

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE  
PARA ESTIMATIVA DO AZIMUTE DE LINHAS  
DE PLANTIO DE CAFEEIROS**

**KLERISSON MILTON GONTIJO OLIVEIRA**

**2008**

**KLERISSON MILTON GONTIJO OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA  
ESTIMATIVA DO AZIMUTE DE LINHAS DE  
PLANTIO DE CAFEEIROS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Oliveira, Klerisson Milton Gontijo.

Desenvolvimento de um software para estimativa do azimute de linhas de plantio de cafeeiros / Klerisson Milton Gontijo Oliveira. – Lavras : UFLA, 2008.

66 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Luiz Gonsaga de Carvalho.

Bibliografia.

1. Radiação solar. 2. Cafeicultura irrigada. 3. Orientação de plantio. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.738  
– 620.00113

**KLERISSON MILTON GONTIJO OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA  
ESTIMATIVA DO AZIMUTE DE LINHAS DE  
PLANTIO DE CAFEIROS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em segunda-feira, 4 de agosto de 2008

Pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende UFLA

Prof. Dr. Marcos Aurélio Lopes UFLA

Pesquisadora Dra. Myriane Stella Scalco UFLA

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

por ser meu Criador, Salvador e Mantenedor;

**OFEREÇO**

Aos meus pais, Milton Mendes de Oliveira e Sônia Maria Gontijo de  
Oliveira, pelo amor sempre pleno e apoio incondicional;

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), através do Departamento de Engenharia, pela oportunidade de realização dos cursos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho, pela orientação, amizade e por sempre acreditar no meu potencial.

Ao professor Ph.D. Luiz Antônio Lima, pelas oportunidades concedidas, tanto acadêmicas quanto também profissionais.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Fátima Conceição Rezende, Dr. Marcos Aurélio Lopes e Dra. Myriane Stella Scalco, pela participação e sugestões em busca da melhoria desta dissertação.

Aos meus queridos amigos, que Deus me permitiu escolher como irmãos, por sempre me apoiarem com notável entusiasmo.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

***Obrigado!***

## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	iii
RESUMO.....	vi
ABSTRACT .....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 A cafeicultura no Brasil.....	3
2.2 Orientação da linha de plantio para a cultura do café.....	4
2.3 Sistema de coordenadas celestes.....	6
2.4 Trajetórias solares.....	10
2.5 Estimativa dos instantes do “nascer” e do “pôr do Sol” para superfícies inclinadas.....	13
2.6 Estimativa da radiação solar interceptada por superfícies inclinadas.....	20
2.7 Mapas de fluxo de radiação solar no território brasileiro.....	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Desenvolvimento do <i>software</i> AziPlant.....	30
3.2 Correção do horário.....	30
3.3 Radiação solar direta interceptada por uma superfície inclinada.....	31
3.4 Radiação solar interceptada pelas faces da linha de plantio.....	34
3.5 Convenção de orientação para o azimute da linha de plantio.....	42
3.6 Cálculo do azimute para a linha de plantio.....	43
3.7 Análise de sensibilidade do parâmetro adimensional de poeiras.....	43
3.8 Teste do <i>software</i> AziPlant.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1 Descrição do <i>software</i> desenvolvido.....	46
4.2 Análise da estimativa da radiação solar direta.....	58

4.3 Resultados experimentais .....	59
4.4 Azimute estimado com o <i>software</i> AziPlant.....	61
4.5 Azimute da linha de plantio .....	62
5 CONCLUSÕES .....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo de incidência dos raios solares diretos com a normal à superfície;
$i$	Ângulo de inclinação da superfície, variando de $0^\circ$ a $90^\circ$ ;
$\rho$	Ângulo formado pela reta que liga os ápices de dois valores de $Y$ sucessivos;
$H$	Ângulo horário correspondente ao “nascer” e ao “pôr do sol” no plano horizontal local;
$h$	Ângulo horário do Sol;
$Z$	Ângulo zenital;
$h_1, h_2$	Ângulos horários representativos aos instantes em que a direção dos raios solares diretos tangencia a superfície inclinada;
$\psi'$	Azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao sul, variando de $0^\circ$ a $\pm 180^\circ$ , positivo a oeste e negativo a leste;
$\alpha_p$	Azimute de plantio;
$\alpha_s$	Azimute solar;
$S$	Constante solar;
$\delta$	Declinação solar;
$DJ$	Dia juliano;
$\gamma_s$	Elevação solar;
$FH$	Fuso horário civil vigente no local;
$Hora$	Hora local marcada no relógio da estação meteorológica (horário civil);

$j$	Hora solar verdadeira;
$J_{mud}$	Horário do instante de mudança de face da linha de plantio;
$\alpha$	Índice de refletividade da superfície;
$td$	Intervalo de tempo entre os valores registrados pela estação meteorológica automática;
$\phi$	Latitude do local;
$long$	Longitude do local;
$m$	Massa ótica da atmosfera;
$Aa$	O que falta de radiação direta a ser integralizada;
$d$	Parâmetro adimensional de poeiras;
$P$	Pressão atmosférica;
$es$	Pressão de saturação de vapor d'água na atmosfera;
$ea$	Pressão parcial de vapor d'água na atmosfera;
$W$	Quantidade de água precipitável na atmosfera, na direção zenital;
$R_{0i}$	Radiação direta interceptada acumulada entre dois tempos consecutivos de dados da estação meteorológica ( $\text{kJ m}^{-2}$ );
$I_d$	Radiação solar difusa sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );
$R_{0f^{1dia}}, R_{0f^{2dia}}$	Radiação solar direta acumulada interceptada pelas faces da linha de plantio em um dia ( $\text{kJ m}^{-2}$ );
$Rac_{dia}$	Radiação solar direta interceptada acumulada durante o período de um dia;
$I_{0i}$	Radiação solar direta sobre a superfície inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ );

$I_0$	Radiação solar direta sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );
$I_i$	Radiação solar sobre a superfície inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ );
$T$	Temperatura do ar;
$Xh$	Termo de correção entre a hora solar e a hora do relógio;
$\tau$	Transmitância atmosférica;
$K$	Valor da função $\cos(\phi)$ para o referido ângulo horário $\bar{h}$ ;
$Y$	Valor da ordenada em um ponto da curva de radiação ;
$\bar{h}$	Valor intermediário no intervalo de $h_1$ e $h_2$ ;
$\left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2$	Expressão de cálculo da distância relativa entre a Terra e o Sol, em razão da excentricidade da órbita terrestre ( $\bar{D}$ é a distância média Terra-Sol e $D$ é a distância instantânea Terra-Sol);
$R_{0f_1total}, R_{0f_2total}$	Radiação solar direta acumulada interceptada pelas faces da linha de plantio em um período maior que um dia ( $\text{kJ m}^{-2}$ ).

## RESUMO

OLIVEIRA, Klerisson Milton Gontijo. **Desenvolvimento de um software para estimativa do azimute de linhas de plantio de cafeeiros.** LAVRAS: UFLA, 2008. 66p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)\*

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um *software* capaz de recomendar o azimute adequado para implantação de lavouras de café realizando a estimativa da radiação solar direta interceptada pela área a ser cultivada e também as estimativas dos períodos de exposição à radiação direta em cada face da linha de plantio, quantificando então, para cada possível azimute, os acumulados de radiação solar direta interceptada por cada face de uma linha de plantio, indicando assim o azimute que promoveria a homogeneização de interceptação de radiação solar direta. A fim de testar o *software*, foram coletados dados de produção em uma área experimental de café irrigado por pivô central na Fazenda São Thomé, em Pirapora-MG, em plantas orientadas com os azimutes de plantio iguais a 45°, -90°, -45° e 0°. Conforme resultados experimentais obtidos, as melhores direções foram, sucessivamente, os azimute iguais a -45° e 0°. O *software* AziPlant recomenda o azimute -24° 16' como sendo a melhor alternativa para o plantio. Como tal direcionamento está entre os direcionamentos -45° e 0°, tal resultado condiz com os resultados obtidos em campo. Com isso, o *software* AziPlant é apresentado como uma importante ferramenta na tomada de decisões relativas à recomendação da orientação da linha de cultivo da lavoura de café.

---

\* Comitê Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho - UFLA (Orientador), Prof. Ph.D. Luiz Antônio Lima – UFLA e Prof. Dr. João Carlos da Rocha Medrado – UFG.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Klerisson Milton Gontijo. **Development of software to estimate the azimuth of coffee planting lines.** LAVRAS: UFLA, 2008. 66p. (Dissertation – Master Program in Agricultural Engineering)\*

This research developed a software tool to recommend the best planting direction through estimation of solar radiation intercepted by the cultivated coffee plants as well as the solar radiation exposition periods for each side of plant rows to obtain homogeneity for solar radiation on both sides of plant rows. To test the software, data collected by automatic weather station at São Thome farm, in Pirapora-MG/Brazil, were used. Planted coffee rows at 45°, -90°, -45° and 0° azimuths (true North) were tested. According to results obtained, the best direction was -45°, followed by 0°. The software AziPlant estimated the azimuth -24° 16' as the best alternative for planting. Since this direction is at the range -45° to 0°, such result is in agreement with plant solar burning observed at the field. The AziPlant software can be considered as an important tool for decisions related to planting directions of coffee plant rows.

---

\* Guidance Committee: Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho - UFLA (Major Professor), Prof. Ph.D. Luiz Antônio Lima – UFLA and Prof. Dr. João Carlos da Rocha Medrado – UFG.

# 1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira historicamente tem relevante importância econômica e social. Atualmente os cultivos de café no Brasil se expandem para o cerrado, com áreas planas e mecanizáveis, embora menos férteis e com escassez hídrica, como o cerrado mineiro e o oeste baiano. Assim, o uso da irrigação suplementar tem se mostrado promissora nessas localidades. Além de permitir o cultivo do café em áreas pouco exploradas, a irrigação no cafeeiro promove incrementos significativos de produtividade.

No cultivo do café, no qual tradicionalmente se obedece ao plantio em nível, ou mesmo nos plantios circulares irrigados sob pivô central, tem-se observado, mesmo que empiricamente, considerável variação da produtividade nas diferentes faces da linha de plantio. Essa heterogeneidade pode ser atribuída aos diferentes níveis de energia radiante interceptada por faces opostas numa linha de plantio. Tal fato leva à necessidade de se determinar uma melhor orientação da linha de plantio que possibilite uma interceptação mais homogênea de radiação solar.

Outra questão agravante no que se refere à intensidade de radiação interceptada é o efeito da escaldadura. Segundo SANTINATO et al. (1996) a escaldadura, que é a descoloração foliar, ocorre notadamente na face da linha de plantio voltada para o “sol da tarde” em regiões de cerrado.

Espera-se que, quantificando para cada possível ângulo de orientação da linha de plantio da lavoura de café a ser implantada, a radiação solar direta interceptada pelas duas faces das respectivas linhas de plantio, avaliando qual ângulo de orientação, chamado de azimute, geraria a menor diferença de radiação interceptada pelas duas faces, sendo este ângulo então o azimute adequado para a implantação da lavoura de café em questão, o qual

proporcionaria homogeneidade energética para a planta, a fim de minimizar escaldadura das folhas e maximizar produtividades.

Existem diversos *softwares* aplicados à cafeicultura, contudo, ao que parece, ainda nenhum foi disponibilizado com a finalidade de auxiliar o produtor na implantação de sua lavoura no tocante ao azimute de plantio adequado.

Sendo assim, com o propósito de subsidiar ao cafeicultor na implantação da lavoura de café em uma direção de linha de plantio, tal que promova a minimização de uma possível escaldadura devido ao excesso de radiação interceptada, e também auxiliar na homogeneização da produção na planta de café, em função da homogeneização da interceptação da radiação da mesma, este trabalho teve por objetivo geral:

- desenvolver um software capaz de recomendar o azimute adequado para implantação de cafeeiros.

Especificamente, pretendeu-se ainda:

- investigar, sob o ponto de vista teórico, o ângulo de orientação adequado para a implantação de lavoura de café;
- ajustar modelos matemáticos para a confecção de uma metodologia capaz de estimar o azimute de plantio de cafeeiros que possibilite a distribuição homogênea da radiação solar interceptada nas duas faces da linha de cultivo;
- testar o *software* desenvolvido fazendo comparações com resultados de pesquisas realizadas em cafeeiro irrigado.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 A cafeicultura no Brasil**

O Brasil é o maior produtor mundial de café e o segundo maior mercado consumidor. A produção nacional estimada, na safra 2006/2007, foi de 41,57 milhões de sacas de 60 kg do produto beneficiado. As regiões centro-sul são as maiores produtoras (AGRIANUAL, 2007).

As principais espécies de café de valor comercial cultivadas no Brasil são o café arábica (*Coffea arabica* L.) e o café robusta (*Coffea canephora* L.). Desde 1727, quando as primeiras plantas de cafeeiros foram introduzidas no Brasil, em Belém, no Estado do Pará, essa cultura tornou-se uma das principais atividades agrícolas do país. A partir daí a cultura avançou para os estados vizinhos, para o sul do País nas décadas de 1920 e 1930 e o estado de Rondônia em 1975.

Em Minas Gerais a cafeicultura foi introduzida na Zona da Mata, por volta de 1830. Por muito tempo essa região responsabilizou-se pela parcela mais representativa da produção de café no Estado (GOMES, 1988).

Conforme ANDRADE (1994), com o passar do tempo, a cafeicultura expandiu-se para outras regiões do Estado, vindo a se estabelecer com sucesso no Sul de Minas, principalmente nas fronteiras com as regiões cafeeiras de São Paulo. Posteriormente, principalmente devido à prática da irrigação, a cultura do café avançou para o cerrado brasileiro.

O cafeeiro, historicamente, foi cultivado em áreas com condições edafoclimáticas favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento. Contudo, essa cultura atualmente pode ser cultivada em diversas regiões devido ao melhoramento genético e também ao uso da irrigação. O seu cultivo vem sendo cada vez mais incorporado a áreas planas e mecanizáveis, embora menos férteis

e com escassez hídrica, a exemplo o cerrado mineiro e o oeste baiano. Assim, o uso da irrigação suplementar tem se mostrado uma prática promissora nessas localidades (FARIA et al., 2001). Além de permitir o cultivo do café em áreas restritivas, essa técnica promove incrementos significativos de produtividade.

## **2.2 Orientação da linha de plantio para a cultura do café**

MATIELLO et al. (2005) recomendaram que o plantio do café em áreas onduladas ou declivosas seja feito aproximadamente em nível, para facilitar o controle à erosão. Em áreas de chapada, quase planas, e em grandes plantios nos quais a prioridade é a mecanização, a marcação do cafezal objetiva, prioritariamente, o trânsito do maquinário. Nesse caso, mesmo com algum desnível, é preferível traçar linhas de plantio longas, o que reduzirá as manobras principalmente das máquinas de colheita.

Em regiões mais quentes ou mais secas, nas condições de chapada, também é indicado localizar as linhas na direção do caminamento do sol, evitando o efeito do sol da tarde na lateral dos cafeeiros, que causa escaldaduras de folhas, seca de ramos e perda de produção. Recomendam ainda que nas áreas com irrigação por pivô central, áreas plano-onduladas, o plantio seja em linhas circulares, para economia de água e mão-de-obra.

Estes mesmos pesquisadores realizaram um trabalho de pesquisa no triângulo mineiro, o qual mostrou que a maior produtividade dos cafeeiros foi obtida nas linhas com direção sudoeste-noroeste, com ângulo de 135-315° em relação ao norte verdadeiro. No oeste da Bahia, igualmente, houve influência do posicionamento das linhas de cafeeiros nas suas produtividades. Os melhores resultados foram obtidos com 90-270° e 135-315°.

Segundo SANTINATO et al. (1996), no cultivo do café arábica em regiões, cuja temperatura média anual é em torno de 23°C, pode haver redução de crescimento no período do verão e surgir sintomas intensos de descoloração

foliar, denominado “escaldadura”, notadamente na face da linha de plantio exposta ao “sol da tarde” (região do Cerrado) sempre que o alinhamento predominante da lavoura for leste-oeste. Já em alguns estados do Nordeste brasileiro (Ceará, Pernambuco e algumas áreas da Bahia) esse sintoma ocorre na planta toda. No caso de escaldadura lateral, pulverizações com antitranspirante (açúcar e outros) diminuem os sintomas. No Nordeste, o sombreamento parcial (arborização) é recomendado. Para regiões cuja temperatura média anual é em torno de 26°C ou mais, os mesmos sintomas podem surgir para o café robusta sendo, porém, bastantes raros nessa espécie.

FERNANDES et al. (2001) estudaram a produtividade do cafeeiro cultivado em diversos ângulos de plantio, sendo a lavoura irrigada por pivô central na Fazenda Agronol, no Município de Luiz Eduardo Magalhães – BA, em área com declividade de 1% num solo franco-argilo-arenoso. A implantação da lavoura foi em dezembro de 1997. Instalaram um trabalho em lavoura do cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, no espaçamento de 3,80 x 0,50m e com 5 anos de idade – 3ª safra, com coleta em 10 posições de 18 em 18° de azimute com 4 repetições. Neste trabalho caracterizaram os ângulos de 298° e 316° como os que apresentaram maior produtividade. Na TABELA 1 são apresentados os resultados obtidos na safra de 2001. Não se sabe se houve definição estatística.

TABELA 1 - Produtividade do café de acordo com a orientação da linha de plantio cultivada sob irrigação no ano de 2001

Tratamento		Colheita		
		Produtividade		
		(sacas beneficiadas/há)		
		2001		
		A	B	Total
I	226°	34	25	59
II	244°	36	27	64
III	262°	30	23	53
IV	280°	33	26	59
V	298°	40	28	68
VI	316°	39	31	69
VII	334°	40	34	74
VIII	352°	32	27	59
IX	10°	23	27	50
X	28°	22	29	51

A – lado externo e B – lado interno das linhas em relação ao pivô central.

Fonte: FERNANDES et al. (2001).

### 2.3 Sistema de coordenadas celestes

Os sistemas de coordenadas celestes possibilitam identificar a posição do Sol em relação à Terra em qualquer instante do dia, para qualquer dia do ano. Inicialmente ver-se-á o conceito de esfera celeste. Trata-se de uma esfera de diâmetro tão grande quanto se queira imaginar, na superfície da qual os astros (Sol, Lua, estrelas...) estariam localizados, e cujo centro coincide com o centro da Terra. Em relação à esfera celeste, a Terra é um simples ponto. Os pontos e planos usados para definir as coordenadas celestes são obtidos prolongando-se os eixos e os planos (paralelos e meridianos) terrestres até interceptarem a esfera celeste. Obtêm-se dessa maneira, os pólos celestes Norte e Sul, bem como os meridianos e os paralelos celestes (Figura 1). Nesta figura, a Terra é bastante ampliada, por razões didáticas.



FIGURA 1 - A esfera celeste.

Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br>.

Vários sistemas de coordenadas existem para identificar a posição de um astro na esfera celeste. No sistema equatorial, as coordenadas que definem a posição do astro são a ascensão reta e a declinação. A ascensão reta é o ângulo, medido no equador celeste, entre a projeção do raio vetor do astro (vetor que liga o centro da Terra ao astro) e o vetor posição do ponto vernal (vetor que liga o centro da Terra ao ponto vernal). Ponto vernal é um ponto do equador, ocupado pelo Sol no equinócio de primavera do hemisfério norte (mais ou menos em 22 de março de cada ano). A ascensão reta varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  e é medida no sentido da rotação da Terra. A declinação do astro, por outro lado, é o

ângulo entre o raio vetor do astro e o plano equatorial celeste. Varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , sendo considerada positiva quando o astro se encontra no hemisfério norte celeste, e negativa quando o astro se encontra no hemisfério sul celeste. No caso do astro em consideração ser o Sol, a declinação varia de  $0^\circ$  a  $+23^\circ 27'$  (Sol no hemisfério norte celeste), e de  $0^\circ$  a  $-23^\circ 27'$  (Sol no hemisfério sul celeste).

Um outro sistema bastante usado é o sistema horizontal, tendo como coordenadas celestes a elevação (ou altura) do astro e o seu azimute. Para caracterizar esse sistema, prolonga-se o raio terrestre que passa pelo local onde se encontra o observador até que ele perfure a esfera celeste. Assim ter-se-ão a vertical local e o zênite, pontos nos quais a vertical do lugar intercepta a esfera celeste, acima da cabeça do observador. A vertical do lugar é definida por um fio a prumo. O plano perpendicular à vertical local é o plano do horizonte local.

Esse é o plano que a vista de uma pessoa alcança quando ela gira  $360^\circ$  em torno de si mesma. Naturalmente ela se abstrai das irregularidades da superfície onde se encontra (montanhas, depressões etc.); é como se passasse pelos seus pés um plano tangente à superfície da Terra, tal que, ereta, teria o zênite acima de sua cabeça. O rebatimento dos pólos celestes no plano do horizonte local identifica os pontos cardeais norte e sul. Conseqüentemente, uma reta no plano do horizonte, perpendicular à linha norte-sul identifica os pontos cardeais leste e oeste.

Na Figura 2 é ilustrado o astro (Sol) na esfera celeste, em relação ao plano do horizonte local. Nessa figura são mostradas as coordenadas horizontais que identificam a posição do astro, isto é, a elevação e o azimute. A elevação, ou altura solar ( $\gamma_s$ ), é o ângulo que o raio vetor do Sol (vetor que liga o centro da Terra ao astro) faz com o plano do horizonte local, variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . O azimute solar ( $\alpha_s$ ) é o ângulo entre a projeção do raio vetor do Sol no plano do horizonte local e a linha norte-sul, onde, para este trabalho, adotou-se como

referência o norte, sendo contado de 0° a 360° no sentido horário, conforme ilustrado na figura a seguir. A região em cinza é o plano do horizonte local.

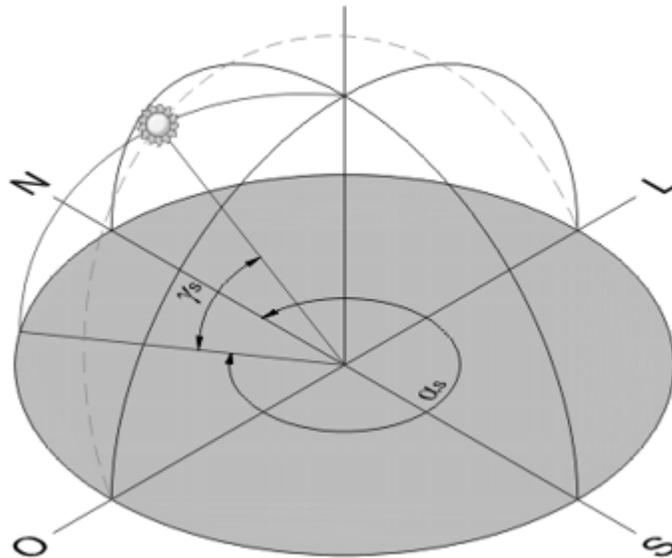


FIGURA 2 - Coordenadas celestes do sistema horizontal.

Para se estimar o azimute do Sol pode-se utilizar a seguinte equação, proposta pela ABNT (2003):

$$\alpha_s = \arccos\left(\frac{\cos(\phi) \cdot \sin(\delta) + \sin(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(15 \cdot j)}{\cos(\gamma_s)}\right) \quad (01)$$

Em que,

$\alpha_s$  é o azimute do Sol (rad);

$\phi$  é a latitude do local (rad);

$\delta$  é a declinação solar (rad);

$j$  é a hora solar verdadeira (h);

$\gamma_s$  é a elevação solar (rad).

Para que  $\alpha_s$  assuma sua ordem de grandeza absoluta, com variação entre  $0^\circ$  e  $360^\circ$ , aplicam-se os ajustes seguintes:

$$\alpha_s = \alpha_s \quad \text{para } j \leq 12 \text{ horas} \quad (01a)$$

$$\alpha_s = 360^\circ - \alpha_s \quad \text{para } j > 12 \text{ horas} \quad (01b)$$

A elevação solar  $\gamma_s$  é dada pela seguinte equação:

$$\gamma_s = \arccos \left( \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) - \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot 15}{180} \cdot j \right) \right) \quad (02)$$

## 2.4 Trajetórias solares

A Terra realiza em relação ao Sol dois movimentos; o primeiro, de rotação ao redor de seu próprio eixo que passa pelos seus pólos e que faz com que um ponto de sua superfície seja iluminado periodicamente pelo Sol, originando o dia e a noite; o segundo, de translação ao redor do Sol, permanecendo o eixo terrestre inclinado à normal ao plano que contém a órbita terrestre (plano da eclíptica), provocando um aquecimento desigual dos hemisférios ao longo do ano, originando as estações climáticas (Figura 3).



FIGURA 3 - Movimento de translação da Terra originando as estações climáticas ao longo do ano. As datas referem-se às datas do início das estações no hemisfério norte.

Fonte: <http://www.eb23-gois.rcts.pt/estmeteo/livSol.htm>.

Como resultado destes dois movimentos, para um observador na Terra, o Sol descreve trajetórias aparentes no céu, que variam dia-a-dia.

Uma das maneiras mais didáticas de representar as trajetórias aparentes do Sol é através da projeção estereográfica sobre o plano do horizonte, o que permite visualizar no plano as diferentes posições do Sol, hora a hora, durante todo o ano. A Figura 4 (a e b) ilustra a projeção estereográfica resultante para as latitudes extremas que existem no Brasil ( $0^{\circ}$  e  $33^{\circ}$  S).

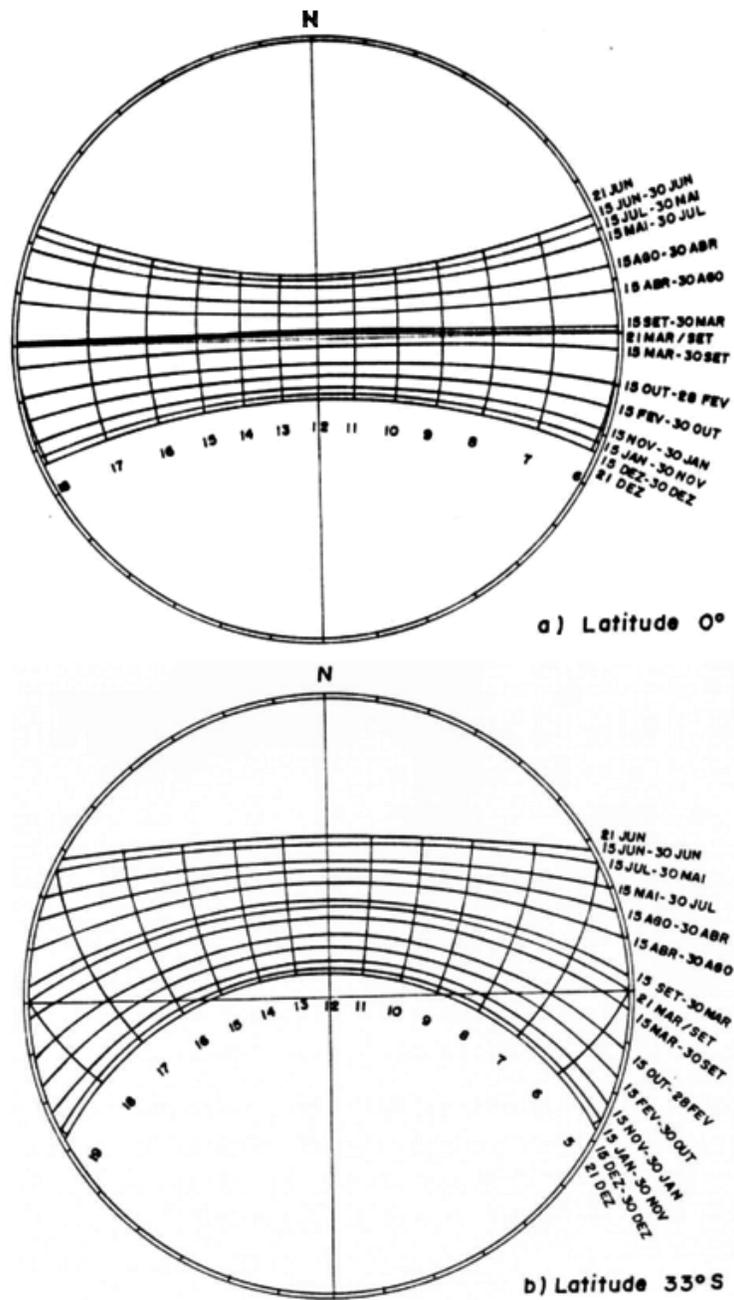


FIGURA 4 - Projeções estereográficas das trajetórias do Sol para as latitudes de 0° (a) e 33°Sul (b).

## 2.5 Estimativa dos instantes do “nascer” e do “pôr do Sol” para superfícies inclinadas

A fim de fazer a estimativa dos instantes do “nascer” e “pôr do sol” em uma superfície plana inclinada de orientação qualquer, e também o tempo máximo possível de incidência de radiação solar direta sobre tal superfície foi utilizada uma metodologia apresentada por ALVES et al. (1983). Para tal rotina de cálculos, os autores assumiram que a diferença entre o tempo solar e o tempo sideral seria desprezada; a declinação do Sol foi admitida como constante durante todo o dia solar; a Terra foi considerada esférica e os efeitos de refração atmosférica desprezados. Eles justificam tais considerações como sendo comuns em trabalhos desta natureza e praticamente, não comprometendo, os resultados almejados.

O ângulo de incidência ( $\theta$ ) dos raios solares diretos sobre uma superfície inclinada é o ângulo formado entre esses raios e a normal à superfície, o qual, segundo Alves et al. (1983), pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$\cos(\theta) = A \cdot \cos(h) + B \cdot \sin(h) + C \quad (03)$$

Em que,

$$A = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(i) + \sin(i) \cdot \cos(\psi') \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\phi) \quad (04)$$

$$B = \sin(i) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\psi') \quad (05)$$

$$C = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(i) - \sin(i) \cdot \cos(\psi') \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\phi) \quad (06)$$

Em que,

$\phi$  é a latitude do local, variando de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul;

$\delta$  é a declinação do Sol, variando de  $0^\circ$  a  $\pm 23^\circ 27'$ , positiva quando o Sol culmina no Hemisfério Norte e negativa quando culmina no Hemisfério Sul;

$i$  é o ângulo de inclinação da superfície, variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ;

$\psi'$  é o azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao sul, variando de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivo a oeste e negativo a leste;

$h$  é o ângulo horário do Sol, ou simplesmente ângulo horário. É definido como o ângulo entre o plano meridiano do local e o plano meridiano celeste que contém o Sol. Este ângulo apresenta uma variação de  $15^\circ$  por hora, sendo igual a zero ao meio dia solar, negativo no período da manhã e positivo no período da tarde.

A declinação do Sol, em radianos, é calculada pela equação a seguir:

$$\delta = 0,4093 \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{365} \cdot DJ - 1,405\right) \quad (07)$$

Em que DJ é o dia juliano, correspondendo ao número de dias transcorridos desde o dia primeiro de janeiro, portanto variável de 1 a 365.

No instante correspondente ao “nascido do sol”, os raios solares incidem paralelamente à superfície de observação, sendo o ângulo de incidência igual a  $90^\circ$ . Assim a equação 03 se reduz a:

$$A \cdot \cos(h) + B \cdot \text{sen}(h) + C = 0 \quad (08)$$

São considerados os seguintes casos a fim de resolver a equação 08, na qual o parâmetro “C” pode assumir qualquer valor:

**Primeiro Caso:**  $A \neq 0$  e  $B \neq 0$

Assim, são válidas as seguintes expressões:

$$\cos(h) = -\frac{C}{A} - \frac{B}{A} \cdot \text{sen}(h) \quad (09)$$

e

$$D \cdot \text{sen}^2(h) + E \cdot \text{sen}(h) + F = 0 \quad (10)$$

As duas possíveis raízes da equação 10 são:

$$\text{sen}(h)_1 = \frac{-E + \sqrt{E^2 - 4 \cdot D \cdot F}}{2 \cdot D} \quad (11)$$

$$\text{sen}(h)_2 = \frac{-E - \sqrt{E^2 - 4 \cdot D \cdot F}}{2 \cdot D} \quad (12)$$

Em que,

$$D = 1 + \left(\frac{B}{A}\right)^2 \quad (13)$$

$$E = \frac{2 \cdot B \cdot C}{A^2} \quad (14)$$

$$F = \left(\frac{C}{A}\right)^2 - 1 \quad (15)$$

Substituindo  $sen(h)_1$  e  $sen(h)_2$  na equação 09 tem-se a identificação dos quadrantes e, assim, a solução da equação 08, ou seja, os instantes representados pelos ângulos horários  $h_1$  e  $h_2$ , em que a direção dos raios solares diretos tangencia a superfície inclinada em questão, podendo corresponder, eventualmente, aos respectivos instantes do “nascer” e “pôr do sol”, para tal superfície. Todavia, há situações em que o Sol, em  $h_1$  e  $h_2$ , pode encontrar-se no hemisfério invisível, bem como, no intervalo entre  $h_1$  e  $h_2$ , e assim a função  $cos(\theta)$  assumir valores negativos.

Para contornar tais dificuldades, e se obter corretamente os instantes do “nascer” e “pôr do sol”, para quaisquer superfícies, algumas restrições devem ser feitas valendo-se das seguintes expressões:

$$H = |\arccos(-tg(\phi) \cdot tg(\delta))| \quad (16)$$

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (17)$$

$$K = A \cdot cos(\bar{h}) + B \cdot sen(\bar{h}) + C \quad (18)$$

Em que,

$H$  é o ângulo horário correspondente ao nascer e/ou “pôr do sol” no plano horizontal local;

$\bar{h}$  é o valor intermediário no intervalo de  $h_1$  e  $h_2$ ;

$K$  é o valor da função  $\cos(\theta)$  para o referido ângulo horário  $\bar{h}$ .

Por conveniência matemática considera-se  $h_1 < h_2$ .

Os instantes do “nascer” e “pôr do sol” serão determinados considerando as seguintes possibilidades:

$$1^a \quad |h_1| \leq H, |h_2| \leq H \text{ e } K > 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $h_1$  e  $h_2$ , respectivamente.

$$2^a \quad |h_1| < H, |h_2| < H \text{ e } K < 0$$

Têm-se dois instantes para o “nascer do sol”, correspondentes aos respectivos ângulos horários  $-H$  e  $h_2$ , e dois instantes para o “pôr do sol”, correspondentes aos ângulos horários  $h_1$  e  $H$ .

$$3^a \quad |h_1| < H, |h_2| \geq H \text{ e } K > 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $h_1$  e  $H$ , respectivamente.

$$4^a \quad |h_1| < H, |h_2| \geq H \text{ e } K < 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $-H$  e  $h_1$ , respectivamente.

$$5^a \quad |h_1| \geq H, |h_2| < H \text{ e } K > 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $-H$  e  $h_2$ , respectivamente.

$$6^a \quad |h_1| \geq H, |h_2| < H \text{ e } K < 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $h_2$  e  $H$ , respectivamente.

$$7^a \quad |h_1| > H, |h_2| > H \text{ e } K > 0$$

Os instantes do “nascer” e do “pôr do sol” corresponderão aos ângulos horários  $-H$  e  $H$ , respectivamente.

$$8^a \quad |h_1| \geq H, |h_2| \geq H \text{ e } K < 0$$

Não haverá incidência de radiação solar direta sobre a superfície em questão.

**Segundo Caso:**  $A \neq 0$  e  $B = 0$

Assim, a equação 08 se reduz a:

$$\cos(h) = -\frac{C}{A} \quad (19)$$

Fornecendo como solução  $h_1$  e  $h_2$ , dados por:

$$h_1 = - \left| \arccos\left(-\frac{C}{A}\right) \right| \quad (20)$$

$$h_2 = + \left| \arccos\left(-\frac{C}{A}\right) \right| \quad (21)$$

Conhecidos os ângulos horários  $h_1$  e  $h_2$ , o procedimento é análogo ao primeiro caso, partindo da equação 16.

**Terceiro Caso:**  $A=0$  e  $B \neq 0$

Assim, a equação 08 se reduz a:

$$\text{sen}(h) = -\frac{C}{B} \quad (22)$$

Fornecendo como solução  $h_1$  e  $h_2$ , dados por:

$$h_1 = - \left| \arcsen\left(-\frac{C}{B}\right) \right| \quad (23)$$

$$h_2 = + \left| \arcsen\left(-\frac{C}{B}\right) \right| \quad (24)$$

Conhecidos os ângulos horários  $h_1$  e  $h_2$ , o procedimento é análogo ao primeiro caso, partindo da equação 16.

Em qualquer dos casos mencionados, situações absurdas, tais como  $|\cos(h)| > 1$  ou  $|\text{sen}(h)| > 1$ , podem, eventualmente, acontecer. Isto significa, simplesmente, que não existe um valor para o ângulo horário  $h$  que anule a função  $\cos(\theta)$ , ou seja, essa função será sempre positiva ou então negativa durante o dia, o que poderá ser verificado substituindo os valores de A, B e C na equação 01. Se a função  $\cos(\theta)$  for positiva haverá incidência direta de radiação solar durante todo dia, na superfície em questão; se for negativa, os raios solares diretos não incidirão na superfície considerada durante todo o dia.

## **2.6 Estimativa da radiação solar interceptada por superfícies inclinadas**

Segundo ROBINSON (1966), a densidade de fluxo de radiação solar que incide sobre uma superfície é influenciada por um grande número de fatores que podem ser classificados como astronômicos, geográficos, geométricos, físicos e meteorológicos. Para o cálculo da radiação solar sobre superfícies inclinadas torna-se necessário conhecer as suas componentes direta e difusa, que serão elucidadas a seguir.

ALVES (1981) apresentou a descrição de um modelo para estimar a radiação solar sobre superfícies de diferentes inclinações e azimutes (orientações), que expressa a radiação solar como a soma das radiações solares, direta e difusa, do ângulo de inclinação da superfície, do ângulo de incidência dos raios solares diretos, do índice de refletividade da superfície e do ângulo zenital do Sol.

No modelo citado, de acordo com PALTRIDGE e PLATT (1976), a radiação solar sobre uma superfície inclinada ( $I_i$ ), em condições de céu descoberto, pode ser determinada pela seguinte equação:

$$I_i = I_0 \cdot \cos(\theta) + I_d \cdot \cos^2\left(\frac{i}{2}\right) + \alpha \cdot (I_0 \cdot \cos(Z) + I_d) \cdot \left[1 - \cos^2\left(\frac{i}{2}\right)\right] \quad (25)$$

Em que,

$I_i$  é a radiação solar global sobre a superfície inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ );

$I_0$  é a radiação solar direta sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );

$I_d$  é a radiação solar difusa sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\theta$  é o ângulo de incidência dos raios solares diretos com a normal à superfície (rad);

$i$  é o ângulo de inclinação da superfície (rad);

$\alpha$  é o índice de refletividade da superfície (adimensional);

$Z$  é o ângulo zenital (rad).

A equação anterior requer o conhecimento de vários parâmetros que dependem do movimento virtual do Sol em relação à Terra. A radiação solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares  $I_0$  pode ser obtida pela expressão recomendada por BROOKS (1959):

$$I_0 = S \cdot \left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2 \cdot \tau \quad (26)$$

Em que,

$I_0$  é a radiação solar direta sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );

$S$  é a constante solar, sendo a quantidade de energia solar recebida por unidade de tempo e área em uma superfície normal aos raios solares, a distância média entre a Terra e o Sol, na ausência da atmosfera. Seu valor corresponde a  $1.367 \text{ W m}^{-2}$  (LIOU, 1980);

$\left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2$  - expressão que permite calcular a distância relativa entre a Terra

e o Sol, em razão da excentricidade da órbita terrestre;

$\tau$  é a transmitância atmosférica (adimensional).

O fator  $\left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2$ , que foi desenvolvido por Spencer (1971), citado por

VIANELLO e ALVES (1991), também expressa a variação da densidade de fluxo de radiação que atinge uma superfície normal aos raios solares, na ausência da atmosfera, em virtude da distância variável entre a Terra e o Sol, podendo ser calculada pela equação seguinte:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2 = & 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(X) + \\ & 0,001280 \cdot \text{sen}(X) + 0,000719 \cdot \cos(2X) \\ & + 0,000077 \cdot \text{sen}(2X) \end{aligned} \quad (27)$$

O ângulo  $X$ , em radianos, depende do dia do ano (1 a 365) podendo ser calculado por:

$$X = \frac{2 \cdot \pi \cdot (DJ - 1)}{365} \quad (28)$$

Em que,  $DJ$  é o dia juliano, conforme já descrito anteriormente.

A transmitância atmosférica, conforme é apresentada por VIANELLO e ALVES (1991), pode ser determinada pela equação seguinte:

$$\tau = \exp \left[ -0,089 \cdot \left( \frac{P \cdot m}{1013} \right)^{0,75} - 0,174 \cdot \left( \frac{W \cdot m}{20} \right)^{0,60} - 0,083 \cdot (d \cdot m)^{0,90} \right] \quad (29)$$

Em que,

$P$  é a pressão atmosférica (mb);

$m$  é a massa ótica da atmosfera (adimensional);

$W$  é a quantidade de água precipitável na atmosfera, na direção zenital (mm);

$d$  é o parâmetro adimensional de poeiras.

A massa ótica do ar varia com o ângulo zenital do Sol  $Z$ , variando de 1, quando o Sol está no zênite, a 35, no nascer e pôr do Sol, sendo estimado pela equação apresentada por VIANELLO e ALVES (1991):

$$m = 35 \cdot [1224 \cdot \cos^2(Z) + 1]^{-1/2} \quad (30)$$

A quantidade de água precipitável na atmosfera  $W$ , em altura de lâmina d'água (mm), é calculada em função da pressão parcial de vapor d'água na

atmosfera (  $ea$  ) medida à superfície do solo, em mb, como mostra a equação a seguir, também apresentada por VIANELLO e ALVES (1991):

$$W = 2,5 \cdot ea \quad (31)$$

A pressão parcial de vapor d'água, em mb, pode ser estimada a partir da umidade relativa do ar, ou seja:

$$ea = \frac{UR \cdot es}{10} \quad (32)$$

Em que, a pressão de saturação do vapor d'água  $es$ , em kPa, é estimada pela equação de Tetens, conforme a equação seguinte:

$$es = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (33)$$

Em que,  $T$  é a temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

O parâmetro adimensional de poeiras, ( $d$ ), segundo Shulze citado por VIANELLO e ALVES (1991), varia de 0,2 a 3,0 conforme as condições atmosféricas reinantes.

O ângulo de incidência dos raios solares diretos com a normal à superfície  $\theta$  pode ser obtido de DUFFIE e BECKMAN (1974), conforme a expressão seguinte:

$$\begin{aligned}
\cos(\theta) = & \\
& \cos(h) \cdot (\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(i) + \sin(i) \cdot \cos(\psi') \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\phi)) \\
& + \sin(h) \cdot \sin(i) \cdot \sin(\psi') \cdot \cos(\delta) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(i) \\
& - \sin(i) \cdot \cos(\psi') \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\phi)
\end{aligned} \tag{34}$$

Em que,

$h$  é o ângulo horário (rad);

$\phi$  é a latitude do local (rad);

$\delta$  é a declinação solar (rad);

$i$  é o ângulo de inclinação da superfície (rad);

$\psi'$  é o azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao sul, variando de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivo a oeste e negativo a leste;

O ângulo horário  $h$ , em radianos, pode ser determinado pela seguinte expressão, para qualquer horário  $j$  do dia (tempo solar verdadeiro):

$$h = (j - 12) \cdot \frac{\pi}{12} \tag{35}$$

O ângulo horário do “nascer” e do “pôr do sol”, dado por  $h_1$  e  $h_2$ , pode ser obtido seguindo a metodologia sugerida no tópico 2.5.

Por fim, a radiação solar difusa  $I_d$  que chega à superfície varia com o ângulo zenital do Sol, correspondendo a aproximadamente 15% do total de radiação solar que chega à superfície em dias de céu descoberto ALVES (1981), sendo estimada através da equação:

$$I_d = 11,63\{0,43 + 8,25[1 - 0,0111\exp(0,05 \cdot Z)]\} \quad (36)$$

Em que,  $I_d$  é a radiação solar difusa sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ ) e  $Z$  é o ângulo zenital, em graus.

Para o ângulo zenital, VIANELLO e ALVES (1991) apresentam a seguinte equação para a sua estimativa:

$$\cos(Z) = \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \quad (37)$$

Em que,  $\phi$  é a latitude local,  $\delta$  é a declinação solar e  $h$  é o ângulo horário, conforme já foram descritos.

## 2.7 Mapas de fluxo de radiação solar no território brasileiro

Os mapas de radiação solar sobre o território brasileiro, apresentados por MARTINS et al. (2005), foram obtidos com o uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas (INPE) em parceria com o LABSOLAR/UFSC (Figura 5). Nessa figura visualizam-se os mapas da média mensal da radiação solar para os doze meses de 2000 sobre o território brasileiro. Os maiores valores de fluxo de radiação são observados na região central do País durante o verão. É interessante notar que durante o verão, os valores de intensidade da radiação solar observados na região sul do País são superiores aos valores obtidos para a região norte. Esse fato ocorre em consequência do deslocamento da zona de convergência intertropical que acarreta a maior frequência de nebulosidade e alta pluviosidade observada na região amazônica durante esta estação do ano.

Mesmo durante o inverno, a densidade de fluxo de radiação solar sobre a superfície terrestre é elevada, apresentando os valores mínimos da ordem de 2,5 kWh m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> no Sul do Brasil. Vale observar que durante a estação seca, as estimativas de radiação solar apresentam incertezas maiores em função da ocorrência de queimadas na região central e norte do País que lançam grande quantidade de aerossóis na atmosfera capazes de absorver a radiação solar. Trabalhos realizados por PEREIRA et al. (2000) indicam desvios que montam da ordem de 11% entre valores calculados e medidos sobre essas regiões, em comparação com os desvios bem menores, da ordem de 6% sobre as regiões onde não ocorrem queimadas.

Na Figura 6 é mostrada a média anual da radiação solar que atinge a superfície (radiação global), e ainda as componentes (radiação direta e difusa) e a radiação solar no plano inclinado (em ângulo igual à latitude) para o território brasileiro. A informação contida no mapa de radiação no plano inclinado (Figura 6 (D)) é de grande utilidade, pois permite uma visualização de regiões cuja a propensão à problemas gerados pela alta incidência de radiação nas culturas, como a escaldadura, é mais intensificado, uma vez que mostra a quantidade de energia incidente no plano de maior radiação solar direta interceptada considerando a posição geográfica do local.

Pode-se observar que os maiores valores de radiação direta e no plano inclinado ocorrem aproximadamente nas mesmas regiões do País: região compreendida pelo estado do Tocantins, oeste da Bahia e sul dos estados de Maranhão e Piauí, durante o período de verão, e na região central e sudeste do País, durante a estação seca (agosto a outubro).

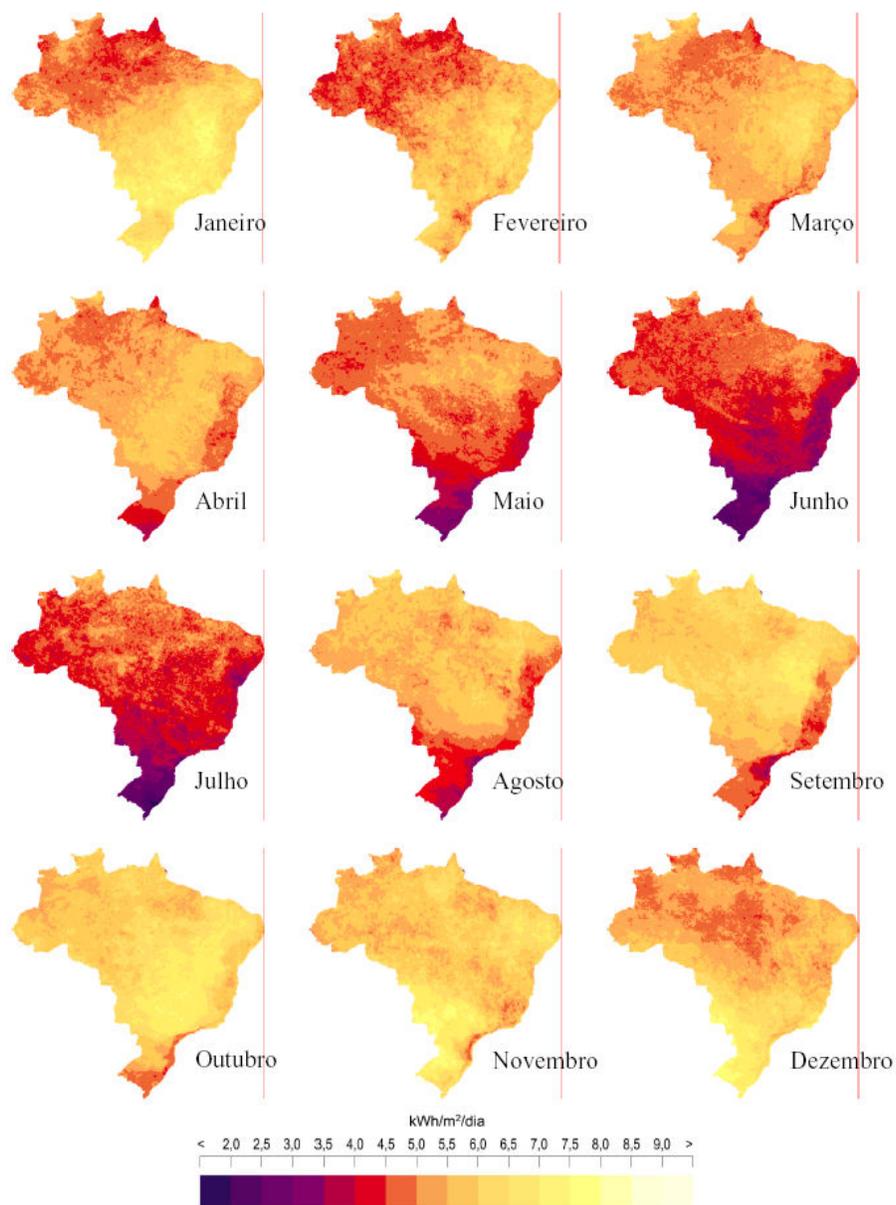


FIGURA 5 - Mapas de radiação solar média mensal, que atinge a superfície do território brasileiro.

Fonte: MARTINS et al. (2005).

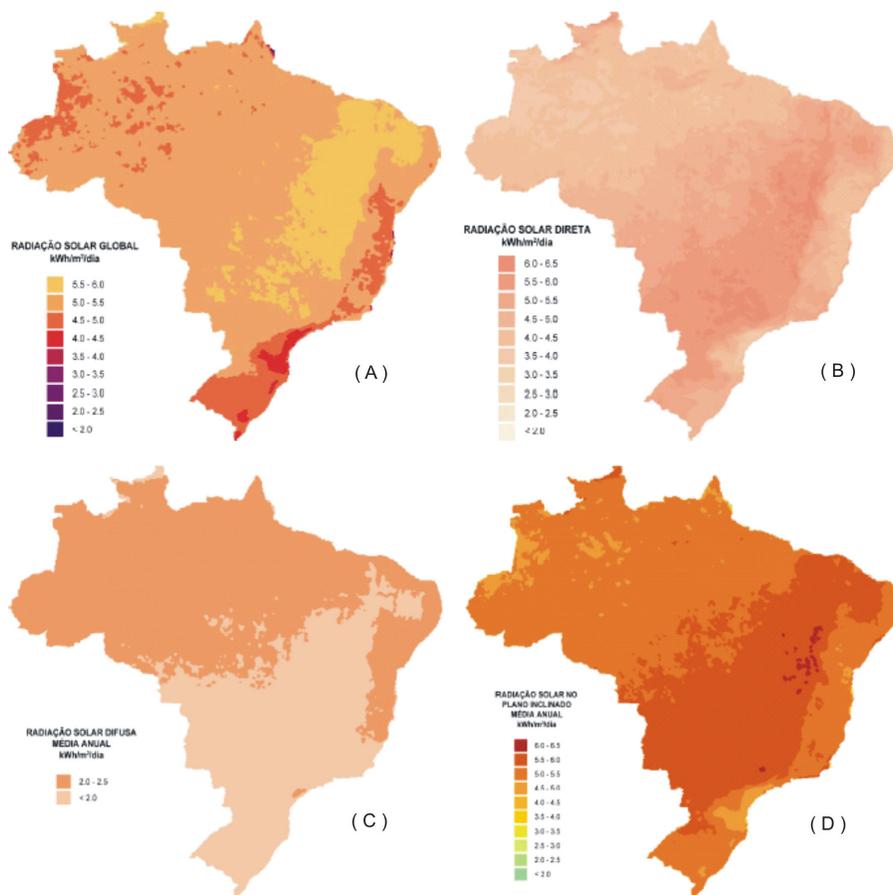


FIGURA 6 - Mapas de radiação solar média anual sobre o território brasileiro.

(A) – radiação global (direta + difusa); (B) – radiação direta; (C) – radiação difusa; (D) – radiação global em plano inclinado em ângulo igual a latitude local.

Fonte: MARTINS et al. (2005).

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 Desenvolvimento do *software* AziPlant**

O desenvolvimento do aplicativo proposto neste trabalho foi em ambiente “Borland Dephi 7” para plataforma “Windows”, programação em linguagem “Object Pascal”.

O *software* foi preparado para receber um arquivo com uma série histórica de dados de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica que podem ser coletados por uma estação meteorológica automática representativa do local, a fim de estimar a radiação solar direta interceptada pela superfície, conforme a localização, inclinação e orientação da superfície em questão.

O programa foi, ainda, elaborado de forma a calcular os quantitativos de radiação solar direta interceptada e acumulada pelas duas faces da linha de plantio da cultura do café, obedecendo a um critério de seleção das datas, avaliando para diferentes azimutes das linhas de plantio qual azimute promoveria a menor diferença de radiação solar interceptada pelas duas faces da cultura, recomendando, portanto, tal azimute como sendo a orientação mais adequada para ser implantada à cultura.

### **3.2 Correção do horário**

O horário registrado pelas estações meteorológicas automáticas normalmente é ajustado de acordo com o horário civil vigente da localidade, o qual se estende por ampla faixa geográfica, o que define os fusos horários. Torna-se necessário, então, um reajuste para que esse horário corresponda ao “tempo solar verdadeiro” e, assim, possibilitando a estimativa do ângulo horário segundo a equação 35. Esse reajuste pode ser obtido com a seguinte expressão:

$$j = \left( Hora - FH + \left( \frac{12}{\pi} \right) \cdot long \right) + Xh \quad (38)$$

Em que,

$j$  é o tempo solar verdadeiro (horas);

$Hora$  é a hora local marcada no relógio da estação meteorológica (horário civil);

$FH$  é o fuso horário civil vigente no local conforme a Tabela 4 (horas);

$long$  é a longitude do local (rad);

$Xh$  é o termo de correção entre a hora solar e a hora do relógio, causada devido às flutuações da duração do dia solar e a órbita terrestre.

TABELA 2 - Fusos horários do Brasil. Subtração em horas do tempo referencial UTC (Tempo Universal Coordenado).

Local	Fuso Horário
Rio Branco – AC	UTC – 5
Manaus – AM	UTC – 4
Brasília – DF	UTC – 3
Fernando de Noronha – PE	UTC – 2

Segundo a ABNT (2003) a expressão horária  $Xh$  é estimada em função do dia juliano  $DJ$ , conforme a seguinte equação:

$$Xh = 0,170 \cdot \text{sen}(1,93 \cdot DJ - 154,4) - 0,129 \cdot \text{sen}(1,01 \cdot DJ - 8,08) \quad (39)$$

### 3.3 Radiação solar direta interceptada por uma superfície inclinada

A radiação estimada através da equação 25 é a soma das radiações solares diretas e difusas. Contudo, o que se objetiva neste trabalho é quantificar somente a radiação solar direta interceptada pelas faces das linhas de plantio. Para isso, então, a equação 25 passa a ser descrita da seguinte forma:

$$I_{oi} = I_0 \cdot \cos(\theta) + \alpha \cdot (I_0 \cdot \cos(Z)) \cdot \left[ 1 - \cos^2\left(\frac{i}{2}\right) \right] \quad (40)$$

Em que,

$I_{oi}$  é a radiação solar direta sobre a superfície inclinada ( $\text{W m}^{-2}$ );

$I_0$  é a radiação solar direta sobre a superfície plana ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\theta$  é o ângulo de incidência dos raios solares diretos com a normal à superfície (rad);

$i$  é o ângulo de inclinação da superfície (rad);

$\alpha$  é o índice de refletividade da superfície (adimensional);

$Z$  é o ângulo zenital (rad).

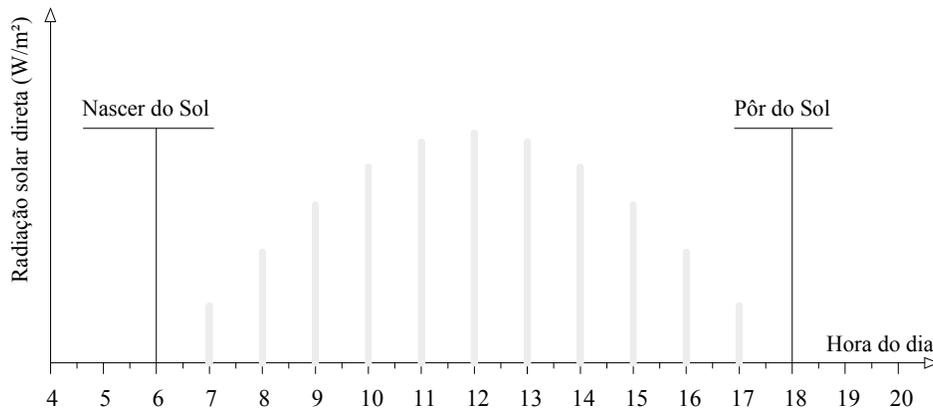


FIGURA 7 – Distribuição diária da radiação solar direta interceptada a cada instante de dados coletados pela estação meteorológica automática.

Partindo do valor da radiação solar direta estimada de acordo com a equação 40, pelo qual é um valor dado em  $\text{W m}^{-2}$ , sendo este um dado instantâneo, torna-se necessário convertê-lo para  $\text{kJ m}^{-2}$ , passando a ser, então,

um valor representando o acumulado de radiação solar interceptada em um intervalo de tempo. Como os dados meteorológicos coletados na estação automática são tomados sistematicamente obedecendo a um intervalo de tempo definido entre eles, a equação, a seguir, é aplicada para se obter o valor de radiação solar direta, em  $\text{kJ m}^{-2}$  acumulado entre duas leituras sucessivas de dados, assumindo que o comportamento da radiação entre estas leituras seja linear.

$$R_{0i_k} = (I_{0i_{k-1}} + I_{0i_k}) \cdot td \cdot 1,8 \quad (41)$$

Em que,

$k$  é a referência ao dado em foco;

$k - 1$  é a referência ao dado anterior;

$R_{0i_k}$  é a radiação solar direta interceptada acumulada durante o intervalo de tempo entre a leitura anterior ( $k - 1$ ) da estação e a leitura em foco ( $k$ ), dado em  $\text{kJ m}^{-2}$ ;

$I_{0i_k}$  é a radiação solar direta estimada no instante em foco  $k$ , dado em  $\text{W m}^{-2}$ ;

$I_{0i_{k-1}}$  é a radiação solar direta estimada no instante anterior ao instante em foco, dado em  $\text{W m}^{-2}$ ;

$td$  é o intervalo de tempo entre os valores registrados pela estação automática, em horas.

De posse do valor de radiação solar direta interceptada acumulada entre dois registros consecutivos de dados pode-se fazer a acumulação da radiação

solar direta durante todo o dia, obtendo a radiação solar direta interceptada total de um dia.

$$Rac_{dia} = \sum_{k_i}^{k_f} R_{0i_k} \quad (42)$$

Em que,

$k_i$  é a referência à primeira leitura do dia feita pela estação;

$k_f$  é a referência à última leitura do dia feita pela estação.

Diariamente a radiação solar acumulada interceptada terá, normalmente, o comportamento descrito na Figura 8.

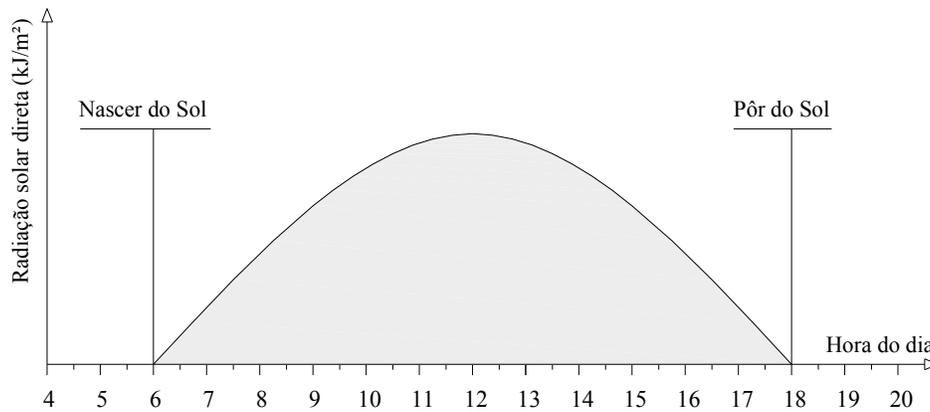


FIGURA 8 – Radiação solar direta interceptada acumulada em um dia.

### 3.4 Radiação solar interceptada pelas faces da linha de plantio

Para definir o quantitativo de radiação solar direta interceptada e acumulada por cada face da linha de plantio torna-se necessário conhecer os intervalos de exposição de cada face, direita e esquerda, à radiação solar direta.

Através da metodologia de estimativa do “nascer” e “pôr do sol”, descrita no tópico 2.5, é possível calcular para cada dia, tais intervalos de exposição, assumindo nos dados de entrada da metodologia em questão, a superfície como sendo a própria face da linha de plantio disposta em inclinação de  $90^\circ$  e para um azimute qualquer da superfície. A projeção estereográfica ilustrando os tempos de exposição de cada face da linha de plantio à radiação solar direta para diferentes dias conforme apresentado na Figura 9, a seguir:

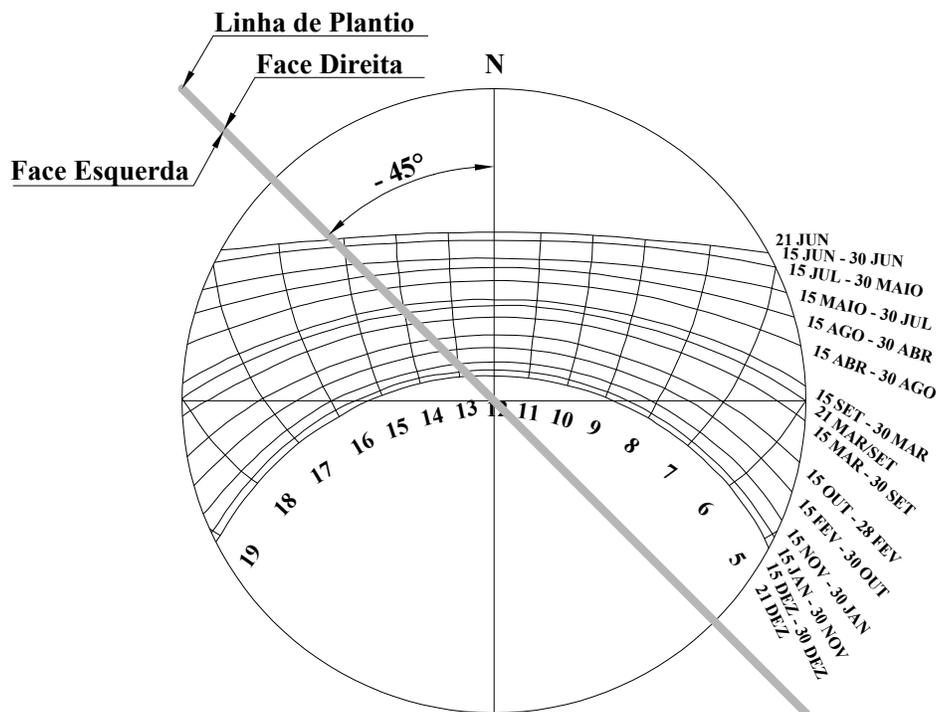


FIGURA 9 – Projeção estereográfica ilustrando os tempos de exposição de cada face da linha de plantio à radiação solar direta para diferentes dias.

O acumulado diário de radiação solar direta interceptada por uma face da linha de plantio dar-se-á, então, integralizando a radiação solar definida entre

os intervalos de mudança, anteriormente mencionados e ilustrados nas Figuras 10, 11 e 12.

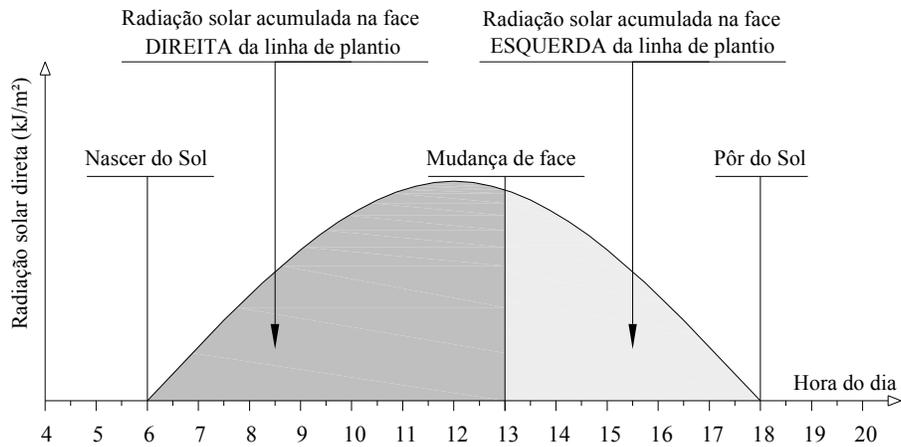


FIGURA 10 – Ilustração da radiação solar interceptada acumulada em cada face da linha de plantio em um dia e o instante da mudança de exposição à irradiância solar direta da face direita para a face esquerda da linha de plantio.

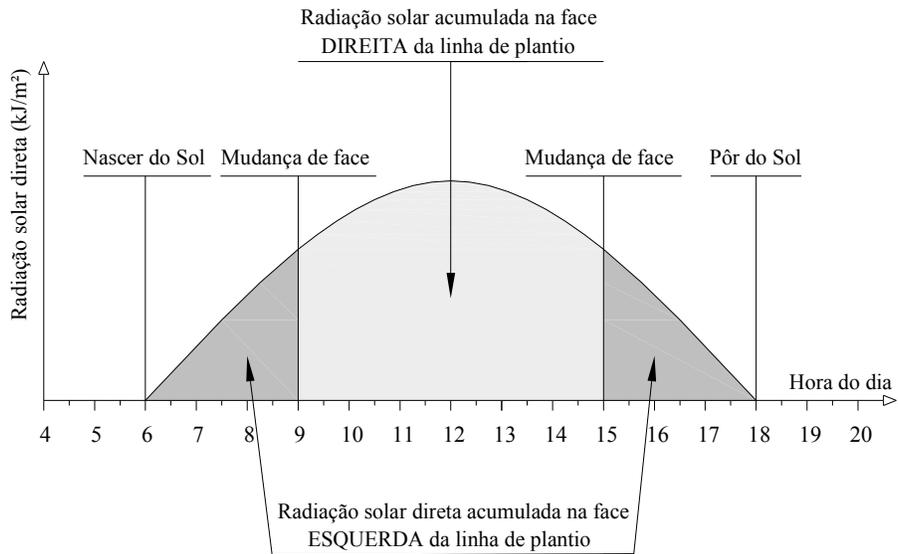


FIGURA 11 – Ilustração da radiação solar direta interceptada acumulada em cada face da linha de plantio com ocorrência de duas mudanças de face em um dia.

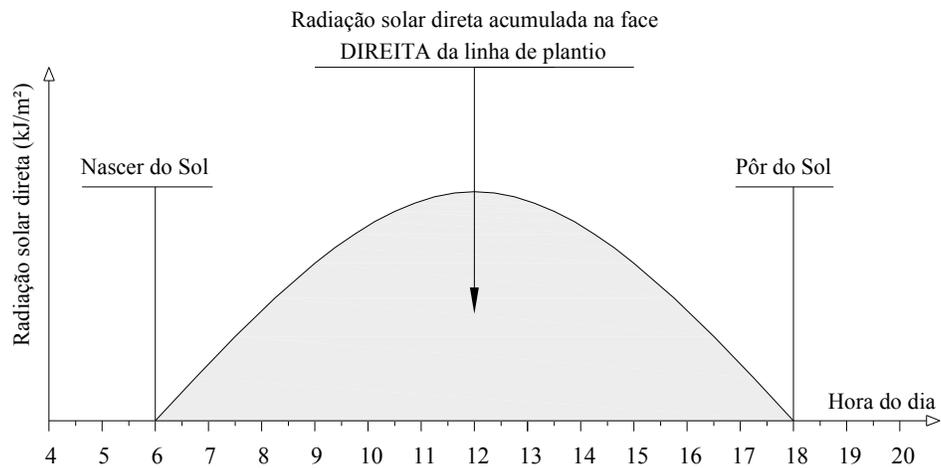


FIGURA 12 – Ilustração da radiação solar direta interceptada acumulada quando somente uma face da linha de plantio fica exposta à radiação direta no período de um dia.

Os instantes de mudança de face normalmente não coincidem com os horários de leitura de dados coletados da estação meteorológica. Assim sendo, para melhorar a precisão das integralizações de radiação em cada face, assumiu-se uma tendência linear entre os dois dados sucessivos, cujo horário de mudança de face esteja contido dentro do intervalo de ocorrência de tais dados.

Conhecido os horários sucessivos devem-se calcular os seguintes parâmetros, conforme ilustrado na Figura 13, a seguir.

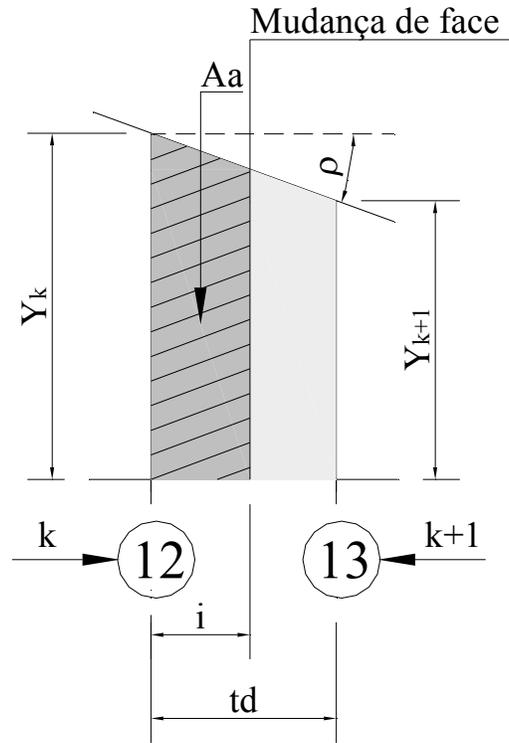


FIGURA 13 – Ilustração dos parâmetros para cálculo do ajuste de integralização da radiação solar direta no horário limite de mudança de face.

Onde  $Y$  é o valor da ordenada da curva de radiação solar direta correspondente à posição  $a$  que é referida, dado, portanto, por:

$$Y_{k+1} = \frac{R_{0i_{k+1}} \cdot 2}{td} - Y_k \quad (43)$$

Na Figura 13, a letra grega  $\rho$  é o ângulo formado pela reta que liga os ápices de dois valores de  $Y$  sucessivos, sendo, portanto, a tangente do ângulo

$\rho$  o coeficiente angular da referida reta, representado pela letra  $a$  e dado pela seguinte expressão.

$$a = \frac{Y_{k+1} - Y_k}{td} \quad (44)$$

A região hachurada  $Aa$  da Figura 13 corresponde ao que falta de radiação solar direta a ser integralizada como sendo interceptada por uma face da cultura após a última leitura observada e antes do momento de mudança para a outra face, sendo dada por:

$$Aa = \int_0^i a \cdot i + Y_k \, di \quad (45)$$

Sendo que o valor do  $i$  é dado por:

$$i = j_{mud} - j_k \quad (46)$$

Em que,

$j_{mud}$  é o horário do instante de mudança de face da linha de plantio, dado em horas;

$j_k$  é o horário referente à posição  $k$ , conforme ilustrado na Figura 12.

O acumulado de radiação solar direta em um dia para as duas faces da linha de plantio pode ser calculado da seguinte forma:

$$R_{0_{f1} dia} = \sum_{k_i}^{k_f} R_{0_{i_k}} + Aa \quad (47)$$

$$R_{0_{f2} dia} = Rac_{dia} - R_{0_{f1} dia} \quad (48)$$

Em que,

$R_{0_{f1} dia}$  é a radiação solar direta acumulada interceptada por uma das faces da linha de plantio, dado  $\text{kJ m}^{-2}$ ;

$R_{0_{f2} dia}$  é a radiação solar direta acumulada interceptada pela outra face da linha de plantio, dado  $\text{kJ m}^{-2}$ ;

$k_i$  e  $k_f$  são as posições que fazem referência aos instantes que delimitam o tempo de exposição de uma face da linha de plantio à radiação solar direta.

Por fim, o acumulado de radiação solar direta interceptada por uma face da linha de plantio durante um período diferente de um dia, é dado fazendo o somatório das radiações solares acumuladas interceptada por essa face em cada dia contido no período, conforme indica o modelo seguinte:

$$R_{0_{f1} total} = \sum_{di}^{df} R_{0_{f1} dia} \quad (49)$$

$$R_{0_{f2} total} = \sum_{di}^{df} R_{0_{f2} dia} \quad (50)$$

Em que,

$R_{0_{f^1 total}}$  é a radiação solar direta acumulada interceptada por uma das faces da linha de plantio em um período maior que um dia, dado  $\text{kJ m}^{-2}$ ;

$R_{0_{f^2 total}}$  é a radiação solar direta acumulada interceptada pela outra face da linha de plantio em um período maior que um dia, dado  $\text{kJ m}^{-2}$ ;

$d_i$  e  $d_f$  são as posições que fazem referência aos dias a serem considerados para a acumulação da radiação solar direta interceptada.

### 3.5 Convenção de orientação para o azimute da linha de plantio

Neste trabalho o azimute da linha de plantio foi referenciado com o norte verdadeiro, variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  no sentido horário (Norte a Leste), e de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  no sentido anti-horário (Norte a Oeste).

A metodologia pra geração do azimute recomendável para a linha de plantio utiliza-se de outra convenção, que no caso é a do  $\psi'$ , que é o azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao Sul, variando de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivo a Oeste e negativo a Leste, que no tópico 3.5 assumiu-se a condição de orientação para uma face da linha de plantio.

Portanto, para tal são apresentados os critérios de conversão de uma convenção para a outra.

$$\psi' = \alpha_p + 90 \quad \text{Para } -90^\circ \leq \alpha_p \leq 0^\circ \quad (51a)$$

$$\psi' = \alpha_p - 90 \quad \text{Para } 0^\circ \leq \alpha_p \leq 90^\circ \quad (51b)$$

Sendo que,  $\alpha_p$  é o azimute da linha de plantio dado em graus.

### **3.6 Cálculo do azimute para a linha de plantio**

Objetivando recomendar um azimute mais adequado para a implantação da cultura do café, partiu-se de uma hipótese que, havendo equilíbrio quantitativo de radiação solar interceptada pelas duas faces de uma linha de plantio, ter-se-ia uma provável condição fisiológica mais homogênea.

Para definir o azimute que promova tal equilíbrio quantitativo de radiação solar, elaborou-se um aplicativo dotado de algoritmo que simula para os possíveis azimutes, no caso de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ , conforme convenção previamente adotada, os acumulados de radiação solar direta interceptada e acumulada pelas duas faces da linha de plantio e, por fim, apontando qual azimute promoveria a menor diferença entre elas.

### **3.7 Análise de sensibilidade do parâmetro adimensional de poeiras**

Em virtude de não terem sido encontrados na literatura valores para as diversas regiões do Brasil do parâmetro adimensional de poeiras ( $d$ ), demandado como constante aplicada à equação (29), foi feita uma análise de sensibilidade para o azimute solar em função do parâmetro em questão, na qual foi constatada a insignificância das variações nos valores de azimute gerados diante das máximas variações deste parâmetro. Para o presente trabalho foi utilizado o parâmetro adimensional de poeiras definido por ALVES (1981) para a cidade de Viçosa-MG, sendo esse, igual a 0,41.

### **3.8 Teste do *software* AziPlant**

Com o objetivo de simular e testar a aplicação do *software* AziPlant, e com isso obter resultados que possam ser passíveis de comprovação, foram coletados dados de produção em uma área experimental de café irrigado por pivô central na Fazenda São Thomé, em Pirapora-MG. A área em questão está

geograficamente situada à latitude sul 17°31'12", longitude oeste de 44°57'45" e altitude de 520 m. A lavoura de café, variedade Catuai vermelho 144, foi plantada em 2001, em formato circular, com espaçamento de 3,60 entre linhas e 0,5m entre plantas. O equipamento de irrigação é um Pivô Central modelo Valley com vazão de 250 m<sup>3</sup>/h numa área de 80 ha. Os dados de temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica utilizados foram registrados durante o período de 01 de janeiro a 10 de dezembro do ano de 2004 por uma estação meteorológica automática instalada próximo ao campo experimental.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com 4 tratamentos e 4 repetições. Os tratamentos correspondem aos azimutes de plantio em relação ao Norte Verdadeiro, que são: Tratamento 1 (45°); Tratamento 2 (-90°); Tratamento 3 (-45°); Tratamento 4 (0°). O Tratamento 1 corresponde à direção sudoeste-nordeste, ou vice versa; o Tratamento 2 à direção oeste-leste, ou vice versa (caminhamento do sol); o Tratamento 3 à direção sudeste-noroeste, ou vice versa; e o Tratamento 4 à direção norte-sul ou sul-norte. A Figura 1 ilustra as parcelas no campo.

Foram consideradas três plantas úteis de cada bloco em cada azimute e coletou-se a produção do lado externo (lado de fora em relação ao centro do pivô), lado interno (lado de dentro em relação ao centro do pivô), bem como a produção total.

A secagem das amostras foi feita ao sol até que atingisse a faixa de 11 a 12% de umidade. Ao atingir essa faixa, os grãos foram beneficiados, estimou-se a produtividade e, posteriormente, foram submetidas às avaliações estatísticas.

O manejo da irrigação foi feito em função de sensores de umidade instalados na área à profundidade de 25, 50 e 100cm, que está ligado à estação agroclimatológica automática, modelo Vantage ProPlus, tendo sido a irrigação realizada quando os sensores de 25 e 50 cm ultrapassavam o valor de 40 KPa. A lâmina de água aplicada foi estimada em função da evapotranspiração de

referência fornecida pela estação, considerando valores de  $K_c$  de 0,9 (apropriado para a fase que antecede a floração) e 1,25 após a florada.

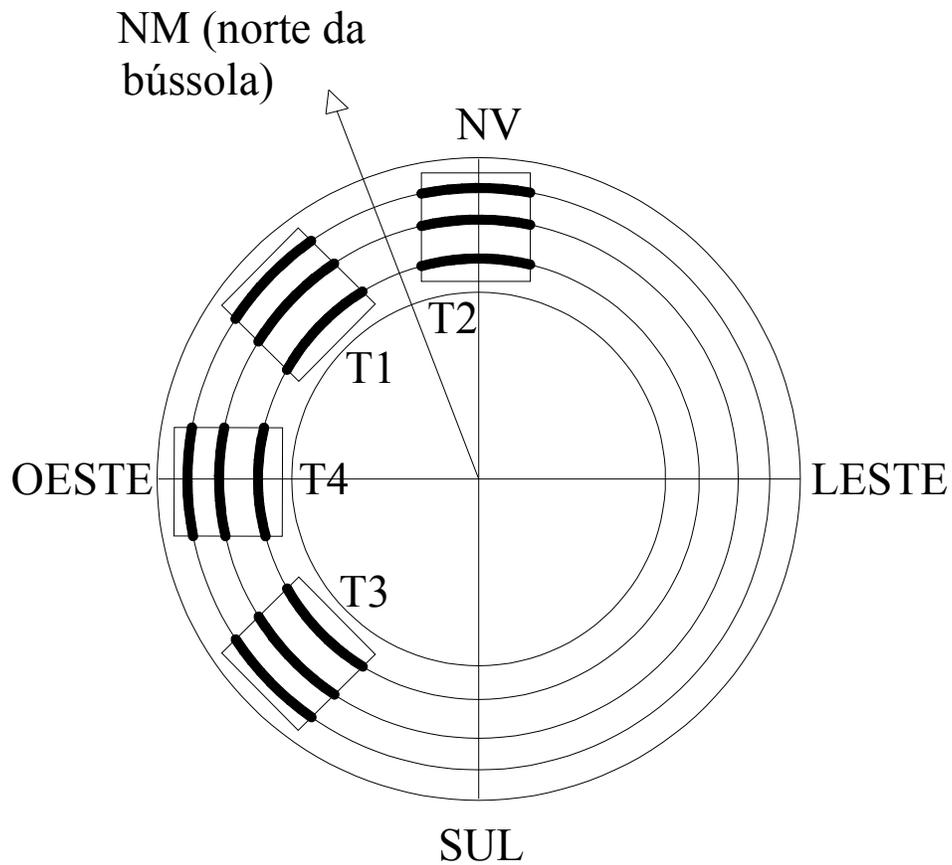


FIGURA 14 – Ilustração das parcelas no campo.

Para a simulação utilizando o *software* AziPlant a área em questão foi considerada perfeitamente plana.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Descrição do *software* desenvolvido

As Figuras apresentadas a seguir são algumas das telas do *software* Azimute para Linhas de Plantio (AziPlant), atendendo ao objetivo proposto neste trabalho. Na Figura 15 está ilustrada a tela de abertura do *software*.



FIGURA 15 – *Software* AziPlant – Tela de abertura.

A tela principal do *software* é mostrada na Figura 16. Nesta tela estão os menus principais, os quais dão acesso às outras telas do sistema, que são: menu “Usuários”, o qual possibilita o cadastro de novos usuários, a edição dos dados do usuário ativo, além de ser o caminho para o usuário “logar” ao sistema através das suas credenciais, “login” e senha; menu “Cadastros Básicos”, o qual apresenta os links para cadastros de estações meteorológicas, áreas e dados meteorológicos representativos das respectivas áreas; menu “Cálculos”, o qual apresenta os links para a tela de recomendação de azimute para plantio, e também o link para a tela de estimativa do nascer e pôr do Sol para superfícies

inclinadas; menu “Ferramentas”, o qual permite compactar e reparar o banco de dados do sistema; menu “Ajuda”, o qual consta o link ao arquivo de ajuda do *software*, e também o link da tela de créditos de desenvolvimento do sistema.

As telas do sistema, com exceção da tela principal, são apresentadas em forma de “pop-up”, tendo então como tela ao fundo a tela principal.



FIGURA 16 – *Software* AziPlant – Tela principal.

A tela de cadastro de Estações Meteorológicas pode ser observada na Figura17, a qual possibilita o cadastro de várias estações com dados como: Descrição; Município; Estados; Latitude; Longitude; Altitude; Fuso horário local, que é o fuso horário civil vigente da localidade, para o qual o relógio da estação meteorológica esteja aferido; Intervalo de tempo entre dados sucessivos da estação. O formulário permite adição, exclusão e edição de dados, além de ser

dotado com tela de busca, conforme listrado na Figura 18, que possibilita filtro por código ou por descrição, tanto de estações como também de unidades federativas do Brasil e fusos horários possíveis no território brasileiro.

Código	Descrição
1	Estação Automática da Fazenda São Thomé

**Local**

Município: Pirapora Estado: MG

**Coordenadas Geográficas**

Latitude: N  17 ° 31 ' 9 " S   
Longitude: L  44 ° 47 ' 45 " O   
Altitude (m): 520

**Fuso Horário o qual a Estação está Aferida**

Descrição: Brasilia: UTC-3

**Dados da Estação**

Tempo entre dados da estação: Tempo: 0 h 30 min

FIGURA 17 – Software AziPlant – Tela de cadastro de estações meteorológicas.



FIGURA 18 – Software AziPlant – Tela de busca.

Na Figura19 está apresentada a tela de cadastro de áreas, o qual permite o cadastro de várias áreas para possível estimativa e análise do ângulo de orientação da linha de plantio e para uma provável implantação de lavoura de café na referida área. Os dados de entrada são: Descrição; Município; Estado; Latitude; Longitude; Altitude; ângulo de inclinação da superfície; Azimute da superfície; Estação meteorológica representativa à área em questão. O formulário permite adição, exclusão e edição de dados, além de ser dotado com tela de busca que possibilita filtro por código ou por descrição tanto das áreas cadastradas quanto de unidades federativas do Brasil e de estações meteorológicas cadastradas.

FIGURA 19 – *Software* AziPlant – Tela de cadastro de áreas.

Na Figura 20 é apresentada a tela de cadastro de dados meteorológicos representativos das áreas e estimativa da radiação solar direta, o qual permite abrir um arquivo de texto com a extensão “azi” e fazer os cálculos de estimativa da radiação solar direta interceptada pela área em questão e salvá-los em banco de dados. O formulário permite adição de novos dados meteorológicos e também a exclusão de todos os dados cadastrados para a área em questão. É dotado com tela de busca que possibilita filtro por código ou por descrição das áreas cadastradas.

ID	Data	Hora*	Temperatura	Umid. Relativa	Pressão	Irradiância**
8	01/Jan/2004	03:30:00	23,4	82,0	956,4	0,00
9	01/Jan/2004	04:00:00	23,2	84,0	957,3	0,00
10	01/Jan/2004	04:30:00	23,3	81,0	957,5	0,00
11	01/Jan/2004	05:00:00	23,5	82,0	957,9	0,00
12	01/Jan/2004	05:30:00	23,3	83,0	958,3	0,00
13	01/Jan/2004	06:00:00	23,2	82,0	958,9	18,70
14	01/Jan/2004	06:30:00	23,7	82,0	959,3	86,62
15	01/Jan/2004	07:00:00	24,3	78,0	959,7	180,06
16	01/Jan/2004	07:30:00	25,5	76,0	960,2	278,38
17	01/Jan/2004	08:00:00	25,2	77,0	960,5	382,86
18	01/Jan/2004	08:30:00	25,4	75,0	960,7	486,14
19	01/Jan/2004	09:00:00	25,9	73,0	960,8	581,00
20	01/Jan/2004	09:30:00	26,7	69,0	960,8	668,21
21	01/Jan/2004	10:00:00	27,8	67,0	960,5	736,51
22	01/Jan/2004	10:30:00	28,6	61,0	960,4	804,60

FIGURA 20 – *Software* AziPlant – Tela de cadastro de dados meteorológicos e de estimativa da radiação solar direta interceptada pela área.

Na Figura 21, finalmente, está apresentada a tela de cálculo da recomendação do azimute para plantio, o qual permite, para cada área, a seleção de dados por intervalo de datas, por meses e por estações climáticas do ano. Permite também a indicação da precisão de cálculo, o qual se refere ao intervalo entre um ângulo e outro a ser avaliado como o ângulo adequado para o azimute. Apresenta como resultado de cálculos uma tabela com os azimutes calculados e seus respectivos valores de radiação solar direta interceptada pela face direita e esquerda da linha de plantio e também o gráfico que esboça o comportamento de tais variações. Com um duplo clique sobre o gráfico, este se apresenta

maximizado, conforme ilustrado na Figura 22, bem como outros gráficos, conforme ilustram as Figuras 23, 24 e 25, respectivamente, com os dados de temperatura do ar, de umidade relativa e o da radiação solar direta interceptada pela área em questão. É dotado com tela de busca que possibilita filtro por código ou por descrição das áreas cadastradas.

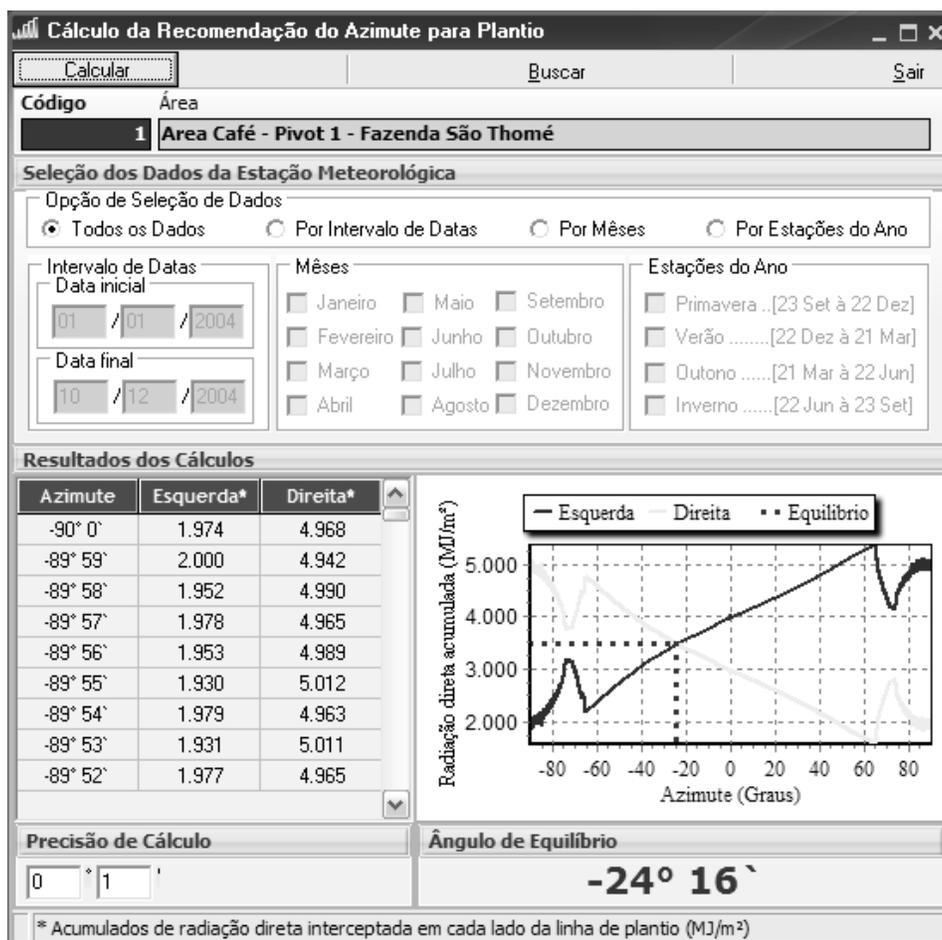


FIGURA 21 – Software AziPlant – Tela de cálculo da recomendação do azimute para plantio.

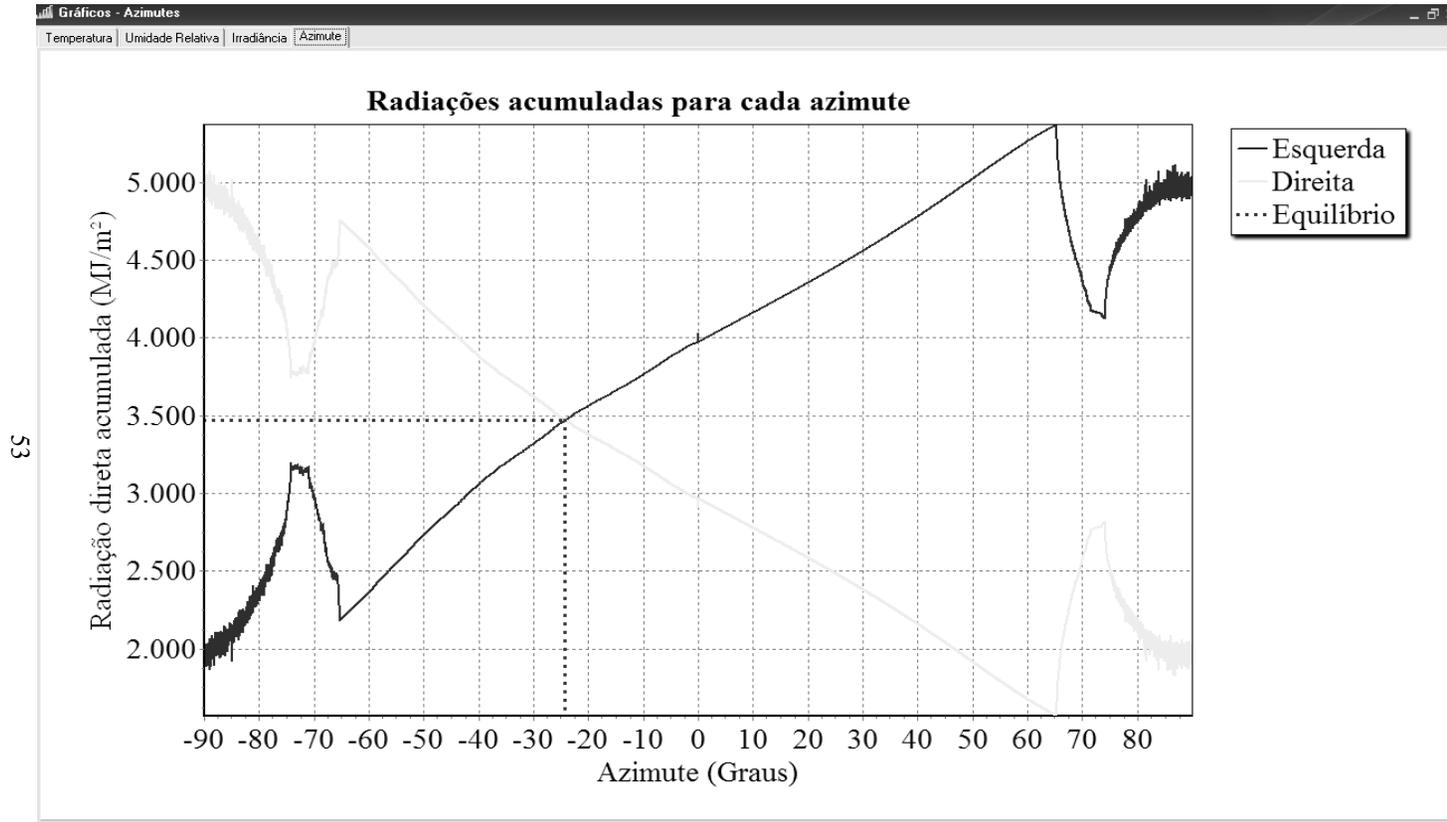


FIGURA 22 – Software AziPlant – Tela do gráfico de radiações interceptadas e acumuladas para cada possível azimute.

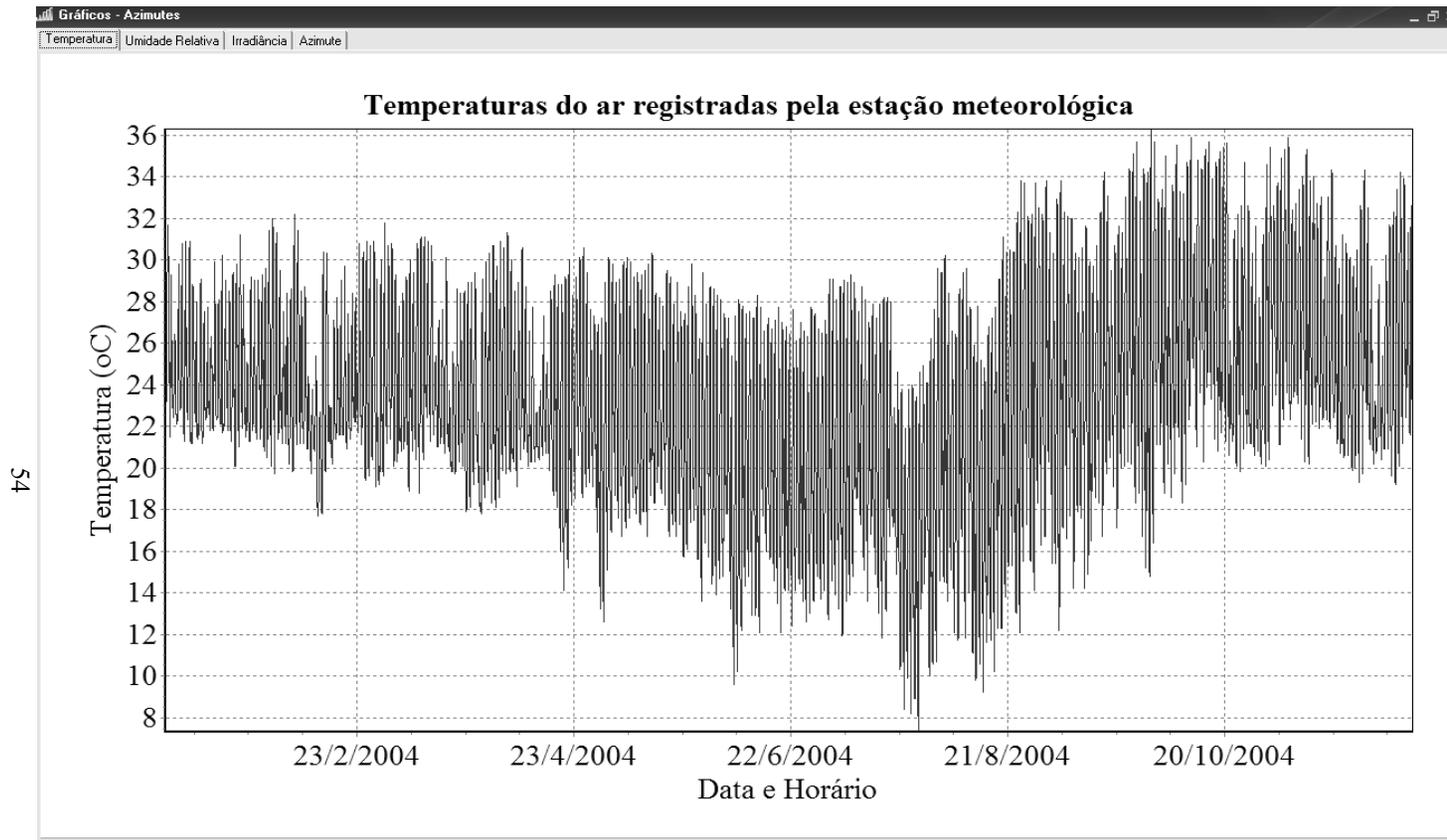


FIGURA 23 – *Software AziPlant* – Tela do gráfico de temperaturas do ar registradas pela estação meteorológica.

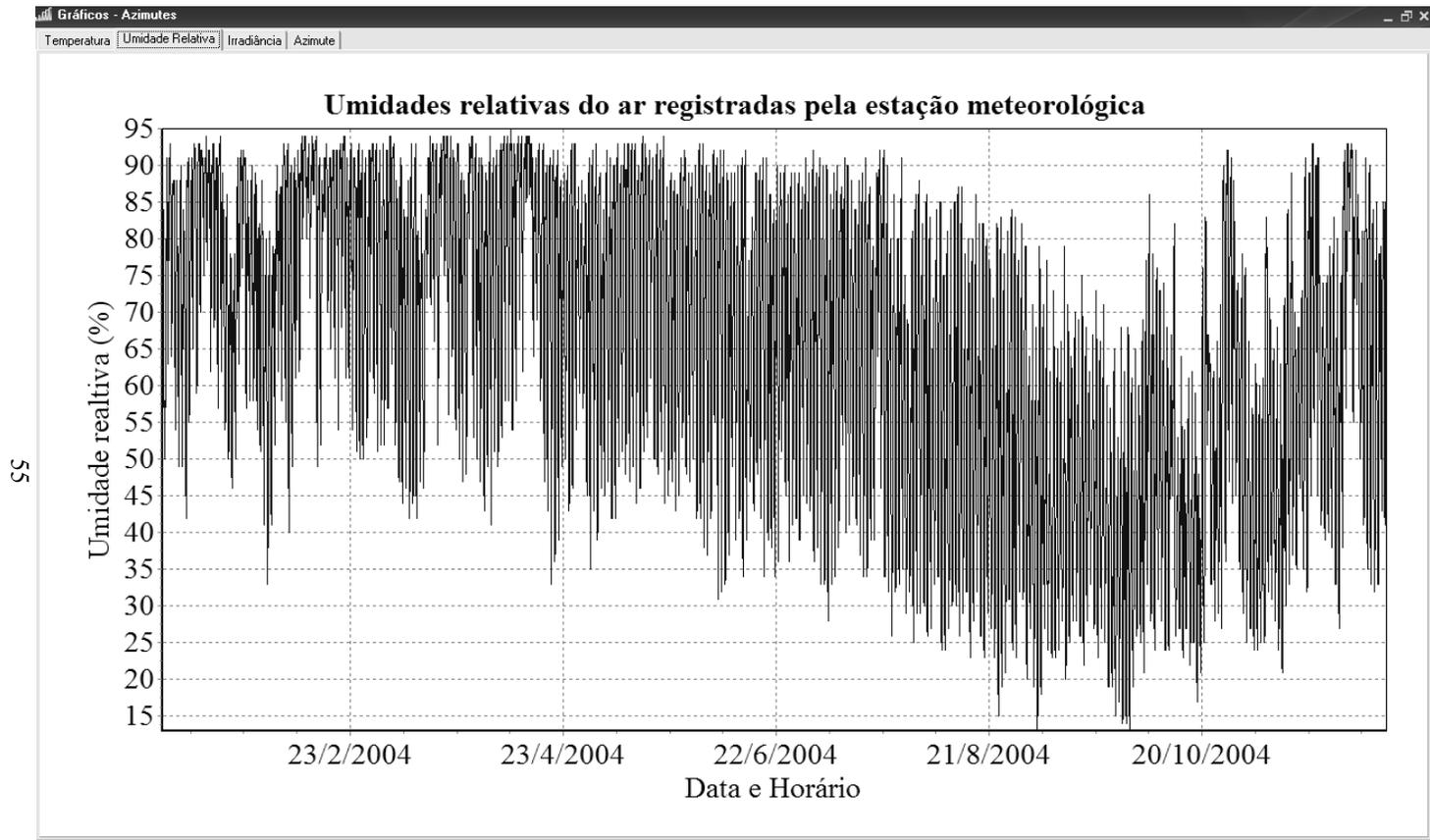


FIGURA 24 – *Software AziPlant* – Tela do gráfico de umidades relativas do ar registradas pela estação meteorológica.

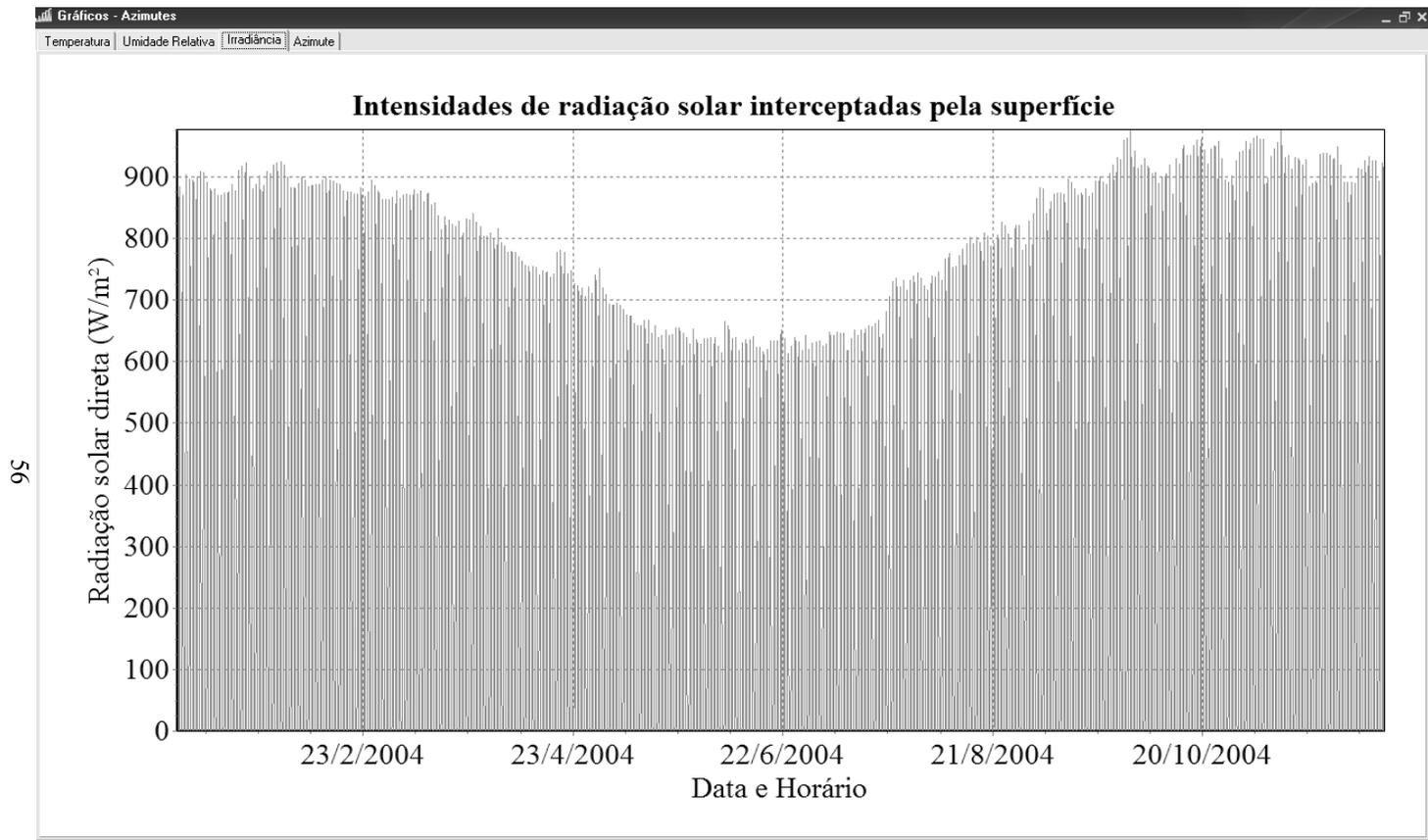


FIGURA 25 – Software AziPlant – Tela do gráfico de intensidades de radiação solar direta interceptadas pela superfície.

Na Figura 26 é apresentada outra tela do *software* que é referente à determinação analítica dos instantes do nascer e do pôr do Sol para superfícies inclinadas quaisquer. Tem como entrada de dados a Latitude e Longitude do Local, a Inclinação da Superfície, o Azimute da Superfície, o Fuso Horário Local e a Data. Tem como resultados os instantes do nascer e do pôr do sol e o tempo máximo de incidência de radiação solar direta sobre a superfície em questão. Tais horários são passíveis de serem exibidos tanto em horário solar verdadeiro quanto ajustado para o horário vigente da localidade.

**Cálculo do Nascer e Pôr do Sol**

**Dados de Entrada**

Horário Solar     Horário Vigente no Local

Latitude do Local: N  17 ° 31 ' 10 "    Longitude: L  44 ° 57 ' 45 "

S     O

Inclinação da superfície: +  0 ° 0 ' 0 "    Azimute da superfície: +  0 ° 0 ' 0 "

-     -

Fuso Horário Local: **Brasilia: UTC-3**

Data: 12/ 8 /2008

**Resultados**

Calcular

Nascer do Sol 1: **6h 16min**    Nascer do Sol 2: [ ]

Pôr do Sol 1: **17h 38min**    Pôr do Sol 2: [ ]

Duração do Dia: **11h 22min**

FIGURA 26 – *Software* AziPlant – Tela para estimativa do nascer e pôr do Sol.

## 4.2 Análise da estimativa da radiação solar direta

Na Figura 25 está ilustrado um gráfico gerado pelo *software* AziPlant, o qual mostra o comportamento da radiação solar direta interceptada estimada pela metodologia proposta (equação 40), sendo aplicada em cada conjunto de dados de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica da série anual coletada pela estação automática representativa à área de café irrigado em questão.

O gráfico torna nítida a tendência de comportamento da radiação solar direta em função da variação dos elementos meteorológicos e, principalmente, em função das relações astronômicas Terra-Sol, sendo que as maiores intensidades são coincidentes com os períodos adjacentes às datas em que a declinação solar se iguala à latitude do local, como ilustrado na Figura 16 e, é claro, influenciado também pelas estações do ano. A radiação solar direta mais intensa interceptada, aconteceu no dia 11 de novembro às 12:00h do horário civil local sendo estimada em  $976,8 \text{ W m}^{-2}$ .

Nota-se que a radiação solar direta interceptada ao longo do ano acompanhou, de certa forma, os comportamentos das temperaturas e umidades relativas, conforme os gráficos gerados pelo *software* AziPlant, os quais estão ilustrados nas Figuras 23 e 24, pois, de acordo com a metodologia descrita no tópico 2.6, estes elementos meteorológicos são “dados de entrada” para o modelo. Contudo, a radiação solar direta parece ser muito mais influenciada pela distribuição local durante o ano, onde as intensidades máximas são observadas em torno dos meses de janeiro/fevereiro e outubro/novembro, épocas em que o sol está próximo do alinhamento com a normal ao plano do horizonte local.

Na Figura 27 visualiza-se a declinação solar nos diferentes dias e a comparação desta com a latitude do local, sendo que para este trabalho os estudos foram simulados para a latitude sul de  $17^{\circ}31'09''$ , onde se localiza a área experimental.

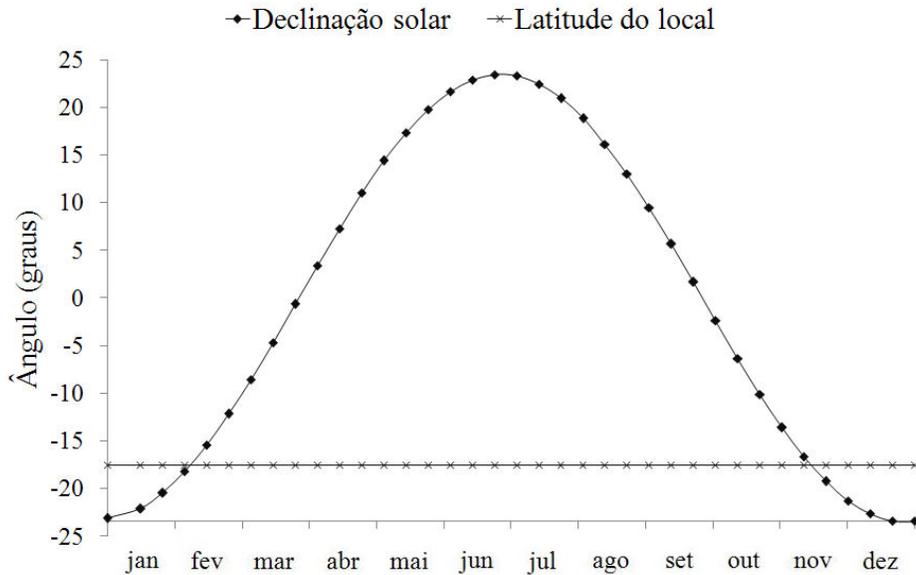


FIGURA 27 – Variação da declinação solar durante o ano.

### 4.3 Resultados experimentais

Os valores de produtividade, em área de café irrigado por pivô central na fazenda São Thomé em Pirapora-MG, foram tabulados e, após análise estatística, obtiveram-se os resultados conforme Tabela 2. Observou-se que houve uma influência do fator azimute de plantio, ou seja, a produtividade foi significativamente afetada ao nível de 5% de probabilidade quando comparados os lados externo, interno e a produtividade total.

TABELA 2 - Resumo da análise de variância contendo a soma de quadrados para produtividade de café no lado externo, interno e total em função do azimute de plantio - Safra: 05/06.

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Lado externo</b>	<b>Lado interno</b>	<b>Total</b>
<b>Ângulos</b>	3	1009,6431*	1925,5604*	5403,6449*
<b>Blocos</b>	3	128,9241	266,11	714,4092
<b>Resíduo 1</b>	9	899,7607	1648,0094	2692,1736
<b>Total</b>	15	2038,3279	3839,6849	8810,2278
<b>CVI</b>		31,78	29,41	22,64

Conforme Tabela 3, na qual estão apresentados os valores de produtividade, verificou-se que a produtividade média total foi de 74,41 sacas de 60 kg/há, das quais 31,45 no lado externo e 42,95 no lado interno. Sendo assim, uma produtividade de 11,5 sacas a mais para o lado interno.

Verificando as médias das produtividades, o tratamento T1 diferenciou-se estatisticamente dos demais tratamentos sendo este o que obteve as menores produtividades, sendo que o tratamento T3 foi o que obteve a melhor produtividade total.

Observa-se que comparar o lado externo com o lado interno não é um procedimento adequado já que as plantas, mesmo do lado externo, podem estar expostas a diferentes direções.

Observando os dados da Tabela 3, conclui-se que as plantas orientadas de modo que estejam faceadas para o sudeste ou noroeste são as de menor produtividade, enquanto as plantas de face nordeste são as que mais produziram.

Nesse caso, a direção ideal de plantio é aquela em que as plantas sejam orientadas de modo tal que, durante o período de maior temperatura (parte da tarde), estejam expostas ao sol por um período inferior do que foram expostas pela manhã quando a temperatura é mais amena. Isso explica porque a face exposta para o nordeste é, teoricamente, a melhor, pois garante que uma das

faces da planta fique exposta ao sol por mais tempo no período de menores temperaturas.

TABELA 3 - Médias de produtividade em sacas de 60 kg/ha de café beneficiado no lado externo, interno e produtividade total em função do ângulo de plantio - Safra: 2005/06.

Tratamentos	Lado externo	Lado interno	Produção total
<b>T1 (sudoeste-nordeste)</b>	17,78 a (face sudeste)	25,32 a (face noroeste)	43,10 a
<b>T2 (leste-oeste)</b>	37,40 b (face norte)	42,96 b (face sul)	80,37 b
<b>T3 (sudeste-noroeste)</b>	35,18 b (face sudoeste)	54,53 b (face nordeste)	89,72 b
<b>T4 (norte-sul)</b>	35,46 b (face oeste)	48,98 b (face leste)	84,44 b
<b>Produtividade média</b>	31,45	42,95	74,41

A direção sudoeste-nordeste, ou vice versa, não é indicada para o plantio do cafeeiro, pois a produtividade pode ser de apenas 50% da produtividade potencial. É possível concluir também que a direção leste-oeste, embora não seja a pior, não parece ser a melhor alternativa para o plantio. Conforme resultados obtidos, a melhor direção parece ser a sudeste-noroeste, ou vice versa, que corresponde ao tratamento 3, cujo azimute é igual a  $-45^\circ$ .

#### 4.4 Azimute estimado com o *software* AziPlant

O *software* AziPlant gerou a recomendação de um azimute adequado para o plantio do café para a área experimental cujos resultados anteriormente apresentados foram obtidos, sendo esta uma área de café irrigada por pivô-central da fazenda São Thomé em Pirapora-MG. A base de dados meteorológica utilizada na estimativa foi coletada no ano de 2004. Na Figura 22 é demonstrado o comportamento das diferentes quantidades de radiações solares diretas interceptadas e acumuladas pelas duas faces de uma linha de plantio da cultura

para cada possível azimute simulado, o qual apontou o azimute cuja diferença de radiação solar direta interceptada acumulada seja mínima comparando as duas faces, igual a  $-24^{\circ} 16'$ , apontando, então, tal azimute como sendo adequado para a área de café irrigado por pivô central da fazenda São Thomé em Pirapora-MG.

#### **4.5 Azimute da linha de plantio**

Os resultados de campo apontam os direcionamentos sudeste-nordeste (mais produtivo) e norte-sul (segundo mais produtivo) como parecendo ser as melhores alternativas para o plantio. É possível concluir também que a direção sudoeste-nordeste não seja indicada para o plantio do cafeeiro, pois a produtividade pode ser de apenas 50% da produtividade potencial. A direção leste-oeste, embora não seja a pior, não parece ser a melhor alternativa para o plantio.

O *software* AziPlant recomenda o azimute  $-24^{\circ} 16'$  como sendo a melhor alternativa para o plantio. Como tal direcionamento está entre os direcionamentos sudeste-nordeste e norte-sul, tal resultado condiz com os resultados obtidos em campo. Também é possível observar, pelo que é apresentado na Figura 8, que o direcionamento apontado diante dos dados experimentais como sendo o pior, no caso o direcionamento sudoeste-nordeste, coincide com os direcionamentos (azimutes) cujas diferenças de radiação solar direta interceptada acumulada entre as duas faces de plantio são maiores.

## 5 CONCLUSÕES

O *software* desenvolvido permite determinar, com precisão satisfatória, o azimute adequado para a linha de plantio, com base na homogeneidade de interceptação da radiação solar em suas faces de linha de plantio. Com isso obteve-se uma importante ferramenta na tomada de decisões relativa à recomendação da orientação da linha de cultivo do café.

A metodologia desenvolvida mostrou-se coerente quando comparada com resultados obtidos em experimentos realizados em campo, atendendo ao objetivo de se investigar, sob o ponto de vista teórico, o ângulo de orientação para a linha de plantio que promovesse a homogeneidade energética nas faces produtivas da cultura.

O *software* AziPlant gerou como recomendação para a área de café irrigado por pivô central da Fazenda São Tomé em Pirapora-MG, o azimute da linha de plantio igual a  $-24^{\circ}16'$ . Azimute tal que se mostrou coerente com o resultado experimental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para estimativa da disponibilidade de luz natural.** Origem: Projeto 02:135.02-002:2003, ABNT/CB-02 – Comitê Brasileiro de Construção Civil, CE-02:135.02 – Comissão de Estudos de Iluminação Natural de Edificações, 02:135.02-002 – Daylighting – Part 1: Basic concepts and definitions, Descriptors: Daylighting.Concepts.Definitions. 17p. AGO/2003.

AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira.** São Paulo: FNP. Consultoria & Agroinformativos, 2007. 520p.

ALVES, A. R. **Irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa, MG.** Viçosa: UFV, 1981. 92p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Agrícola)

ALVES, A. R.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; COELHO, D. T. **Determinação analítica dos instantes do "nascer" e do "pôr-do-sol" para superfícies inclinadas quaisquer.** Revista Ciência e Cultura, São Paulo, v.35, n.2, p.194-8, 1983.

ANDRADE, R.G.R. **A expansão da cafeicultura em Minas Gerais: da intervenção do Estado à liberalização do mercado.** Belo Horizonte: UFMG-CEDEPLAR, 1994. 164p. (Dissertação de Mestrado em Economia).

BROOKS, F.A. **An introduction to physical microclimatology.** Davis: University of California, 1959. 264p.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar energy thermal processes.** New York, John Wiley e Sons, 1974. 386p.

ESCOLA BÁSICA 2, 3 DE GÓIS. ABC da meteorologia. O sol e o clima. Disponível em: <http://www.eb23-gois.rcts.pt/estmeteo/livsol.htm>. Acesso em: 01 de setembro de 2006.

FARIA, M.F.; VILLELE, SILVA, M. de L.O.; GUIMARÃES, P.T.G.; SILVA, E.L. da. Influência das lâminas de irrigação na maturação e produtividade do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) – 2ª Colheita. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 4., 2001. Araguari, MG. **Resumos...** Uberlândia, MG: UFU/DEAGO, 2001. p.11-14.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, R.; SANTO, J. E.; ALVARENGA, M. A. **Variação da Produtividade do Cafeeiro Irrigado sob Pivô Central em Plantio Circular no Oeste da Bahia.** 27º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, Uberaba-MG, 23 a 26 de outubro de 2001, pg.289.

GOMES, M.F.A.B. **Café: algumas considerações. Indicadores de Conjuntura**, Belo Horizonte, v.10, n.2, p.270-303, 1988.

LIU, K.N. **An introduction to atmospheric radiation.** New York: Academic Press, 1980. 392p.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B., ABREU, S. L. de, COLLE, S. **Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3137-3145.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo.** São Paulo: Globo. 1991. (Coleção do agricultor. Grãos) (Publicações Globo Rural).

MATIELLO, J.B.R., SANTINATO, R., GARCIA, A. W., ALMEIDA, S., FERNANDES, D. **Cultura do café no Brasil – Novo Manual de Recomendações.** In: Cap. 4: Formação do Cafezal. Min. Agric. – SARC/PROCAFE. Ed. 2005. 438p.

PALTRIDGE, G.W., PLATT, C.M.R. **Radiative processes in meteorology and climatology.** Amsterdam: Elsevier Scientific, 1976. 318p.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., COUTO, P., STUHLMANN, R., Colle, S.. **Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil.** Solar Energy, 68, 1, 91-107. January, 2000.

ROBINSON, N. **Solar Energy.** Amsterdam: Elsevier, 1966. 347p.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. **Irrigação na Cultura do Café.** Campinas – SP, Eds., 1996, 146p.: il.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Astronomia do Instituto de Física. Desenvolvido por Kepler de S. O. F. e Maria de F. O. S., 2004. Astronomia e Astrofísica. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/>>. Acesso em: 01 de setembro de 2006.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária/UFV, 1991. 449p.