

# MÉDIAS MENSAS DIÁRIAS DA IRRADIAÇÃO DIFUSA EM SUPERFÍCIES HORIZONTAIS E INCLINADAS PARA O NORTE

Adilson Pacheco de Souza<sup>1</sup>; João Francisco Escobedo<sup>2</sup>; Alexandre Dal Pai<sup>3</sup>;  
Fábio Henrique Pires Côrrea<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Agrícola, Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Depto de Recursos Naturais, Fazenda Experimental Lageado, Rua José Barbosa de Barros, nº 1780, CEP: 18610-307, Botucatu-SP, pacheco@fca.unesp.br. <sup>2</sup> Físico, Prof. Doutor, Depto de Recursos Naturais, UNESP/FCA, Botucatu-SP. <sup>3</sup> Físico, Prof. Doutor, Depto de Informática, FATEC, Botucatu-SP. <sup>4</sup> Tecnólogo em Informática, Mestrando em Energia na Agricultura, Depto de Recursos Naturais, UNESP/FCA, Botucatu-SP.

**Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009 - GranDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções - Belo Horizonte, MG**

**RESUMO:** O presente trabalho avaliou os níveis médios mensais diários da irradiação difusa em superfícies horizontais e inclinadas a  $12,85^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$ ,  $22,85^\circ \langle |L| \rangle$  e  $32,85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$ , com a face voltada para o Norte, em Botucatu-SP. O período de dados considerado no estudo foi de 1999 a 2005, com medidas nos anos de 1999 e 2000 na inclinação de  $22,85^\circ$ , entre 09/2001 e 02/2003 em  $12,85^\circ$  e nos anos de 2004 e 2005 em  $32,85^\circ$ , concomitantemente com medidas de rotina em superfícies horizontais. A irradiação difusa nos planos inclinados e na horizontal foi obtida pela diferença. Em grande parte dos meses, nas inclinações de  $22,85^\circ$  e  $32,85^\circ$ , os níveis da irradiação difusa foram inferiores aos valores verificados em superfícies horizontais, enquanto que na inclinação de  $12,85^\circ$ , não se observa nenhuma sazonalidade dos desvios. A medida que o ângulo de inclinação aumenta, ocorre uma variação sazonal dos níveis de irradiação difusa inclinada e difusa horizontal, com ganhos e perdas de irradiação difusa no inverno e no verão quando se aplica os ângulos de inclinação estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Irradiação solar, evolução anual, frações.

## AVERAGE MONTHLY DAILY RATE OF THE DIFFUSE IRRADIATION IN HORIZONTAL AND INCLINED TO THE NORTH SURFACES

**ABSTRACT:** The present work evaluated the medium levels monthly daily of the diffuse irradiation in horizontal surfaces and inclined to  $12.85^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$ ,  $22.85^\circ \langle |L| \rangle$  and  $32.85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$  surfaces, with the face set to the North, in Botucatu, SP. The period of measurements considered in the study was of 1999 to 2005, with measurements in the years of 1999 and 2000 in the inclination of  $22.85^\circ$ , between 09/2001 and 02/2003 in the  $12.85^\circ$  and in the years of 2004 and 2005 in  $32.85^\circ$ , concomitantly with measures of routine in horizontal surfaces. The diffuse irradiation in the inclined and horizontal surfaces was obtained by the difference. To a great extent of the months, in the inclinations of  $22.85^\circ$  and  $32.85^\circ$ , the levels of the diffuse irradiation of were lower to the values verified in horizontal surfaces, whereas in the inclination of  $12.85^\circ$ , was not observed seasonal variation of the deviations. To the extent that the angle of increased inclination, a seasonal variation occurs of the levels of diffuse irradiation slanted and diffuse horizontal, with profits and loses of diffuse irradiation in the winter and in the summer when applies the angles of inclination studied.

**KEYWORDS:** Solar irradiation, annual evolution, fractions.

**INTRODUÇÃO:** A crescente demanda por informações sobre a utilização da radiação solar como fonte suplementar e alternativa às fontes de energia, requer um conhecimento mais

completo da incidência diferenciada da radiação solar sobre as várias partes de uma superfície inclinada, permitindo aplicações em projetos de coletores solares, projetos de arquitetura, planejamento urbano, estudos agrônômicos de insolação sobre vegetação e em estudos micrometeorológicos sobre circulação local. A maioria das estações meteorológicas espalhadas no mundo medem de forma rotineira apenas a radiação solar global, enquanto que medidas das radiações direta e difusa são escassas devido ao elevado custo dos métodos de medidas e instrumentos envolvidos. Qualquer aplicação que pretenda desenvolver algum tipo de uso da energia solar deve começar com o estudo das radiações disponíveis na região selecionada e em inclinações fixadas. Para SCOLAR et al. (2003), estudos das intensidades e variações sazonais da radiação necessitam de medidas por um período mínimo de um ano. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos no Brasil, objetivando conhecer a sazonalidade da radiação difusa em superfícies horizontais (Ricieri, 1998; Soares et al., 2004; Dal Pai & Escobedo, 2006; Drechmer & Ricieri, 2006; Victoria, 2008). Este trabalho objetivou obter a evolução anual das médias mensais diárias das irradiações difusa em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° e em superfícies horizontais, com suas respectivas frações, em Botucatu-SP.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os dados das irradiações global e direta foram coletados na Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude 22°51' Sul, longitude 48°26' Oeste, altitude 786m), no período de abril de 1998 a dezembro de 2007. De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente. Os valores das irradiações difusas horizontais foram obtidos pela diferença entre global e direta, enquanto que, os valores nas inclinações foram obtidos pela diferença entre global, direta e refletida. As leituras foram feitas a cada segundo e as médias armazenadas a cada 5 minutos, em um sistema de aquisição de dados Microlloger CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz. Na transferência dos dados é empregado um módulo de memória SM192 também da Campbell com interface SC532 para microcomputadores e operado pelo software PC 208W da Campbell. As irradiações globais no plano horizontal foram medidas com auxílio de piranômetros EPPLEY-PSP, com fator de calibração de  $7,45\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$  e linearidade de  $\pm 0,5\%$  (0 a 2800  $\text{W}/\text{m}^2$ ). Para a irradiação global inclinada, os piranômetros foram posicionados paralelamente sobre planos inclinados de  $12,45^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$ ,  $22,85^\circ \langle |L| \rangle$  e  $32,85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$  com a face voltada para o Norte. As irradiações diretas na incidência  $\langle I_{\text{BN}} \rangle$  foram obtidas por um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 EPPLEY, com fator de calibração de  $7,59\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$  e linearidade de  $\pm 0,5\%$  (0 a 1400  $\text{W}/\text{m}^2$ ). A projeção da irradiação direta na horizontal foi dada pelo produto entre  $\langle I_{\text{BN}} \rangle$  e o cosseno do ângulo zenital (IQBAL, 1983). No entanto, como as medidas nas três inclinações não foram realizadas concomitantemente, a distribuição das medidas em cada inclinação foi: para 12,45° as medidas ocorreram entre 09/2001 e 02/2003; para 22,85° entre 01/1999 e 12/2000 e na inclinação de 32,85° entre 01/2004 e 12/2005. Estes dados sofreram uma análise de consistência e os valores discrepantes (oriundos de erros de leitura dos sensores ou mau funcionamento do sistema de aquisição de dados) foram removidos das séries. As médias e os desvios mensais foram obtidos com o agrupamento de todos os dados de cada respectivo mês.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 01 são apresentadas as evoluções anuais da irradiação difusa de referência para superfícies inclinadas e horizontais. Nos planos inclinados os níveis médios mensais de irradiação difusa acompanharam a evolução anual da irradiação difusa na horizontal, com maiores valores no verão e menores no inverno, decorrentes variações de cobertura do céu nas duas estações, respectivamente. Observou-se que os níveis de  $\langle \overline{H_{\text{DB}}^d} \rangle$  na inclinação de 12,85° foram semelhantes aos verificados na horizontal ao longo de todo o ano,

com valores superiores e inferiores a  $0,57$  e  $-1,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em dezembro e setembro. O pico de irradiação difusa verificado no mês de maio, tanto para a superfície inclinada a  $12,85^\circ$  e horizontal, foram decorrentes do aumento da razão de nebulosidade no município de Botucatu, durante o ano de 2002. Nos meses de maio, junho e julho, em  $\langle |L| - 10^\circ \rangle$  foram verificados  $5,22$ ;  $3,37$  e  $4,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ .

O aumento do ângulo de inclinação propiciou um incremento da diferença entre os níveis de  $\langle \bar{H}_{D\beta}^d \rangle$  e  $\langle \bar{H}_{DH}^d \rangle$  nos meses de verão e inverno, com perdas e ganhos e irradiação difusa nos planos inclinados. Nos meses de inverno, no ângulo  $\langle |L| \rangle$  os valores foram semelhantes aos verificados no plano horizontal, com intensidades de  $4,95$ ;  $4,59$  e  $5,69 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  em maio, junho e julho. Em novembro, dezembro e janeiro, o plano inclinado a  $22,85^\circ$  apresentou perdas de  $1,35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (12,9%),  $0,96 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (8,93%) e  $0,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (7,77%), respectivamente. Na inclinação de  $32,85^\circ$ , foram verificados níveis energéticos de  $\langle \bar{H}_{D\beta}^d \rangle$  similares entre as duas superfícies em maio e agosto ( $5,15$  e  $4,98 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). Entre setembro e maio, o plano horizontal recebe mais irradiação difusa quando comparado com o inclinado, sendo as maiores diferenças encontradas em dezembro, janeiro e fevereiro ( $2,18$ ;  $2,04$  e  $2,29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). O contrário foi notado nos meses de inverno, com maiores diferenças ocorridas em junho ( $0,73 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

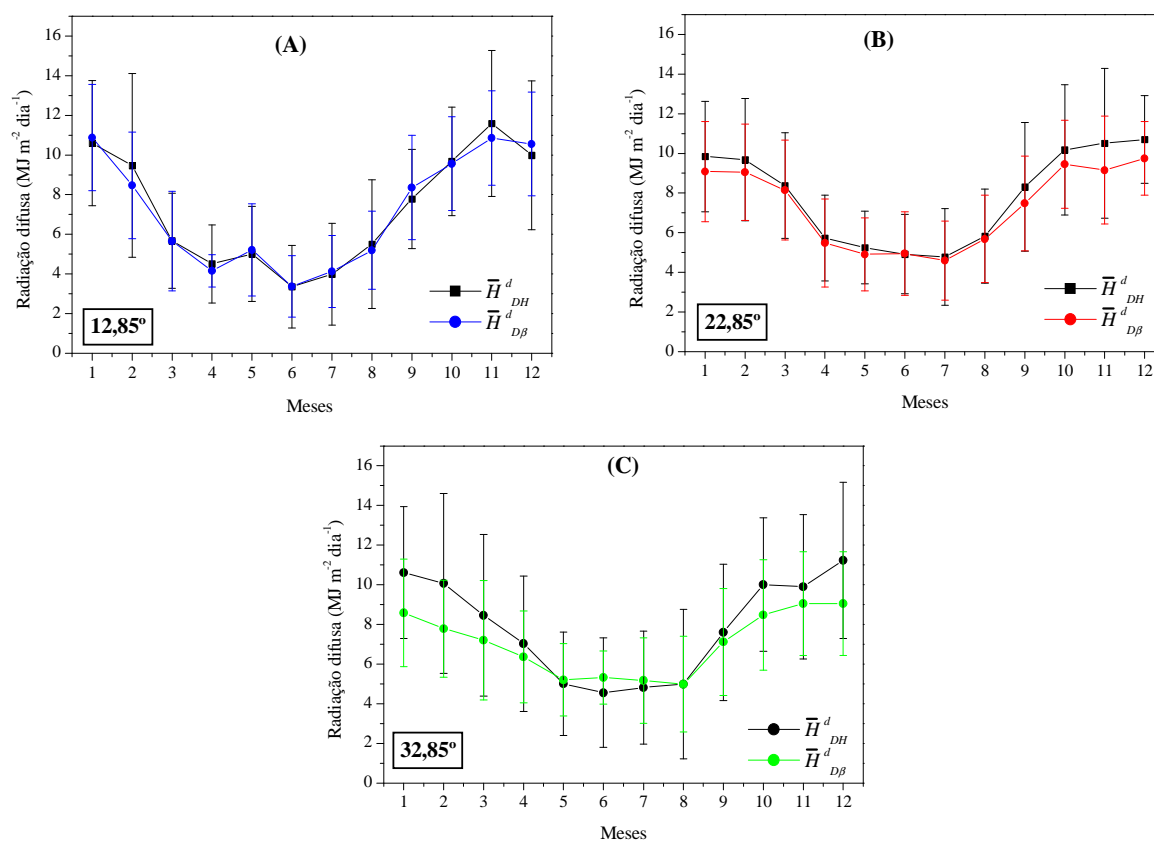


Figura 01. Evolução anual da irradiação difusa em superfícies horizontais e inclinadas a  $12,85^\circ$ ,  $22,85^\circ$  e  $32,85^\circ$ , com a face voltada para o Norte, em Botucatu-SP.

Os desvios médios mensais entre a irradiação difusa de referência nas superfícies inclinadas e horizontais são apresentados na Figura 02. Observa-se que em grande parte dos meses, as superfícies horizontais recebem níveis de  $\langle \bar{H}_{DH}^d \rangle$  superiores do que as inclinações de  $22,85^\circ$  e  $32,85^\circ$ . Todavia, as maiores perdas ocorrem na inclinação de  $32,85^\circ$ , atingindo desvios

de até -29,37% (fevereiro), -24,12% (dezembro) e -23,73 (janeiro). Já os desvios negativos em 22,85°, são inferiores a -14,76% (novembro). Os desvios máximos positivos foram verificados na inclinação de 22,85° nos meses de março e junho (30,35% e 32,15%).

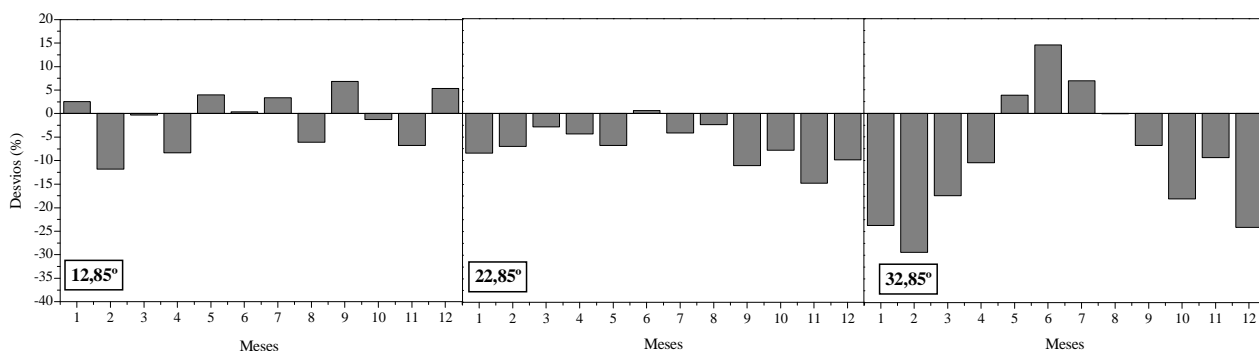


Figura 02. Desvios médios mensais da irradiação difusa incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, comparada com valores médios mensais em superfícies horizontais.

As razões entre as irradiações difusa e global  $\langle \overline{K_d} \rangle$  para as superfícies inclinadas e horizontais, são apresentadas na Tabela 01. Como a irradiação global, é dependente do somatório entre a irradiação direta, difusa e refletida incidente, nos meses em que a irradiação direta apresentar menores valores médios ocorre um aumento dos valores médios da irradiação difusa. Nas superfícies horizontais, pode-se notar uma variação ao longo dos períodos de medidas, causadas pelas condições climáticas de cada período. Nos anos de 1999, 2000, 2004 e 2005, o mês de janeiro apresentou os maiores valores de  $\langle \overline{K_{dH}} \rangle$ , enquanto que nos anos de 2002 e 2003, esse comportamento ocorreu no mês de fevereiro. Já os menores valores de  $\langle \overline{K_{dH}} \rangle$ , também ocorreram em meses diferentes, sendo em julho (0,322) para 1999 e 2000, em junho para 2002 (0,20) e em agosto para 2004 e 2005 (0,249).

Tabela 01. Frações médias mensais da relação entre a irradiação difusa de referência e a irradiação global  $\langle \overline{K_d} \rangle$  para superfícies inclinadas e horizontais.

Meses	1999 - 2000		2001-2003		2004 - 2005	
	Horizontal	$\beta - 22,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 12,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 32,85^\circ$
Janeiro	0,585 ± 0,28	0,618 ± 0,25	0,551 ± 0,22	0,481 ± 0,18	0,699 ± 0,30	0,712 ± 0,29
Fevereiro	0,527 ± 0,27	0,551 ± 0,25	0,591 ± 0,24	0,519 ± 0,20	0,444 ± 0,29	0,458 ± 0,28
Março	0,406 ± 0,25	0,438 ± 0,24	0,297 ± 0,20	0,266 ± 0,17	0,431 ± 0,30	0,424 ± 0,29
Abril	0,274 ± 0,24	0,298 ± 0,24	0,206 ± 0,06	0,192 ± 0,05	0,406 ± 0,24	0,387 ± 0,26
Mai	0,284 ± 0,19	0,275 ± 0,17	0,425 ± 0,29	0,376 ± 0,25	0,389 ± 0,29	0,335 ± 0,30
Junho	0,369 ± 0,27	0,372 ± 0,26	0,200 ± 0,09	0,187 ± 0,08	0,367 ± 0,29	0,310 ± 0,32
Julho	0,322 ± 0,26	0,318 ± 0,26	0,358 ± 0,30	0,328 ± 0,27	0,369 ± 0,30	0,301 ± 0,30
Agosto	0,365 ± 0,28	0,364 ± 0,27	0,309 ± 0,26	0,271 ± 0,21	0,249 ± 0,20	0,213 ± 0,21
Setembro	0,433 ± 0,28	0,462 ± 0,26	0,437 ± 0,28	0,367 ± 0,22	0,428 ± 0,29	0,413 ± 0,27
Outubro	0,484 ± 0,27	0,525 ± 0,24	0,397 ± 0,18	0,340 ± 0,14	0,659 ± 0,31	0,665 ± 0,29
Novembro	0,440 ± 0,30	0,486 ± 0,27	0,569 ± 0,29	0,488 ± 0,24	0,554 ± 0,32	0,565 ± 0,29
Dezembro	0,473 ± 0,22	0,533 ± 0,21	0,502 ± 0,27	0,444 ± 0,22	0,592 ± 0,28	0,617 ± 0,26

Todavia, pode ser observada uma variação sazonal dependente principalmente dos efeitos da nebulosidade. Entre novembro e fevereiro, a fração difusa da irradiação global para superfícies horizontais em Botucatu-SP foi de no mínimo 0,440 ± 0,30 (novembro) e no máximo de 0,699 ± 0,30 (janeiro). Já entre os equinócios de outono e primavera, os valores de  $\langle \overline{K_{dH}} \rangle$

variaram entre  $0,200 \pm 0,09$  (junho) e  $0,484 \pm 0,27$  (outubro). Essa sazonalidade é importante, pois se apresenta como uma característica do local, permitindo a partir dessa análise se avaliar o efeito das inclinações. Quando comparamos os valores de  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  das superfícies inclinadas com os valores das superfícies horizontais, em cada período de medidas, também podemos verificar uma sazonalidade dependente da inclinação. No ângulo de  $12,85^\circ$ , independente do mês, a superfície inclinada apresentou valores de  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  inferiores ao da superfície horizontal, com menores diferenças no período de inverno e maiores no período de verão. Nessa inclinação o máximo da fração difusa em relação a irradiação global foi de 51,9% em janeiro e o mínimo de 18,7% em junho. Na inclinação de  $22,85^\circ$ , os meses de maio, julho e agosto, apresentaram valores de  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  inferiores aos encontrados para a superfície horizontal. As maiores frações  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  foram encontradas no mês de janeiro, tanto para a superfície inclinada quanto para a horizontal (0,618 e 0,585), indicando o efeito da inclinação. Em  $32,85^\circ$ , esse comportamento foi acentuado, pois os valores de  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  foram superiores para superfície inclinada apenas nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nesse ano ocorreram valores de frações difusas elevados para a superfície horizontal nos meses de dezembro e janeiro, sendo também acompanhado pela superfície inclinada. As diferenças entre os valores de  $\langle \overline{K_{d\beta}} \rangle$  no período de inverno são crescentes com o aumento da intensidade de inclinação. Esse comportamento não era esperado, pois ocorre uma diminuição da diferença entre os níveis de irradiação difusa entre a superfície horizontal e inclinada no período de inverno com o aumento da intensidade de inclinação. Todavia, o uso das frações pode propiciar a visualização dessas tendências, uma vez que, no seu emprego são eliminadas as dependências astronômicas e geográficas que os níveis das irradiações possuem, permanecendo apenas a dependência climática.

**CONCLUSÕES:** A medida que o ângulo de inclinação aumenta, ocorre uma variação sazonal dos níveis de  $\langle \overline{H_{D\beta}^d} \rangle$  e  $\langle \overline{H_{DH}^d} \rangle$ , com ganhos e perdas de irradiação difusa no inverno e no verão quando se aplica os ângulos de inclinação estudados.

#### **REFERÊNCIAS:**

- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica. *Energia na Agricultura*, v. 21, p. 1-15, 2006.
- DRECHMER, P. A. O.; RICIARI, R. P. Irradiação global, direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado Paraná do. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 28, n. 01, p. 73-77, 2006.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983. 390 p.
- RICIARI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. 1998. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.
- SCOLAR, J.; MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 21, n. 3, p. 249-258, 2003.
- SOARES, J.; OLIVEIRA, A. P.; BOZAR, M. Z.; MLAKAR, P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, A. J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v. 79, p. 201-204, 2004.
- VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotoelétricos**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Meteorologia), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.