação. O cilindro tinha dois termopares, um

soldado à superfície externa e o outro inserido através do centro de uma das rolhas, de modo a aferir a temperatura no centro radial e em posição equidistante das extremidades.

O cilindro era preenchido com a polpa de buriti, adicionada de 1% de ágar para evitar a convecção natural. Em seguida o cilindro era imerso em banho termostático, onde era aquecido até a temperatura de 65 °C. As temperaturas na superfície e no centro do cilindro eram registradas em intervalos de 2 min. Na Figura 3.4 é mostrado o desenho esquemático do aparato utilizado.

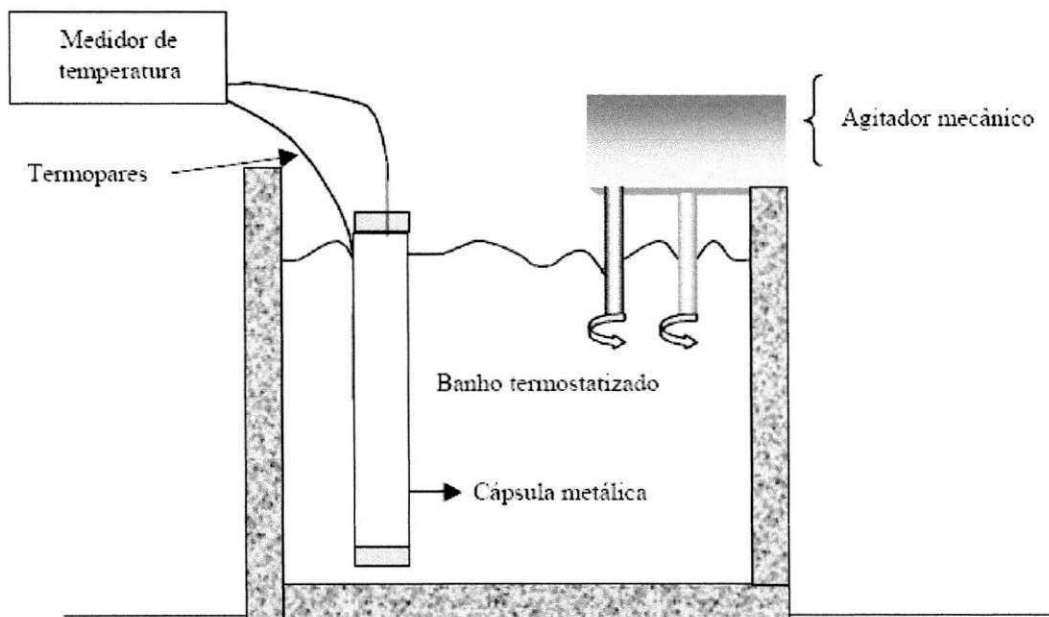


Figura 3.4 – Esquema utilizado para a determinação da difusividade térmica

Para os cálculos da difusividade térmica da polpa de buriti utilizou-se a Equação 3.2.

$$\alpha = \frac{ARc^2}{4(T_s - T_c)} \quad (3.2)$$

em que:

α – difusividade térmica (m²/s)

A – taxa constante de aquecimento (°C/s)

Rc – raio do cilindro (m)

Ts – temperatura na superfície do cilindro de raio R (°C)

Tc – temperatura no centro do cilindro (°C)

A difusividade térmica das amostras também foi estimada por meio de equações teóricas, apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Equações utilizadas no cálculo da difusividade térmica de produtos alimentícios

Produto	Equação	Referência
Alimentos em geral	$\alpha = 0,088 \cdot 10^{-6} + (\alpha_w - 0,088 \cdot 10^{-6}) X_w$	RIEDEL (1969)
Suco de laranja	$\alpha = 1,4199 - 1,2637 \cdot 10^{-3} B + 5,5620 \cdot 10^{-5} B^2 - 1,4868 \cdot 10^{-6} B^3 \cdot 10^{-7}$	VIEIRA (1996)
Suco de laranja	$\alpha = 7,9683 \cdot 10^{-8} + 5,9839 \cdot 10^{-8} \cdot X_w + 0,02510 \cdot 10^{-8} \cdot T$	TELIS-ROMERO et al. (1998)

em que:

α - difusividade térmica (m²/s)

T - temperatura (K; °C)

α_w - difusividade térmica da água (m²/s)

X_w - fração mássica da água (adimensional)

3.3.4 - Condutividade térmica

A condutividade térmica, em triplicata, da polpa de buriti foi determinada através da relação entre a difusividade térmica (α), o calor específico (C_p) e a massa específica (ρ), expressa através da Equação 3.3:

$$K = \alpha \rho C_p \quad (3.3)$$

em que:

k - condutividade térmica (W/m°C)

α - difusividade térmica (m²/s)

ρ - massa específica (m³)

C_p - calor específico (kg/°C)

Os valores teóricos de condutividade térmica da polpa de buriti também foram calculados a partir de equações da literatura apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Equações para cálculo da condutividade térmica em alimentos

Produto	Equação	Referência
Sucos de frutas	$k = 0,140 + 0,42X_w$	KOLAROV & GROMOV citados por SWEAT (1994)
Suco clarificado de maçã	$k = 0,272928 - 3,5722 \cdot 10^{-3} B + 1,1357 \cdot 10^{-3}$	CONSTENLA et al. (1989)
Banana	$k = 0,901 - 0,967 \exp(-0,014 \cdot M)$	NJIE et al. (1998)
Suco de laranja	$K = 0,0797 + 0,5238 \cdot X_w + 0,000580 \cdot T$	TELIS-ROMERO et al. (1998)

em que:

k – condutividade térmica experimental (W/m°C)

M – umidade (%)

X_w – umidade (adimensional)

T – temperatura (°C)

3.4. - Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando-se o programa ASSISTAT (SILVA & AZEVEDO, 2002). Os valores da massa específica foram avaliados utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado, com comparação entre médias pelo teste de Tukey. Também foi realizada a regressão na análise de variância para representar o comportamento da massa específica em função da temperatura.

As equações de regressão não linear para a difusividade térmica, foram obtidas através do programa STATISTICA.

3.5 - Erro Percentual

O erro percentual (Eq. 3.4) foi utilizado para avaliar a precisão dos ajustes obtidos através das equações propostas na literatura em relação aos valores determinados experimentalmente das propriedades termofísicas da polpa de buriti. A equação utilizada foi a seguinte:

$$\text{Erro(\%)} = \left| \frac{V_{\text{cal}} - V_{\text{exp}}}{V_{\text{exp}}} \right| \times 100 \quad (3.4)$$

em que:

V_{exp} – valor experimental

V_{cal} – valor calculado

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - Caracterização físico-química

Na Tabela 4.1 tem-se os valores das repetições do °Brix, do índice de refração e do °Brix corrigido da polpa de buriti e os seus respectivos valores médios, desvios padrão e coeficientes de variação (CV). ALBUQUERQUE et al. (2005) encontraram um valor muito inferior para a polpa de buriti em torno de 2,1°Brix.

Tabela 4.1 - Valores de °Brix para a polpa de buriti

Repetições	°Brix	I. de Refração	°Brix (corrigido)
1	8,5	1,3455	9,14
2	8,5	1,3455	9,14
3	8,5	1,3455	9,14
4	8,5	1,3455	9,14
5	8,0	1,3450	8,64
Média	8,4	1,3454	9,04
Desvio Padrão	0,2236	0,0002	0,22
Coef. de variação (%)	2,66	0,0166	2,47

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores experimentais das repetições dos sólidos totais e da umidade da polpa de buriti com os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação (CV). O coeficiente de variação (CV) obtido foi inferior a 10%, sendo considerado baixo e de alta precisão experimental (STORCK et al., 2000).

Tabela 4.2 - Valores dos sólidos totais e da umidade da polpa de buriti

Repetições	Sólidos totais (%)	Umidade (%)
1	22,7470	77,2530
2	22,9002	77,0998
3	22,6250	77,3750
4	22,7036	77,2964
Média	22,7440	77,2560
Desvio Padrão	0,03070	0,03070
Coef. de variação (%)	0,13500	0,03973

4.2 - Propriedades termofísicas

4.2.1 - Massa específica

Os valores experimentais das repetições obtidos para a massa específica da polpa de buriti nas cinco diferentes temperaturas e os valores médios são apresentados na Tabela 4.3. Observa-se uma diminuição da massa específica com o aumento da temperatura.

Tabela 4.3 - Massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m ³)						Média
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
10	1.051,70	1.048,47	1.050,91	1.049,74	1.048,01	1.051,06	1.049,98
20	1.046,84	1.043,90	1.045,52	1.043,34	1.047,28	1.047,93	1.046,22
30	1.041,71	1.044,96	1.044,14	1.044,24	1.040,60	1.043,3	1.043,16
40	1.029,99	1.031,29	1.030,22	1.029,83	1.030,98	1.029,43	1.030,27
50	1.023,86	1.019,30	1.023,62	1.020,99	1.019,27	1.019,64	1.021,11

Na Tabela 4.4 tem-se o resultado da análise de variância referente aos valores da massa específica da polpa de buriti para as diferentes temperaturas. Observa-se na análise

de variância que houve efeito significativo da temperatura a 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 4.4 - Análise de variância dos valores médios da massa específica da polpa de buriti

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Temperatura	4	3.495,3812	873,8453	370,0629 **
Resíduo	25	59,03357	2,3613	
Total	29	3.554,4148		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médios da massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas. De acordo com a análise estatística verifica-se que os valores da massa específica diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Os valores obtidos da massa específica diminuíram com o aumento da temperatura, apresentando na menor temperatura (10°C) um valor de 1.049,9820 kg/m³ e para a maior temperatura (50°C) um valor de 1.021,1130 kg/m³. ARAÚJO et al. (2002) ao determinarem a massa específica da polpa de cupuaçu integral nas temperaturas entre 10 a 50 °C encontraram valores variando entre 1.034,3 e 1.015,3 kg/m³, sendo inferiores ao da polpa de buriti.

Tabela 4.5 – Valores médios da massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Massa específica (kg/m ³)
10	1.049,9820 a
20	1.046,2220 b
30	1.043,1630 c
40	1.030,2730 d
50	1.021,1130 e

MG = 1.038,1507 kg/m³; DMS = 2,6085; CV (%) = 0,15

DMS - Desvio mínimo significativo; MG - Média geral; CV - Coeficiente de variação

Obs: As médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a nível de 5% de probabilidade

Na Tabela 4.6 tem-se a análise de variância dos dados da regressão polinomial da massa específica em função da temperatura. Verifica-se que as equações de regressão linear, quadrática e de 4º grau foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F, não sendo significativa a equação cúbica.

Tabela 4.6 - Regressão na análise de variância dos valores médios da massa específica da polpa de buriti em diferentes temperaturas

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Regressão linear	1	3257,68754	3257,68754	1379,5912 **
Regressão quadrática	1	182,42814	182,42814	77,2561 **
Regressão cúbica	1	5,50248	5,50248	2,3302 ns
Regressão de 4º grau	1	49,76306	49,76306	21,0741 ns
Temperatura	4	3495,38122	873,84531	370,0629 **
Resíduo	25	59,03357	2,36134	
Total	29	3554,41479		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); ns - não significativo ($p \geq 0,05$)

G.L. - Grau de liberdade; S.Q. - Soma dos quadrados; Q.M. - Quadrado médio dos desvios; F - Variável do teste

Na Tabela 4.7 são apresentadas as equações: linear e quadrática para o cálculo da massa específica da polpa de buriti em função da temperatura. Verifica-se que as equações propostas resultaram em excelentes ajustes apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,90, podendo-se utilizar-se qualquer uma na estimativa da massa específica da polpa de buriti.

Tabela 4.7 - Equações propostas para o cálculo da massa específica do buriti em função da temperatura

Equação	R ²
$\rho = 1060,26 - 0,7368 \cdot T$	0,9319
$\rho = 1049,94 + 0,1473 \cdot T - 0,0147 \cdot T^2$	0,9841

Em que: ρ - massa específica (kg/m³); e T - temperatura (°C).

Na Tabela 4.8 têm-se os valores teóricos da massa específica calculados por equações de diferentes autores. Verifica-se que os erros percentuais calculados a partir dos valores teóricos da massa específica em relação aos valores experimentais para os modelos propostos por ALVARADO & ROMERO (1989), RAMOS & IBARZ (1998) e CONSTENLA et al. (1989) são inferiores a 2,0%, sendo considerados satisfatórios podendo ser usados na estimativa da massa específica da polpa de buriti.

Tabela 4.8 - Valores teóricos da massa específica (kg/m³) para a polpa de buriti e os erros percentuais

Equação	Temperatura (°C)				
	10	20	30	40	50
Alvarado & Romero (1989)	1.036,94	1.032,48	1.028,01	1.023,55	1.019,086
Erro (%)	1,24	1,27	1,45	0,65	0,20
Constenla et al. (1989)	1.039,30	1.036,64	1.033,07	1.028,71	1.023,68
Erro %	1,02	0,88	0,97	0,15	0,25
Ramos & Ibarz (1998)	1.038,25	1.033,09	1.027,94	1.022,78	1.017,63
Erro(%)	1,12	1,22	1,46	0,73	0,34

Na Figura 4.1 tem-se a representação gráfica dos valores experimentais e dos valores teóricos da massa específica da polpa de buriti em função da temperatura. Observa-se diminuição da massa específica com o aumento da temperatura. Todas as equações testadas subestimaram os valores da massa específica, exceto para a massa específica na temperatura de 50 °C estimada pela equação de CONSTENLA et al. (1989). A equação

proposta por CONSTENLA et al. (1989) foi a que resultou nos valores teóricos da massa específica mais próximos dos valores experimentais.

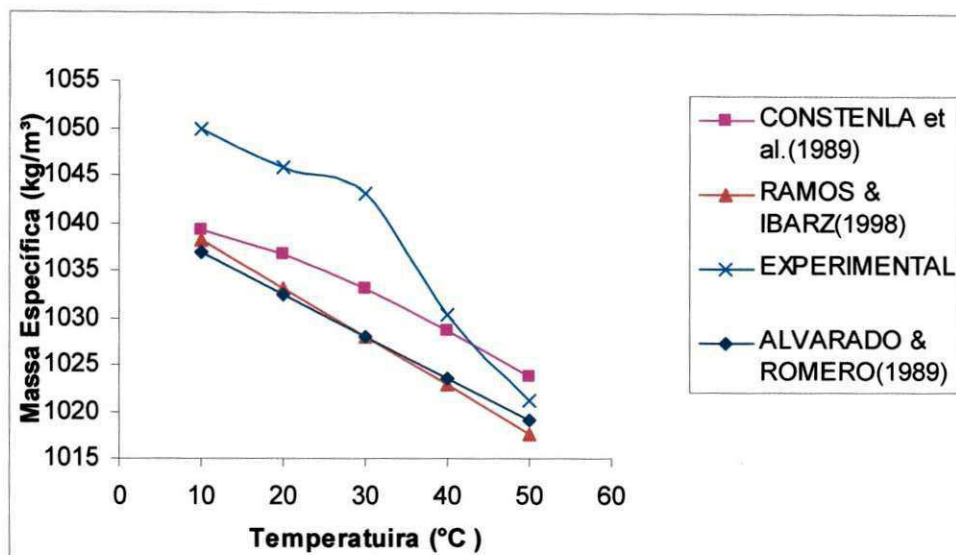


Figura 4.1 – Valores teóricos da massa específica em função da temperatura preditos por equações da literatura

4.2 - Calor específico

Na tabela 4.9 têm-se os valores experimentais do calor específico da polpa de buriti determinados em seis repetições (R_1 a R_6). Verifica-se que o coeficiente de variação (CV) foi menor do que 10%, sendo considerado, de acordo com a classificação de STORCK et al. (2000), como baixo e que o experimento foi de alta precisão. O valor médio do calor específico da polpa de buriti é próximo ao obtido por ALVARADO (1994) que foi de 2,962 kJ/kg °C para polpa de banana.

Tabela 4.9 - Valores experimentais do calor específico da polpa de buriti

Repetições	Calor específico (kJ/kg °C)
R₁	2,72
R₂	2,67
R₃	2,65
R₄	2,77
R₅	2,85
R₆	2,76
Média	2,74
Desvio Padrão	0,07
CV (%)	2,66

Na Tabela 4.10 têm-se os valores do calor específico determinados a partir de equações propostas por vários pesquisadores e os erros percentuais em relação ao valor experimental do calor específico da polpa de buriti. Das equações testadas verifica-se que a de SIEBEL (1992) e a de MANOHAR et al. (1991) foram as que resultaram nos menores erros e a de VIEIRA (1996) no maior erro (43,43%). Verifica-se também, que os valores teóricos preditos pelas equações são superiores aos experimentais. E, como todos os erros deram valores acima de 10% não se recomenda o uso destas equações na estimativa dos dados do calor específico da polpa de buriti.

Tabela 4.10 - Valores teóricos do calor específico para a polpa de buriti e os erros percentuais

Equação	Calor específico (kJ/kg °C)
Dickerson (1968)	3,62
Erro (%)	32,12
Vieira (1996)	3,93
Erro (%)	43,43
Siebel (1992)	3,42
Erro %	24,82
Manohar et al. (1991)	3,40
Erro(%)	24,09

4.2.3 - Difusividade térmica

Na Figura 4.2 têm-se os diagramas temperatura versus tempo (triplicata) utilizados para o cálculo da difusividade térmica da polpa de buriti.

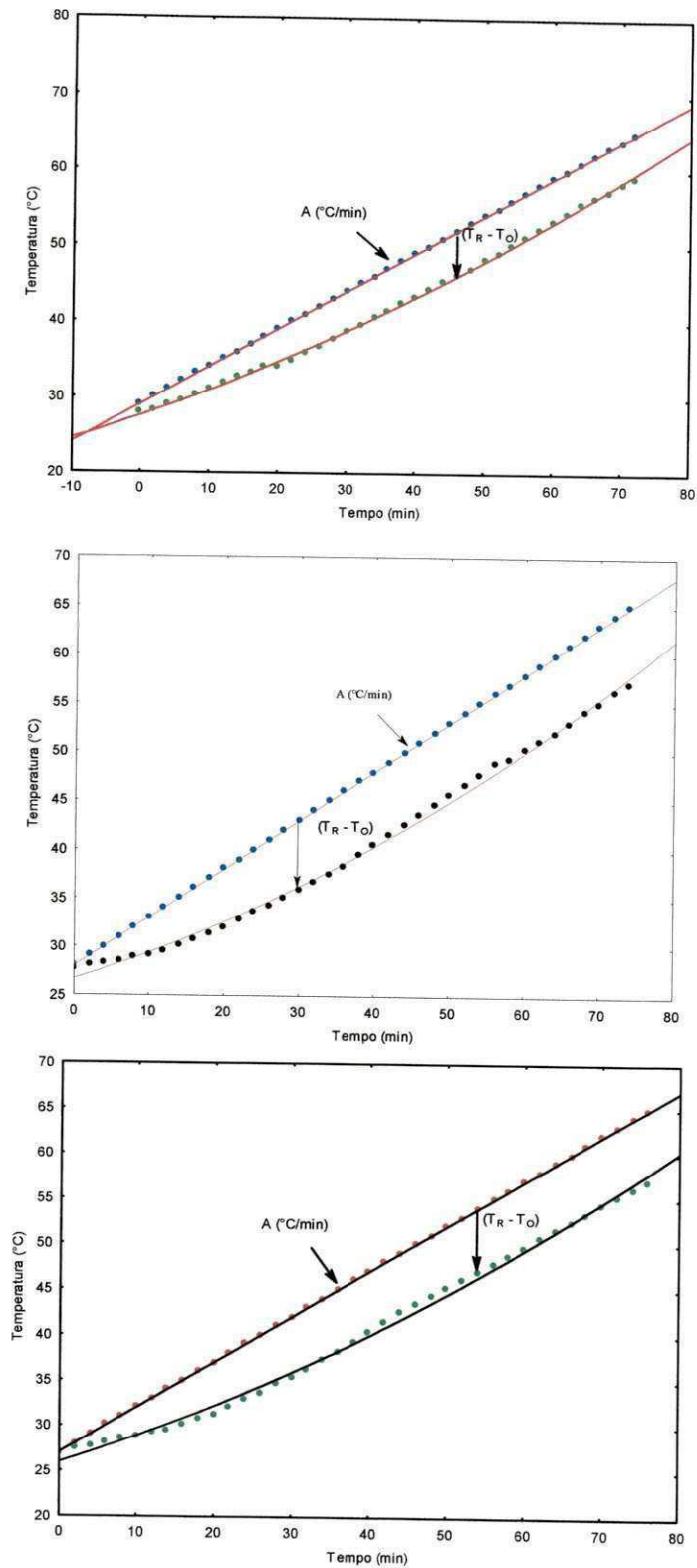


Figura 4.2 - Diagrama tempo-temperatura das três repetições para a determinação da difusividade térmica da polpa de buriti

Na Tabela 4.11 tem-se os valores das três repetições para a difusividade térmica da polpa de buriti. Verifica-se que o valor do coeficiente de variação situou-se abaixo de 10%, indicando alta precisão experimental (STORCK et al., 2000). A difusividade térmica média da polpa de buriti aproxima-se do valor determinados por MUNIZ et al. (2006) para a polpa de bacuri com 7,5°Brix que encontrou um valor médio de $1,763 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 4.11 - Valores experimentais da difusividade térmica da polpa de buriti.

Difusividade térmica (m^2/s)	
R ₁	$1,71 \times 10^{-7}$
R ₂	$1,66 \times 10^{-7}$
R ₃	$1,77 \times 10^{-7}$
Média	$1,71 \times 10^{-7}$
Desvio padrão	$0,06 \times 10^{-7}$
CV (%)	3,21

Na Tabela 4.12, têm-se os valores da difusividade térmica calculados a partir de equações apresentadas em literatura, como também os erros em relação às determinações experimentais. Observa-se que a equação de RIEDEL (1969) resultou no menor erro percentual, com 12,87% seguida pela equação de VIEIRA (1996) com erro de 17,54%. A equação de TELIS-ROMERO et al. (1998), apresentou o maior erro percentual, chegando a 22,22%. Estas equações apresentaram altos erros devendo-se evitar o seu uso na predição da difusividade térmica da polpa de buriti.

Tabela 4.12 - Valores teóricos da difusividade térmica (m^2/s) para a polpa de buriti e os erros percentuais

Equação	Difusividade térmica (m^2/s)
Riedel (1969)	$1,49 \times 10^{-7}$
Erro (%)	12,87
Vieira (1996)	$1,41 \times 10^{-7}$
Erro (%)	17,54
Telis-Romero et al. (1998)	$1,33 \times 10^{-7}$
Erro (%)	22,22

4.2.4 - Condutividade térmica

Na Tabela 4.13 têm-se os valores da condutividade térmica da polpa de buriti, observa-se que o coeficiente de variação foi inferior a 10% significando que o experimento foi de alta precisão (STORCK et al., 2000). Os resultados obtidos para a condutividade térmica estão na mesma faixa de valores apresentados por ALVARADO (1994) ao avaliar polpas de trinta espécies de frutas reportando valores entre 0,39 e 0,57 W/mK.

Tabela 4.13 - Valores experimentais da condutividade térmica da polpa de buriti

Condutividade térmica (W/m °C)					
R₁	R₂	R₃	Média	Desvio Padrão	CV (%)
0,489	0,474	0,506	0,487	0,017	3,42

Analisando-se a Tabela 4.14, observa-se que os menores erros percentuais foram os obtidos com as equações para sucos de frutas proposta por KOLAROV & GROMOV (1973) e para o suco de laranja proposta por TELIS-ROMERO et al. (1998), que foram respectivamente de 4,72 e 3,08%. Enquanto que o maior erro percentual encontrado foi com a equação proposta por CONSTENLA et al. (1989), de aproximadamente 50%, devendo ser evitado o uso desta equação e da equação proposta por NJIE et al. (1998) para

banana na predição da condutividade térmica da polpa de buriti, em razão de terem resultado em erros acima de 10%.

Tabela 4.14 - Valores teóricos da condutividade térmica (W/m °C) da polpa de buriti e os respectivos erros percentuais

Equação	Condutividade térmica (W/m°C)
Kolarov & Gromov (1973)	0,464
Erro (%)	4,72
Constenla et al. (1989)	0,244
Erro (%)	49,90
Njie et al. (1998)	0,573
Erro (%)	17,66
Telis-Romero et al. (1998)	0,502
Erro (%)	3,08

5 – CONCLUSÕES

Os valores experimentais da massa específica da polpa de buriti diminuíram com o aumento da temperatura. As equações da literatura utilizadas para o cálculo teórico da massa específica, resultaram em boas estimativas em relação aos valores experimentais. A massa específica da polpa de buriti em função da temperatura pode ser estimada por uma equação linear e quadrática.

O calor específico da polpa de buriti foi em média de $2,74 \pm 0,07$ kJ/kg °C.

O valor médio encontrado para a difusividade térmica da polpa de buriti foi de $1,71 \times 10^{-7}$ m²/s.

A condutividade térmica da polpa de buriti foi de $0,487 \pm 0,017$ W/m °C. As equações de Telis-Romero (1998) et al. e Kolarov & Gromov (1973) podem ser utilizadas na estimativa da condutividade térmica da polpa de buriti.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, L. D.; SALES, P. V. G.; PEDROSA, N. K. A.; MAGRO, P. C.; ANJOS, E. S. MUJICA, P. Y. C. Caracterização físico-química de buriti (*Mauritia flexuosa*, L.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-COLHEITA DE FRUTOS TROPICAIS (SBPCFT), 1., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2005. CD Rom.

ALVARADO, J. D. Propriedades físicas de frutas: IV. Difusividad y conductividad termica efectiva de pulpas. **Latin American Applied Research**, Bahía Blanca, v. 24, n. 1, p. 41-47, 1994.

ALVARADO, J. D.; ROMERO, C. H. Physical properties of fruits: I – Density and viscosity of juices as functions of soluble solids content and temperature. **Latin American Applied Research**, Bahía Blanca, v. 19, n. 15, p. 15-21, 1989.

ANDRADE, E. T.; COUTO, A. M.; QUEIROZ, D. M.; PEIXOTO, A. B. Determinação de propriedades térmicas de grãos de milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 488-498, 2004.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Massa específica de polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum.) sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 127-134, 2002.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçu com diferentes teores de sólidos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 1, p. 126-134, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1017 p.

CAVALCANTE, P. B. **Frutas comestíveis da Amazônia**. 5. ed. Belém: Edições CEJUP, 1991. 279 p.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análises de alimentos**. Campinas: UNICAMP, 1999. 212 p.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LEMAUGUER, M.; JELEN, M. **Food engineering and process applications: transport phenomena**. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. v. 1, cap. 9, p. 93-101.

CHOI, Y.; OKOS, M.R. The thermal properties of tomato juice concentrates. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, n. 1, p. 305-311, 1983.

CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 54, n. 3, p. 663-668, 1989.

DICKERSON, R.W. An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. **Food Technology**, Westport, v. 19, n. 52, p. 880-886, 1965.

DICKERSON, R.W. **Thermal properties of foods the freezing preservation of foods**. 4th ed. Westpoint: The AVI Publishing Company, v. 2, 1968.

DINCER, I. Thermal diffusivities of geometrical objects subject to cooling. **Applied Energy**, London, v.51, p.111-8, 1995.

DONADIO, L. C.; MÔRO, F. V.; SERVIDONE, A. A. **Frutas brasileiras**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. 288p.

FERNANDES, N. M. P. **Estratégias de produção e de estabelecimento de plântulas de *Mauritia flexuosa* L. f. (Palmae/Arecaceae) no Vale do Acre, Brasil**. 2001. 203 f. Tese (Doutorado em Botânica) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia INPA/Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

FREIRE, E. S. **Thermal properties of dry cocoa beans**. 1981. 122 f. M. Sc. Thesis - Cranfield Institute of Technolog, National College of Agricultural Engineering.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. **A field guide to the palms of the Americas**. New Jersey: Princeton University Press, 1995. 351 p.

KAHN, F. Clave para diferenciar los géneros de palmas em la Amazonia a partir del aparato vegetativo. **Bull. Inst. Fr. Etudes Andines**, v. 19, n. 2, p. 351-378, 1990.

LAU, K.A.; MARCH, K.V.L.; CUMMING, D.B. Physical properties of celery juice. **Canadian Agricultural Engineering**, Saskatoon, v. 34, n. 1, p. 105-110, 1992.

LEWIS, M. J. **Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993. 494 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 382 p.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; COSTA, J. T. M.; CERQUEIRA, L. S. C.; BEHR, N. von. **Palmeiras no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Plantarum, 1996. 352 p.

MANOHAR, B.; RAMAKRISHNA, P.; UDAYASANKAR, K. Some physical properties of tamarind (*Tamarindus indica* L) juice concentrates. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 13, n. 4, p. 241-258, 1991.

MOHSEIN, N. N. **Thermal properties of foods and agricultural materials**. New York: Gordon and Breach, 1980. 407 p.

MOURA, S. C. S. R.; GERMER, S. P. M.; JARDIM, D. C. P.; SADAHIRA, M. S. Thermophysical properties of tropical fruit juices. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 1, n. 1/2, p. 70-76, 1998.

MUNIZ, M. B.; QUEIROZ, J. A. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; DUARTE, M. E. M. Caracterização termofísica de polpas de bacuri. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 360-368, 2006.

NJIE, D. N.; RUMSEY, T. R.; SINGH, R. P. Thermal properties of cassava, yam and plantain. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 37, n.1, p. 63-76, 1998.

PARK, K.J., MURR, F.E.X., SALVADEGO, M. Construção de um sistema de medição da condutividade térmica pelo método da sonda linear. **Sociedade Brasileira de Ciência e tecnologia de Alimentos**. Campinas, 1996.

PEARSON, D. **The chemical analysis of food**. 6. ed. London: J. and A. Churchill, 1970. 452 p.

PEREIRA, E. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Propriedades termofísicas de polpa de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 17-24, 2003.

PIETROBON, C. L. R.; PEREIRA, N. C. E; FREIRE, J. T. Determinação da condutividade térmica: I – análise experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 15., 1987, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1987. v. 1, p. 150-161.

PLANTAS DO CERRADO. **Buriti**. Disponível em: < <http://biologo.com.br/plantas/cerrado/buriti.html> > Acesso em: 15 mar. 2007.

RAMOS, A. M.; IBARZ, A. Density of juice and fruit puree as a function of soluble solids content and temperature. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 35, n. 1, p. 57-63, 1998.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1994. 531 p.

RIEDEL, L. Measurements of thermal diffusivity of foodstuffs rich in water. **Kaltetechnik-Klimatisierung**, v. 21, n. 11, p. 315-316, 1969.

RIBEIRO, V.S.; SOBRAL, M. C.; AMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.1-6, 2002

SARRIA, S.D. ; HONÓRIO, S. L. Condutividade e difusividade térmica do figo (*Ficus carica* L.) “Roxo de Valinhos”, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.185-194, 2004.

SHARMA, D. K.; THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 16, n. 1, p. 114-117, 1973.

SIEBEL, J.E. Specific heat of various products. **Ice Refrig.**, v. 2, p. 256-257, 1982.

SILVA, R. R.; BOCCHI, N.; ROCHA FILHO, R. C. **Introdução a química experimental**. São Paulo: McGraw-Hill, 1990. 296 p.

SILVA, S. B. **Propriedades termofísicas de polpa de abacaxi**. 1997. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SILVA, M.; MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; PEDROZA, J. P.; NASCIMENTO, J. P. T. Resfriamento e propriedades termofísicas do cajá (*Spondias lutea* L.). **Revista de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 175-185, 2002.

SIMÕES, M. R. **Propriedades termofísicas de polpa de manga**. 1997. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas.

SINGH, R.P. Termal diffusivity in food processing. **Food Technology**, p. 87-91, 1982.

STORCK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação vegetal**. Santa Maria: UFSM, 2000. 198 p.

SWEAT, V. E. Thermal properties of food In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1994. cap. 3, p. 99-138.

TELIS, J. R. **Hidrodinâmica e transferência de calor do escoamento laminar de fluidos não-newtonianos em tubos**. 1992. Tese (Doutorado Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L.; YAMASHITA, F. Thermophysical properties of brasilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, Great Britain, v. 38, n. 1, p. 27-40, 1998.

VIEIRA, J.A.G. **Propriedades termofísicas e convecção no escoamento laminar de suco de laranja em tubos**. Campinas, 1996, 87 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Alimentos), Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

YUYAMA, L. K. O.; YONEKURA, L.; AGUIAR, J. P. L.; SOUSA, R. F. S. Biodisponibilidade dos carotenóides do buriti (*Mauritia flexuosa, l.*) em ratos. **ACTA AMAZÔNICA**, v. 28, n. 4, p. 409-415, 1998.