



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Influência das Mudanças de Tempo e Variabilidade Climática sobre a Produção de Energia Fotovoltaica no Estado do Maranhão

Francisco Emenson Carpegiane Silva Feitosa¹, Ramisa Cristina Rodrigues Belo², Jessflan Rafael Nascimento Santos³, Mayara Lucyanne Santos de Araújo⁴, Juliana Sales dos Santos⁵, Fabrício Brito Silva⁶

¹ Bacharelado em Engenharia Ambiental. Mestrando em Ciências Climáticas - Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Campus Natal. E-mail: emenson.eng@gmail.com. ² Graduando em Engenharia de Produção - Universidade Ceuma - Campus Renascença. E-mail: rami-sa.rodrigues@hotmail.com. ³ Bacharelado em Engenharia Ambiental. Mestrando em Meio Ambiente - Universidade Ceuma – Campus Renascença. E-mail: jessflan@ymail.com. ⁴ Bacharelado em Engenharia Ambiental. Mestranda em Geociências Aplicadas - Universidade de Brasília. E-mail: mayara.araujo.eng@gmail.com. ⁵ Graduando em Engenharia Ambiental - Universidade Ceuma - Campus Renascença. E-mail: julianasales.engenharia@gmail.com. ⁶ Bacharelado em Agronomia. Mestre em Agronomia. Doutor em Sensoriamento Remoto – INPE. Coordenador do Mestrado em Meio Ambiente da Universidade Ceuma. E-mail: fabricioagro@gmail.com.

Artigo recebido em 12/05/2017 e aceito em 25/02/2018

RESUMO

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para utilização de dados provenientes de sensoriamento remoto para o planejamento de projetos de energia fotovoltaica no Maranhão. Foram utilizados dados de radiação obtidos na base global GLDAS e precipitação proveniente do satélite TRMM, no período de 2001 a 2014. Os dados de radiação foram processados através da técnica de análise de séries temporais (ACP). O potencial de produção de energia fotovoltaica foi simulado considerando um sistema de 20 módulos fotovoltaicos, cada um com potencial nominal de 45Wp. Uma análise de regressão linear foi realizada para avaliar a correlação entre radiação e precipitação. Por último, o teste de Mann Kendall foi executado para avaliar as tendências nos dados de radiação e precipitação. Através da ACP foram identificadas duas Zonas homogêneas em relação à radiação, uma menor na região do Oeste (bioma amazônico) e a maior na região Leste do Estado (bioma cerrado). A precipitação respondeu por 21,3% na variação anual da radiação na região da Amazônia e 31,2% no Cerrado. A região de cerrado apresentou os maiores valores de radiação solar, e os menores valores foram registrados na região da Amazônia. Pelo teste de Mann Kendall, houve uma tendência linear de aumento na média mensal de radiação solar incidente na região amazônica e cerrado, tanto no período seco quanto no chuvoso. As análises mostraram um cenário favorável para produção de energia solar no Estado do Maranhão, com reduzido risco climático devido à tendência no aumento da radiação.

Palavras-chave: energias renováveis, planejamento energético, mudanças climáticas.

Climate Risk for Photovoltaic Energy Production in the state of Maranhão

ABSTRACT

The objective of this study was to develop a methodology for use of data from remote sensing in planning photovoltaic energy projects in the Maranhão. Solar radiation data was obtained from global basis GLDAS and rainfall from the TRMM satellite, from 2001 to 2014. The radiation data were processed through the time series analysis technique (PCA). The photovoltaic power generation potential was simulated considering 20 photovoltaic module system, each one with a nominal power of 45Wp. A regression analysis was performed to evaluate the correlation between radiation and precipitation. Finally, the Mann Kendall's test was performed to evaluate trends in radiation and precipitation data. By PCA were identified two homogeneous zones in relation to radiation, lower in the west (Amazon biome) and the largest east region of the state (Savanna biome). Rainfall represented 21.3% in the annual variation of radiation in the Amazon region and 31.2% in Savanna. The Savanna region showed the highest solar radiation values and the lowest values were recorded in the Amazon region. By Mann Kendall test, there was a positive linear trend of increase in the monthly average incident solar radiation in the Amazon region (Kendall's tau = 0.2173, p < 0.0001) and in the Savanna region (Kendall's tau = 0.1651, p = 0.0011). Analyses showed a favorable scenario for the production of solar energy in the state of Maranhão, with a low climate risk due to the trend in increased radiation.

Keywords: renewable energy, energy planning, climate change.

Introdução

A energia solar fotovoltaica (PV), tecnologia usada para converter a radiação solar em eletricidade, tornou-se uma tecnologia viável e ganhou popularidade em todo o mundo na última década. A concorrência internacional, juntamente com anos de aperfeiçoamento na fabricação, pesquisa e desenvolvimento, resultou em melhoria da eficiência dos módulos fotovoltaicos, redução de custos e aumento de produtividade (Gong, 2005). Em particular, a energia solar é vista como a fonte de energia renovável mais promissora devido aos benefícios que ela oferece (Weinrub, 2011) e da produção de energia proveniente do sol que vem aumentando desde 1850 (Foukal, 1990; Francis e Hengeveld, 1998).

Em 2014, devido a um aumento de 7,171 MW, a capacidade instalada de geração de eletricidade do Brasil atingiu 133,914 MW, os quais parques eólicos e solares foram responsáveis por 37,6% desse aumento (EPE, 2015). A capacidade instalada de energia elétrica a partir do sol irá representar cerca de 4% da produção total do Brasil em 2024. Atualmente, PV representa 0,02% da energia elétrica do país (MME, 2015).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2016, em relação a geração de eletricidade no Maranhão, 19,59% da eletricidade produzida é oriunda de hidroelétricas, 80,40% corresponde a termoelétricas e 0,01% é representado por energia solar, bagaço de cana de açúcar e óleo diesel. Em relação a energia gerada por fontes fósseis, no Estado se destaca a produção de gás natural (EPE, 2016).

A radiação solar global é determinada pelos fatores astronômicos (por exemplo, declinação solar, comprimento do dia), por propriedades atmosféricas (incluindo nebulosidade, vapor de água e aerossol) e em menor medida pelas condições da superfície (uso da terra, sombreamentos, albedo e orografia). O fluxo solar radiativo que atinge a superfície da Terra é influenciado principalmente, pela variabilidade espaço-temporal das nuvens (Dubayah e Loechel, 1997). Por isso, a nebulosidade é o componente mais ativo do fluxo de radiação solar do sistema Terra-Atmosfera (Salby, 1996), refletindo cerca de 30% da radiação solar incidente para o espaço, reduzindo assim o balanço de energia da superfície.

A natureza e as atividades humanas liberam gases do efeito estufa na atmosfera que mudam a sua composição perturbando o equilíbrio entre a energia radiante de entrada e saída, produzindo assim, importantes efeitos sobre a dinâmica climática (IPCC, 2014). A energia fotovoltaica contribui significativamente na redução da emis-

são desses gases (Alsema, 2000). No Brasil, estima-se que a cada 1KWp de energia fotovoltaica gerada, e conectada na rede de distribuição haverá uma redução na ordem de 1,359 kg de CO₂ (Krauter e Ruther, 2003).

O sensoriamento remoto e geoprocessamento (GIS) podem ser utilizados para avaliar o potencial de várias alternativas renováveis de energia, incluindo aspectos, tais como, a localização geográfica (Wang e Koch, 2010), a tecnologia utilizada para o aproveitamento de energias renováveis, a viabilidade econômica (De Vries et al., 2007), entre outros. A importância do GIS nesse tipo de avaliação tem sido destacada. Vários estudos concentraram-se em energia solar (Trieb, 2009), com o objetivo de determinar o potencial de geração de energia fotovoltaica e identificar os locais ideais para implementação da tecnologia e assim melhorar a eficiência dos projetos (Wang e Koch, 2010). Uma das principais contribuições das geotecnologias se deve ao fato de compensar a falta de instrumentos de medida em superfície em locais remotos como na Amazônia. Em comparação com as medições de outras variáveis meteorológicas, a medição da radiação solar apresenta o maior grau de incerteza (Moradi, 2009).

Em conclusão, a precipitação representa um componente negativo no balanço de radiação incidente no planeta (Harison et al., 1990). Portanto, o foco do presente estudo é estimar os valores de radiação solar incidente e verificar o quanto os valores de precipitação interferem na radiação solar incidente no estado do Maranhão, com o objetivo de gerar subsídios para o crescimento da produção de energia fotovoltaica no estado.

Material e métodos

Área de Estudo

O Estado do Maranhão está localizado no extremo ocidental do Nordeste Brasileiro e extremo leste da Bacia Amazônica (Figura 1). O Estado abriga uma área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia, o que implica em uma área de alta variabilidade climática, bem como, apresenta uma grande biodiversidade reconhecida internacionalmente. (Serafini, 2007).

Em relação à diversidade climática, o Estado apresenta a noroeste o clima tropical quente e úmido, típico da região amazônica. No Sudeste é marcado por clima tropical quente e semiúmido. A vegetação reflete os aspectos transacionais do clima e das condições edáficas da região de transição entre as regiões amazônica (úmida) e nordeste (semiárida), dos quais resultaram variados ecossistemas, desde ambientes costeiros com pre-

sença de manguezais, passando por campos inundáveis, cerrados e babaçuais, até a florestal om-

brófila densa, característica da Amazônia (Muniz, 2006).

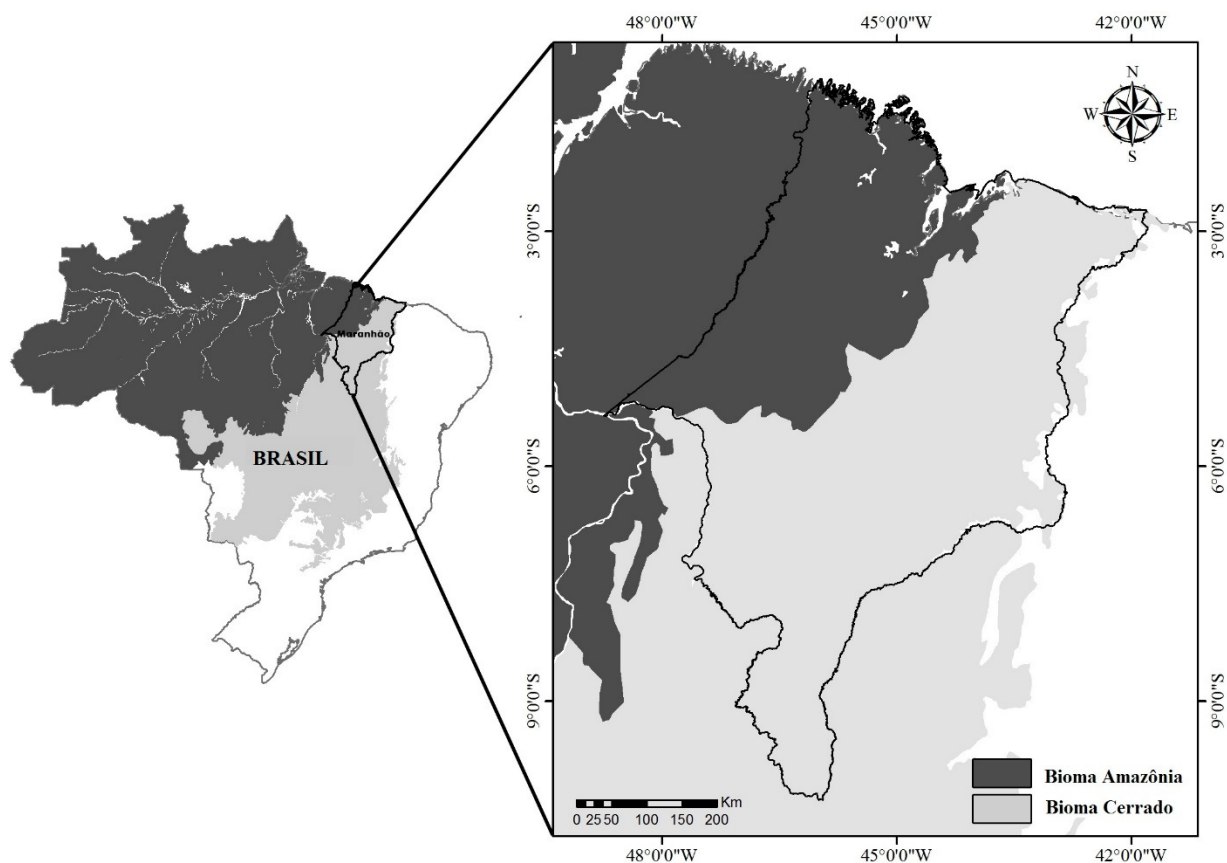


Figura 1. Área de estudo destacando a localização do estado do Maranhão em uma área de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado.

Procedimentos metodológicos

Os dados de radiação solar incidente na superfície e de precipitação, foram obtidos a partir da base de dados Global Land Data Assimilation System (GLDAS) e Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), respectivamente. As duas bases compõem uma série temporal de 14 anos (2001 e 2014), apresentam resolução temporal mensal e resolução espacial de 0.25° . Os dados de radiação solar apresentam a unidade de $\text{Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ e as médias mensais de precipitação apresentam a unidade de mm.

Com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e representar a máxima variabilidade espacial foi realizada uma Análise por Componentes Principais (ACP). A primeira imagem da ACP, por apresentar a máxima variabilidade espacial, foi utilizada para a realização de uma técnica de análise de agrupamentos denominada k-médias, com o objetivo de gerar uma imagem classificada na qual apresenta as classes (Zonas homogêneas) referentes à radiação solar incidente na superfície. (Mather e Koch, 2010).

A partir das classes identificadas na análise de agrupamento foram calculadas as médias mensais de radiação incidente na superfície e precipitação, gerando assim as séries temporais de cada classe.

A análise de regressão linear foi utilizada para caracterizar as relações entre a radiação solar incidente e a precipitação. Para a verificação de tendências de aumento ou decréscimo nas séries temporais, o teste de Mann-Kendall foi usado, com um nível de confiança de 10% (Kendall, 1955).

Simulação da geração de energia fotovoltaica

No dimensionamento de um sistema fotovoltaico deve ser considerado a condição da potência nominal necessário ou desejado. Outro fator importante é o cálculo do número de módulos fotovoltaicos N necessários para atender a potência nominal do gerador calculado anteriormente ou estipulado. O cálculo leva em conta o poder nominal total da instalação fotovoltaica P_t em W_p (Watt pico), e a potência nominal de cada painel P_p , também em W_p (Eq. 1).

$$N = P_t / P_p \quad (1)$$

Através do somatório dos valores diários mensais da radiação incidente, foi determinado o número total de horas de Sol pleno (H), isto é, o número de horas que a radiação solar deve permanecer constante a 1000 W.m^{-2} de energia solar irradiada (Eq. 2) (Alves e Souza, 2014).

$$H = R_t / 1000 \quad (2)$$

Onde R_t é a radiação solar diário incidente (kWh.m^{-2}).

A energia produzida pelo arranjo de módulos fotovoltaicos é calculada usando a seguinte equação:

$$E_p = P_t \cdot H \cdot \eta_T \quad (3)$$

Onde E_p representa a energia produzida (em kW), η_T é fator de eficiência do conversor.

Considerou-se que o inversor possui um fator de eficiência de 93%. Neste trabalho foi utilizada como exemplo o módulo fotovoltaico com uma potência nominal de modelo 45Wp KC-50T produzida pela fabricante Kyocera, resultando na necessidade de se usar um arranjo de 20 módulos com uma potência nominal total de 900 Wp.

Neste estudo não serão incluídos os preços de componentes e materiais, devido à viabilidade econômica não ser o objetivo deste artigo.

Resultados e discussão

Zoneamento Radiação Solar

A metodologia de processamento dos dados de radiação incidente na superfície gerou um mapa constituído por duas Zonas (classes) (Fig. 1). Através de uma análise visual foi possível perceber uma correspondência espacial entre as Zonas identificadas e as regiões dos biomas Amazônia (oeste) e Cerrado (leste).

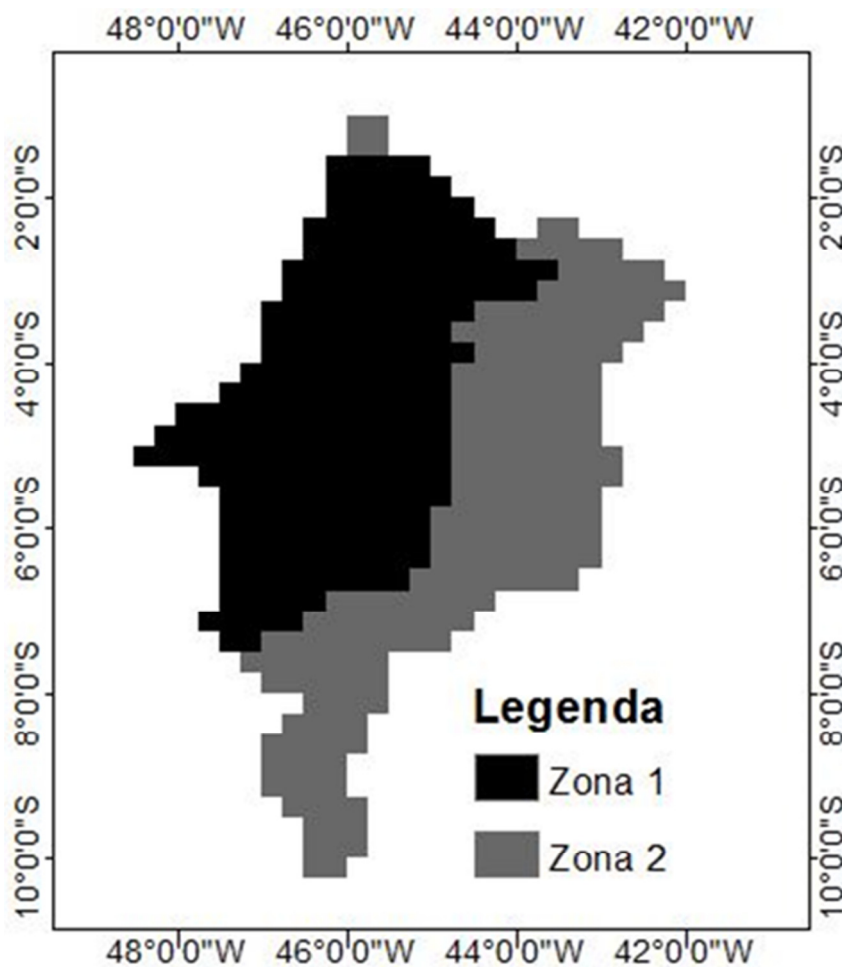


Figura 2. Mapa de zoneamento da radiação mensal no estado do Maranhão.

As séries temporais de precipitação e radiação solar incidente foram calculadas considerando as Zonas identificadas.

A Tabela 1 apresenta os valores de precipitação ao longo anual, em 2012 (1306,6 mm) foram observados os menores valores e os maiores ocorreram em 2011 (2095,6 mm).

Tabela 1. Variação Mensal da precipitação (mm) na Zona 1 entre 2001 a 2014.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
2001	227,8	295,2	351,3	400,6	121,7	121,9	56,0	7,7	16,7	25,7	78,2	89,8	1792,5
2002	410,4	154,8	268,2	334,1	190,9	92,4	36,6	8,7	24,7	19,8	51,6	110,5	1702,7
2003	196,3	372,2	356,1	281,7	170,7	99,8	33,4	33,7	15,3	15,3	85,7	85,5	1745,7
2004	395,2	401,8	360,4	256,2	122,1	78,4	68,6	41,9	19,9	35,2	42,6	82,1	1904,2
2005	168,6	243,3	380,5	232,7	167,3	93,5	38,8	13,4	9,4	18,1	70,8	176,8	1613,1
2006	137,4	266,2	368,3	440,2	237,0	61,5	30,4	36,0	22,9	41,9	111,0	73,8	1826,6
2007	77,0	450,2	274,1	301,2	135,3	55,2	40,7	16,4	14,9	40,5	43,3	121,0	1569,9
2008	254,8	255,5	491,6	300,8	229,5	93,7	47,7	27,9	9,1	34,7	57,5	143,1	1946,0
2009	137,7	329,2	347,7	472,7	392,5	90,1	47,5	23,8	8,5	46,7	19,1	120,2	2035,7
2010	205,1	172,2	160,7	299,9	136,6	90,6	69,8	16,6	6,2	69,6	67,0	146,5	1440,7
2011	321,2	413,2	314,0	346,5	230,3	77,7	85,0	33,8	6,6	95,1	126,6	45,6	2095,6
2012	169,7	248,4	282,1	161,4	72,2	77,0	37,3	19,8	16,7	32,6	73,4	116,0	1306,6
2013	168,7	196,6	275,7	203,8	174,7	70,2	70,4	17,8	19,6	43,0	111,7	98,3	1450,3
2014	223,5	328,0	263,8	288,5	243,8	74,3	26,6	14,4	26,0	37,1	63,7	99,0	1688,6
Média Mensal	200,7	280,7	330,8	300,3	172,7	84,2	44,1	18,8	16,0	36,1	68,9	104,8	1722,7

A Tabela 2 apresenta os valores de precipitação ao longo da série temporal estudada (2001 a 2014) na Zona 2. Considerando a estação chuvosa o período de meses com precipitação mensal acima de 100 mm foi possível observar o início da

estação chuvosa entre outubro e janeiro, e, início da estação seca entre maio e junho. Considerando o total anual, em 2012 (1102,0 mm) foram observados os menores valores e os maiores ocorreram em 2009 (1968,3 mm).

Tabela 2. Variação Mensal da precipitação (mm) na Zona 2 entre 2001 a 2014.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
2001	166,0	253,3	283,7	294,0	91,2	75,7	21,4	2,7	18,6	38,0	103,5	126,7	1474,9
2002	396,1	139,1	231,7	212,3	117,9	55,3	21,7	3,3	42,2	32,5	62,3	137,6	1451,8
2003	197,4	327,2	268,1	187,7	131,8	65,3	9,5	22,5	13,0	23,0	92,2	98,6	1436,4
2004	411,7	356,2	285,7	237,4	81,2	47,3	30,7	24,6	14,2	41,0	61,9	93,5	1685,3
2005	172,1	238,7	347,2	149,5	110,0	47,7	29,1	3,1	11,2	21,0	70,4	181,1	1381,0
2006	109,4	256,0	316,9	392,6	186,1	35,5	8,4	22,3	32,9	68,3	99,0	97,5	1625,2
2007	72,8	424,7	187,5	227,6	90,8	20,5	23,6	4,3	9,9	31,4	59,0	90,1	1242,2
2008	275,6	217,5	401,3	313,8	172,5	58,3	25,3	12,5	13,3	24,0	80,0	139,2	1733,5
2009	171,5	273,6	266,9	486,8	358,9	50,6	28,3	13,8	14,0	82,5	42,4	179,1	1968,3
2010	181,9	170,9	168,4	234,4	84,0	82,1	30,6	4,0	8,4	77,3	74,0	148,7	1264,7
2011	237,5	352,2	258,8	313,6	180,4	32,2	45,1	18,0	5,1	115,4	160,6	72,6	1791,5
2012	189,1	219,0	233,4	105,6	39,8	40,4	13,6	6,0	7,9	34,9	104,4	108,0	1102,0
2013	230,1	179,0	249,3	181,4	104,4	54,4	39,7	5,1	14,4	65,5	156,0	130,6	1410,0
2014	192,9	249,9	208,1	218,1	216,2	38,3	8,5	7,9	20,1	50,0	109,9	121,5	1441,3
Média Mensal	214,6	261,2	264,8	253,9	140,4	50,3	24,0	10,7	16,1	50,4	91,1	123,2	1500,6

A Tabela 3 apresenta os valores de radiação solar incidente média mensal na Zona 1 e foi possível observar o valor mínimo em torno de 5000 Wh.m⁻².d⁻¹ em janeiro, fevereiro e abril. A radiação solar média mensal máxima na Zona 1 foi observada em agosto e

setembro (período seco) com 6137 e 6204 Wh.m⁻².d⁻¹, respectivamente. Considerando o total anual, na Zona 1 os maiores valores de radiação solar anual total ocorreu em 2001 (70406 Wh.m⁻².d⁻¹). Os menores valores foram observados em 2003 (58018 Wh.m⁻².d⁻¹).

Tabela 3. Variação Mensal da radiação solar diária ($\text{Wh. m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) na Zona 1 entre 2001 a 2014.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
2001	3670	3664	5756	5606	5800	6065	6348	6929	7096	6848	6282	6343	70406
2002	6020	6636	6430	6007	6050	6020	5681	5877	5377	4798	4728	4393	68018
2003	4408	4352	4172	4387	4804	4971	5786	5475	5434	4928	4771	4533	58018
2004	4540	4240	4249	4572	4972	5298	5406	5411	5064	4870	5020	4653	58295
2005	5134	4883	4646	4917	4959	5178	5955	6110	5902	5024	4638	4604	61950
2006	4727	5095	4629	4118	4541	5437	5369	5931	5709	4837	4917	4878	60188
2007	4935	4310	4901	4797	4889	5584	5162	6465	6801	5694	5212	5152	63902
2008	4990	5499	4897	5023	5412	5643	5671	6312	6634	6619	5580	5208	67490
2009	5681	5607	5632	5119	4958	5666	5832	6104	5851	5300	5326	4865	65942
2010	5331	4869	5138	4622	5177	5666	5884	6343	6845	5579	5125	5204	65783
2011	5001	4948	5358	5275	5179	5919	6132	5511	6792	5294	5287	5656	66352
2012	5124	5276	5811	5594	5475	5217	5725	6501	6622	5694	5178	5588	67805
2013	5298	5711	5611	5923	5396	5653	5899	6511	6379	5674	4931	5313	68297
2014	5072	4823	5165	5238	4819	5561	5809	6441	6354	5892	5691	5360	66225
Média Mensal	4995	4994	5171	5086	5174	5563	5761	6137	6204	5504	5192	5125	64905

A Tabela 4 apresenta os valores de radiação solar incidente média mensal na Zona 2 e foi possível observar o valor mínimo de $5173 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ em fevereiro. O valor máximo de $6724 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ foi observado em se-

tembro. Considerando radiação solar incidente total anual, em 2001 e foi registrado o maior valor, sendo $72170 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ e os menores valores em 2003 ($62310 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$).

Tabela 4. Variação Mensal da radiação solar diária ($\text{Wh. m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) na Zona 2 entre 2001 a 2014.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
2001	3967	3975	5814	5785	5905	6126	6387	6960	7320	6982	6367	6581	72170
2002	6249	6819	6486	6074	6075	6005	5880	6260	5957	5531	5289	4696	71322
2003	4732	4544	4389	4621	4916	5192	6165	5697	6116	5834	5256	4848	62310
2004	4412	4535	4560	4728	5415	5496	5742	6161	6190	5511	5613	5122	63486
2005	5264	5088	4693	5145	5104	5353	6251	6592	6660	5868	5175	4924	66117
2006	5211	5142	4798	4234	4800	5598	5643	6517	6298	5207	5346	5156	63949
2007	5025	4445	5242	4820	5268	5682	5230	6832	7208	6430	5688	5466	67336
2008	5001	5528	5036	5261	5629	5768	5697	6489	7110	6955	5946	5329	69750
2009	5824	5782	5979	5252	5057	5854	5957	6297	6275	5146	5995	5312	68730
2010	5630	5182	5229	5143	5487	5868	6233	6556	7218	5978	5533	5262	69318
2011	5196	5019	5513	5434	5440	6055	6240	5509	7069	5664	5399	5963	68501
2012	5265	5471	5847	5890	5649	5369	5929	6648	7094	6496	5260	5844	70762
2013	5351	5941	5651	5910	5506	5706	5980	6761	6773	6035	5140	5481	70234
2014	5327	4950	5127	5353	5080	5753	5999	6772	6847	6183	5964	5562	68916
Média Mensal	5175	5173	5312	5261	5381	5702	5952	6432	6724	5987	5569	5396	68064

A Figura 3 apresenta os valores médios mensais de radiação solar incidente ($\text{Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e precipitação (mm) estimados ao longo do ano. Os maiores valores de precipitação ocorrem entre janeiro e abril (período chuvoso), nestes meses foram observados os menores valores de radiação solar. Após este período, é observado um aumento nos valores de radiação. Em agosto e setembro, verificam-se os máximos valores de radiação solar, con-

sequentemente, nestes meses ocorrem os valores mínimos de precipitação (período seco).

Na Zona 2 foram observados as maiores quantidades de radiação solar e os menores valores de precipitação durante todo o ano, em comparação com a Zona 1, pois no bioma amazônico ocorre menor pressão atmosférica (Molion, 1987), portanto essa região tende a possuir maior incidência de precipitação.

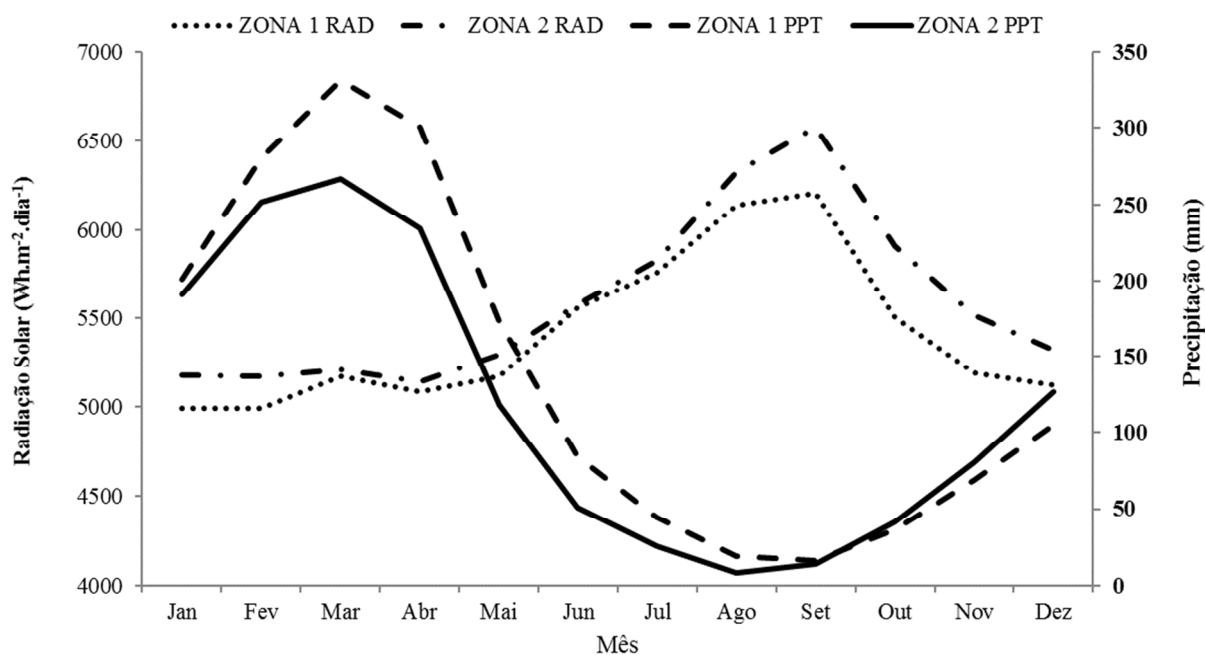


Figura 3. Variação das médias mensais de radiação incidente e precipitação.

Para os meses de fevereiro e março, houve um aumento gradual da radiação incidente na superfície de um mês em relação ao outro, com uma diminuição significativa em abril. Essas diferenças estão relacionadas a mudanças na declinação do Sol durante todo o ano, o que está associado a um conjunto de fatores astronômicos como o movimento de translação e a inclinação do eixo da Terra (Varejão-Silva, 2006).

O grande aumento dos valores de radiação entre os meses de maio e setembro, observadas em ambas as regiões, deve-se à transição entre a estação chuvosa e a estação seca, e que indica possibilidade de céu com poucas nuvens e temperaturas elevadas. A partir do mês de outubro esses valores decrescem até atingir seus valores mínimos em janeiro e fevereiro.

Comparando os dados de radiação solar e precipitação foi possível perceber que os valores máximos de radiação solar incidente foram observados na estação seca e os valores mínimos no período chuvoso nas regiões da Amazônia e Cerrado, onde possivelmente a nebulosidade pode explicar essa variação (Liepert, 2002; Stanhill e Cohen, 2005; Wild et al., 2005; Filho et al, 2006; Dal Pai e Escobedo, 2014). Neste caso, a cobertura de nuvens é considerada um fator significativo para diminuir a incidência da radiação (Rocha et al., 2004). Porém o mesmo fato não é observado quando analisado os valores totais anuais de ambas as variáveis, onde os maiores e menores valores são observados em anos diferentes.

Análises de tendências nos dados de radiação solar e precipitação

Usando o método de Mann Kendall, os dados de radiação solar e precipitação foram analisados anualmente e sazonalmente, na Zona 1 e 2. Para a precipitação, as tendências mostraram-se negativas, porém com tendência linear pequena e não significativa ($p > 0,1$). Hastenrath & Greischer (1993) e Silva et al. (1998) também não identificaram tendências significativas na precipitação na região nordeste do Brasil para estações úmidas e secas. No entanto, a precipitação nesta região é bastante sensível à valores extremos de temperatura da superfície do mar no Pacífico Equatorial associado com ENOS, como as anomalias na temperatura da superfície do oceano Atlântico relacionada com as anomalias na temperatura dipolo da superfície do oceano Atlântico (Costa et al., 2016).

No que diz respeito a radiação solar anual e sazonal em relação aos meses (Tabela 5), as tendências mostraram-se positivas (com uma direção comum) e significativas ($p < 0,1$). Para a análise de radiação solar anual na Zona 1, o teste mostrou um desvio padrão de 29,9%, o valor mínimo foi de 135,0 W.m⁻² e o máximo de 295,7 W.m⁻². Para a Zona 2, ocorreu um desvio padrão de 30,6%, 146,0 W.m⁻² o valor mínimo e 305,0 W.m⁻², o valor máximo.

As análises de tendência mostraram que a radiação solar vem aumentando ao longo dos últimos 14 anos, em relação a análise de precipita-

ção foi identificado tendências pequenas de de- crescimento, porém não significativas.

Tabela 5. Tendências lineares e significância para cada Zona e período da radiação solar incidente na superfície utilizando o teste de Mann Kendall.

Zona	Duração		Anual		Período Chuvoso		Período Seco	
	Início	Fim	Tendência Linear	Kendall's tau	Tendência Linear	Kendall's tau	Tendência Linear	Kendall's tau
1	2001	2014	0,0057	0,2173	0,0058	0,3154	0,0046	0,1836
2	2001	2014	0,0051	0,1651	0,0046	0,2847	0,0046	0,2227

Simulação da produção de energia fotovoltaica no Maranhão

A partir do arranjo de módulos fotovoltaicos utilizados para estimar a energia gerada em cada Zona (900 Wp), no que diz respeito às análises anuais (Fig. 2), mostram que para todos os anos, a produção total de energia foi maior no bioma cerrado (Zona 2) do que no bioma Amazônia (Zona 1). Em 2001, foi observado a maior potencial de produção de energia elétrica, cerca de

1,9 MWh.ano⁻¹ na Zona 2 e 1,86 MWh.ano⁻¹ na Zona 1, os menores valores foram registrados em 2003, na Zona 1 foi observada cerca de 1,53 MWh.ano⁻¹ e 1,64 MWh.ano⁻¹ para a Zona 2. Em 2014 pode ser observado excelentes valores da produção de eletricidade, acima de 1,7 MWh.ano⁻¹ para a Zona 1 e Zona 2. A diferença de produção de eletricidade da Zona 2 em relação a Zona 1 foi de 4%.

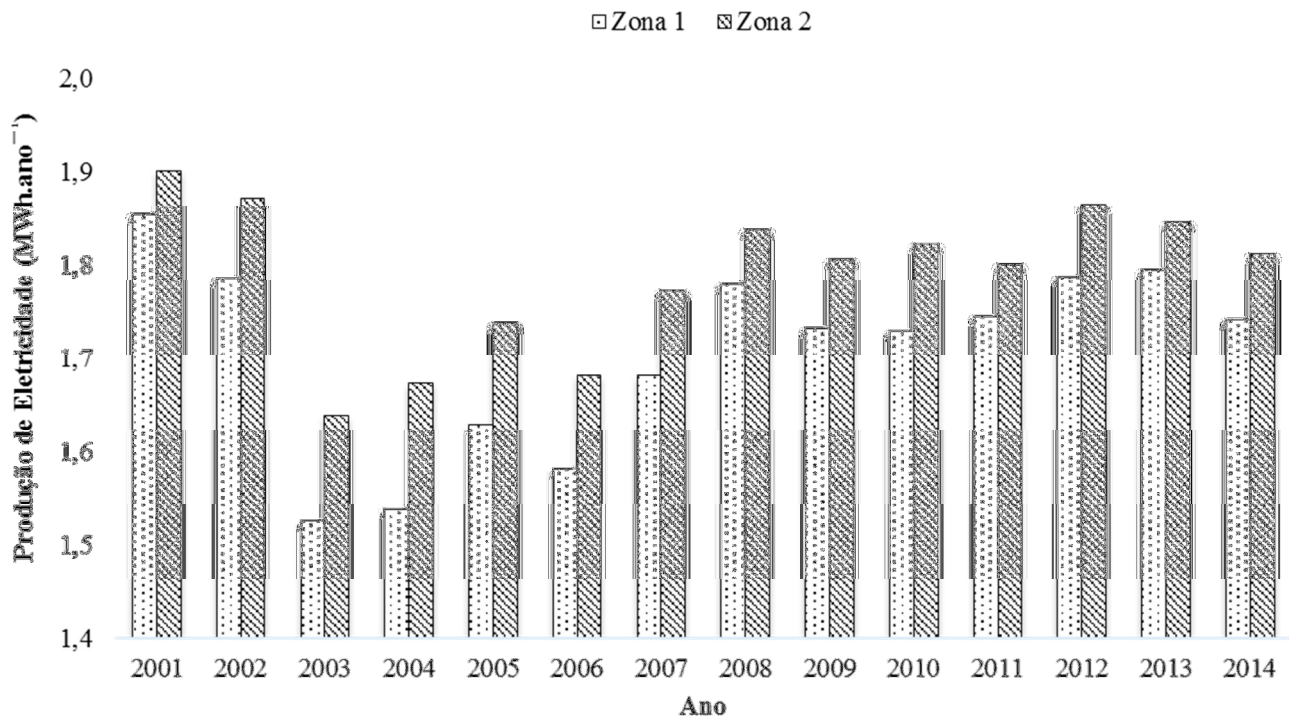


Figura 4. Simulação da produção de eletricidade de 2001 a 2014 nas Zonas 1 e 2.

Em relação a produção média mensal de eletricidade em 2014, os resultados mostraram que a eletricidade produzida em cada Zona poderia atender ao consumo médio mensal típico de uma residência no estado do

Maranhão durante todo o ano. Com isso a diferença entre a demanda de eletricidade e de energia gerada é um total de 368 kWh na Zona 2 e 297 kWh correspondente a Zona 1 (Fig. 5)

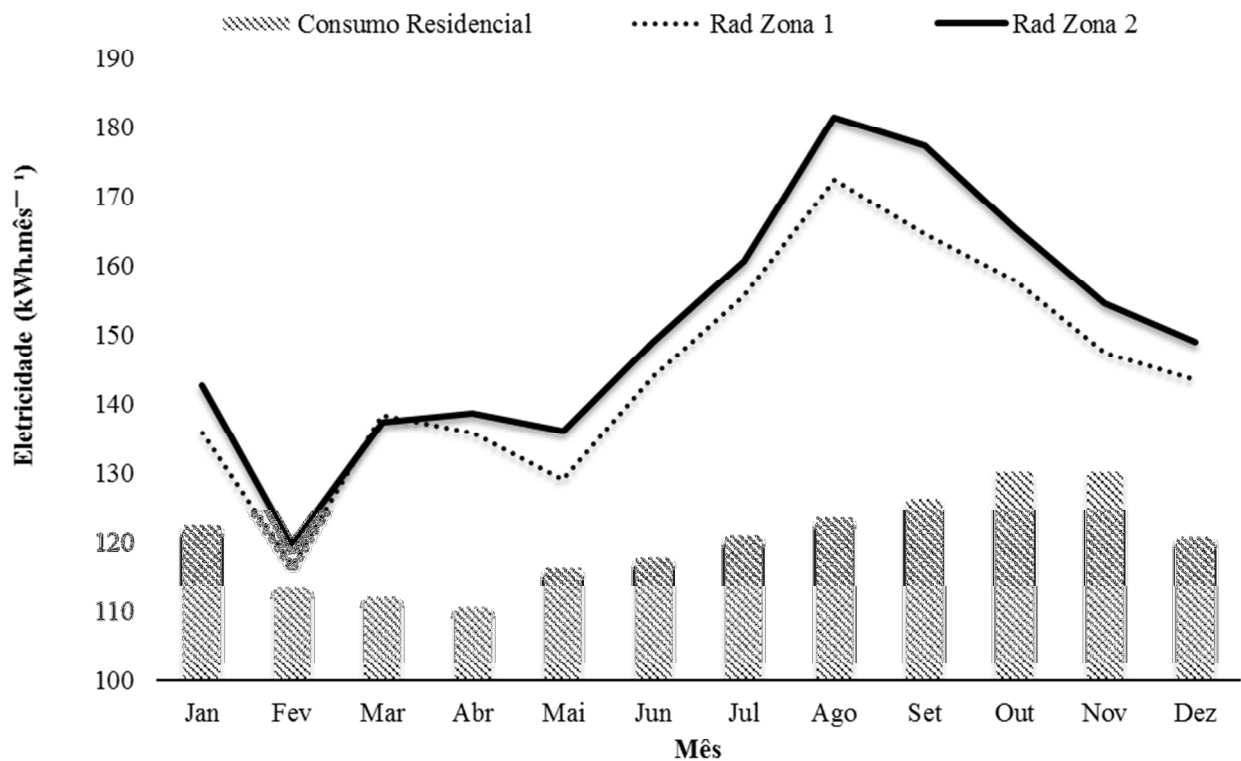


Figura 5. Comparação entre a energia gerada e o consumo médio residencial no estado do Maranhão no ano de 2014.

Correlação Radiação solar incidente x Precipitação

Considerando a correlação entre a precipitação e a radiação solar incidente, os valores de radiação diminuem com o aumento dos valores de precipitação. De acordo com análise anual, a precipitação representou 21,3% de variação nos dados de radiação na Zona 1 (bioma Amazônia) ($r^2 = 0,2128$), 14,4% no período seco ($r^2 = 0,1438$) e em relação à estação chuvosa apenas 2,53% ($r^2 = 0,0253$) de correlação com a radiação solar (Fig. 6). Em rela-

ção a série anual a cada aumento de 10 mm nos dados de precipitação/mês correspondeu a uma diminuição de $18,9 \text{ W.m}^{-2}$, produzindo $11,8 \text{ kWh.m}^{-1}$ a menos na geração de energia na Amazônia. Na estação seca, se a precipitação excede 10 mm por mês, a quantidade de radiação reduzirá $3,80 \text{ W.m}^{-2}$, resultando em $2,4 \text{ kWh.m}^{-1}$ a menos de energia produzida e $0,40 \text{ W.m}^{-2}$ na estação chuvosa, estimando-se $0,25 \text{ kWh.m}^{-1}$ a menos de energia gerada.

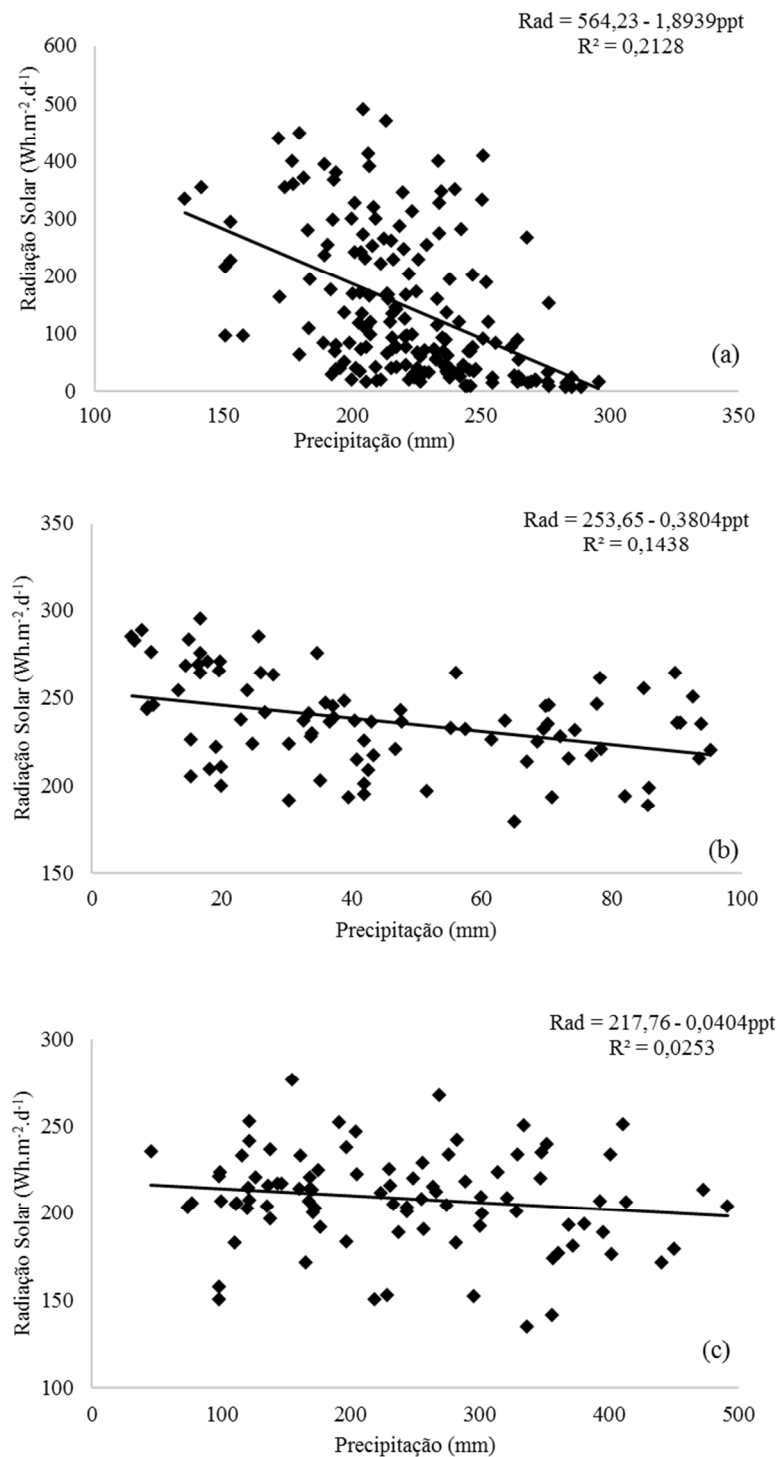


Figura 6. Correlação da radiação solar com a precipitação na Zona 1 (a) Anual, (b) Período Seco e (c) Período chuvoso.

No bioma Cerrado, no período anual analisado, a precipitação correspondeu por 31,2% ($r^2 = 0,3122$) da variação dos valores da radiação incidente, 34,2% ($r^2 = 0,3418$) no período seco e 10,2% em relação ao período chuvoso. Analisando estas correlações, na região do cerrado, a cada 10 mm de aumento na precipitação/mês foi esti-

mado uma queda de $19,9 \text{ W.m}^{-2}$, produzindo $12,4 \text{ kWh.h}^{-1}$ a menos na geração de energia, na estação seca foi identificado um decréscimo de $6,29 \text{ W.m}^{-2}$, gerando $3,91 \text{ kWh.h}^{-1}$ a menos de energia produzida e na estação chuvosa foi medido uma diminuição de $0,92 \text{ W.m}^{-2}$, produzindo $0,57 \text{ kWh.h}^{-1}$ a menos na energia produzida (Fig. 7).

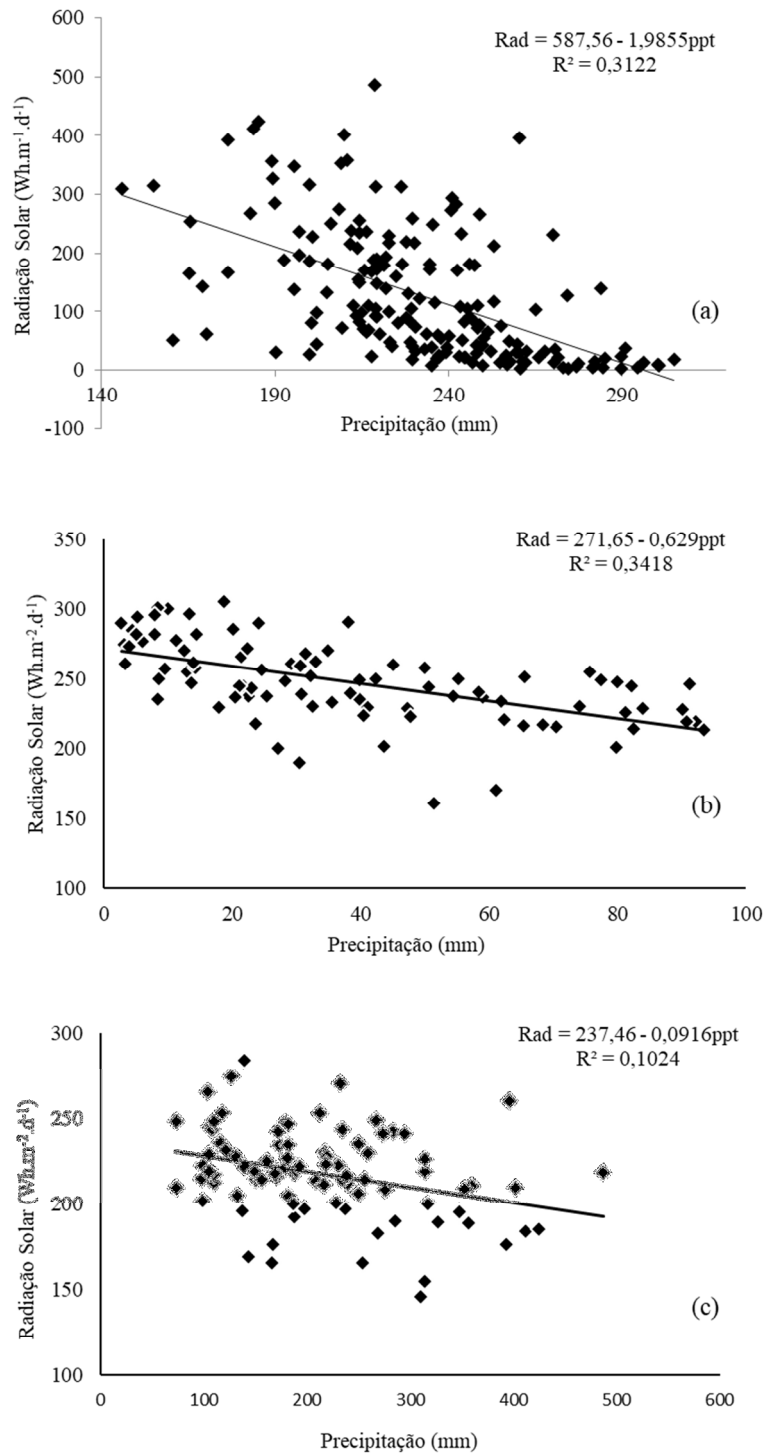


Figura 7. Correlação da radiação solar com a precipitação na Zona 2 (a) Anual, (b) Período Seco e (c) Período chuvoso.

Levando em consideração a demanda residencial de eletricidade, os resultados se mostraram insignificativos, porém deve-se levar em consideração a correlação se analisarmos projetos de grande escala de produção de energia fotovoltaica.

A relação entre a radiação e a precipitação foi mais forte na Zona 2, devido a região do cerrado possuir índices de precipitação menores do que a Amazônia, no entanto, outros fatores (cobertura de nuvens, vapor de água, aerossóis, etc.) podem também explicar esta diferença.

Conclusões

De acordo com os resultados, houve uma tendência linear de aumento nos dados de radiação solar. Sobre a variação dos valores de radiação solar ao longo do ano, sugerimos que as principais causas são o aumento da nebulosidade e vapor de água na estação chuvosa. Os valores mais elevados de radiação observados na Zona 2 podem gerar subsídios na formulação de planejamentos para a instalação de usinas solares na região. No entanto, esta Zona possui uma maior porcentagem de variação em relação a precipitação. Além disso, mais pesquisas são necessárias, assim como melhores medidas experimentais para avaliação da radiação solar incidente na superfície e precipitação (como pluviômetro padrão), pois essas variáveis reagem de maneira diferentes às condições astronômicas e climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Ceuma (UNICEUMA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA).

Referências

- Alsema, E.A., 2000. Energy payback time and CO₂ emissions of PV systems. *Progress in photovoltaics: research and applications* 8, 17-25.
- Alves, R.D.S., Souza, A.S.D., 2014. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Igarss 530.
- Costa, M.S., Lima, C.L., Gonçalves, K.A., 2016. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil (Trends observed in precipitation extremes over the semiarid region of Northeast Brazil). *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1321-1334.
- Dal Pai, E., Escobedo, J.F., 2014. Estimativa da radiação atmosférica em função dos índices radiométricos kt e kd para botucatu-SP. *Energia na Agricultura* 30, 172-179.
- De Vries, B.J.M., Van Vuuren, D.P., Hoogwijk, M.M., 2007. Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach. *Energy policy* 35, 2590-2610.
- Dubayah, R., Loechel, S., 1997. Modeling Topographic Solar Radiation Using GOES Data. *J. Appl. Meteorol.* 36, 141-154.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2015. Balanço Energético Nacional, ano base 2014. Ministério de Minas de Energia. Brasília.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Balanço Energético Nacional 2016 - Ano base 2015, Ministério de Minas e Energia. Brasília.
- Filho, J.D.C.S., Ribeiro, A., Costa, M.H., Cohen, J.C.P., Rocha, E.J.P., 2006. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 318-330.
- Foukal, P., Lean, J., 1990. An Empirical Model of Total Solar Irradiance Variation Between 1874 and 1988. *Science* 247, 556-558.
- Francis, D., Hengeveld, H., 1998. Extreme Weather and Climate Change, Atmospheric Environment. Minister of Environment, Ontario, Canada.
- Gong, X., Kulkarni, M., 2005. Design optimization of a large-scale rooftop photovoltaic system. *Sol. Energy* 78, 362-374.
- Harrison, E.F., Minnis, P., Barkstrom, B.R., Ramanathan, V., Cess, R.D., Gibson, G.G., 1990. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the Earth Radiation Budget Experiment. *J. Geophys. Res. Atmos.* 95, 18687-18703.
- Hastenrath, S., Greischar, L., 1993. Further work on the prediction of northeast Brazil rainfall anomalies. *American Meteorological Society* 6, 743-758.
- IPCC, Pachauri, R.K., Meyer, R. L., 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Kendall, M.G., 1955, Rank Correlation Methods, 2 ed. Charles Griffin, London.
- Krauter, S., Rüther, R., 2004. Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy. *Renewable Energy*, 29, 345-355.
- Liepert, B.G., 2002. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Energy* 29, 1-4.
- Mather, P.M., Koch, M., 2010. Preprocessing of Remotely-Sensed Data. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*, 4ed. Wiley-Blackwell, New Jersey.
- MME. Ministério de Minas e Energia, 2015. Plano Decenal de Energia Elétrica 2024. Brasília.
- Molion, L.C.B., 1987. Climatologia dinâmica da região amazônica: mecanismos de precipitação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2, 107-117.
- Moradi, I., 2009. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. *Energy* 34, 1-6.
- Muniz, F.H., 2006. A vegetação da região de transição entre a Amazônia e o Nordeste: diversidade e estrutura. In: Emanuel Gomes de Moutinho, 1972

- ra. (Org.). Agroambientes de transição entre o Trópico Úmido e o Semi-árido do Brasil: atributos, alterações e uso na produção familiar. 2 ed. São Luís: Programa de Pós-graduação em Agroecologia/UEMA, v. 1, p. 53-69.
- Rocha, H.R., Golden, M.L., Miller, S.D., Menton, M.C., Pinto, L.D.V.O., Freitas, H.C., Figueira, A.M.S., 2004. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazônia. *Ecological Applications* 14, S22-S32.
- Salby, L.M., 1996. *Fundamentals of Atmospheric Physics*. International Geophysics Series, 61. Academic Press, San Diego.
- Serafini, L.Z., 2007. *Proteção jurídica das áreas úmidas e os direitos Socioambientais*. Dissertação (Mestrado). Curitiba, PUC-PR.
- Silva, V.P.R., Correia, A.A., Coelho, M.S., 1998. Análise de tendência das series de precipitação pluvial do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 2, 111-114.
- Stanhill, G., Cohen, S., 2001. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.* 107, 255-278.
- TrieB, Franz. Global potential of concentrating solar power. In: *Conference Proceedings*. 2009.
- Varejão-Silva, M.A., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Versão digital 2. Recife, PB, março, 463p.
- Weinrub, A., 2011. *Community Power Decentralized Renewable Energy in California*. Local Clean Energy Alliance, Oakland.
- Wang, Shifeng, Koch, Barbara., 2010. Determining profits for solar energy with remote sensing data. *Energy* 35, 2934-2938.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A., 2005. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface, *Science* 308, 847-850.