

ANO METEOROLÓGICO TÍPICO SOLAR: SENSIBILIDADE À BASE DE DADOS PARA CINCO REGIÕES DIFERENTES DO BRASIL

Anna Tippett⁽¹⁾
André Rodrigues Gonçalves⁽²⁾
Enio Bueno Pereira⁽²⁾⁽⁴⁾ - enio.pereira@alumni.usp.br
Fernando Ramos Martins⁽³⁾
Gilberto Fisch⁽⁴⁾
Rodrigo Santos Costa⁽²⁾

(1) University of Oxford - Oxford, UK.

(2) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, SP

(3) Universidade Federal de São Paulo – Campus Baixada Santista – Santos, SP

(4) Universidade de Taubaté, Taubaté, SP

1.1. Recurso solar e meteorologia da radiação solar

Resumo. Neste artigo, examinamos a sensibilidade da metodologia de cálculo de um "Ano Meteorológico Típico" (TMY) às alterações na fonte da série de dados meteorológicos e nos fatores de ponderação utilizados. Este estudo utilizou três fontes diferentes de dados meteorológicos - observações terrestres, dados modelados derivados de satélite e dados de reanálise ERA5. O TMY foi criado para cinco regiões climáticas diferentes no Brasil usando 13 anos de dados horários para 10 variáveis meteorológicas que consistem em temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa, velocidade máxima e média do vento, radiação horizontal total global e radiação solar direta normal. O estudo mostra que a fonte dos dados meteorológicos desempenha um papel pouco importante na determinação dos meses "mais típicos". A tipicidade dos meses foi consistente mesmo quando foram utilizadas fontes de dados tão diversas como dados *in situ* e modelados. O estudo também mostra que a escolha do esquema de ponderação para a fonte de dados meteorológicos é relativamente arbitrária, se não irrelevante. Isto deve-se ao facto de os parâmetros meteorológicos não serem variáveis independentes e, por conseguinte, representarem frequentemente informações redundantes. Um pequeno número de parâmetros independentes é suficiente para produzir um bom TMY, e a adição de vários parâmetros interdependentes não melhora a qualidade do TMY produzido.

Palavras-chave: Ano Meteorológico Típico, Energia Solar, TMY

1. INTRODUÇÃO

O impacto da variabilidade natural das condições meteorológicas na produção de energia fotovoltaica ao longo dos anos é frequentemente analisado utilizando a metodologia do Ano Meteorológico Típico (TMY) (Hall, *et al.*, 1978). Um conjunto de dados TMY é amplamente utilizado na modelagem de sistemas de energias renováveis para representar um longo período de tempo de dados como um ano típico. Um TMY consiste em 12 "Meses Meteorológicos Típicos" (MMT's), cada um dos quais é considerado o mais típico em comparação com a média de longo prazo para esse mês de calendário (Skeiker, K., 2004; Skeiker, K., 2009; Chan, *et al.*, 2006; Huld, *et al.*, 2018). A geração de um TMY é preferível à simples utilização da média dos dados horários de uma série cronológica longa, porque um TMY é constituído por 12 meses de dados reais. A série temporal média de longo prazo consistiria em dados sintéticos que não ocorreram efetivamente, o que significa que se perde grande parte da variabilidade natural das variáveis observadas no local de estudo devido à suavização ocasionada pelo operador média. Uma vez que os TMY's representam condições típicas, não são adequados para a avaliação do sistema de energia operando nas condições extremas (com baixa probabilidade de ocorrência) que podem ocorrer num local.

Embora os dados de TMY estejam disponíveis para o Brasil a partir de diversas fontes (por exemplo, Luiz *et al.*, 2012; Almeida & Vasconsellos, 2019; Machado *et al.*, 2019; Bonini, *et al.*, 2022), não há estudos detalhados sobre a sensibilidade dos resultados em relação à base de dados e aos fatores de ponderação. Assim, o objetivo deste estudo não foi apenas produzir um TMY para localidades climatologicamente distintas selecionadas do Brasil, mas verificar a consistência dos TMY's gerados a partir de diferentes fontes de dados meteorológicos, o que confere a este trabalho a sua originalidade. Neste artigo, testamos três bases de dados diferentes: dados observacionais, dados de modelos de satélite e dados de reanálise ERA5/ECMWF para o período 2005 a 2017. Considerando que a noção de "tipicidade" possui alguma subjetividade em sua definição, neste artigo também investigamos a sensibilidade do TMY às alterações nos fatores de ponderação dos parâmetros meteorológicos.

Neste estudo, o conjunto de dados TMY foi gerado para cinco locais usando o método Sandia proposto por Hall *et al.* (1978). Este método aplica a estatística de Finkelstein-Schafer (1971) (denominada FS) em séries temporais longas de dados meteorológicos para determinar os meses que são mais "típicos" em comparação com a distribuição de frequência observada em longo prazo e, em seguida, concatena esses meses num TMY. Os meses típicos são selecionados com base em 10 variáveis meteorológicas diárias que consistem na temperatura máxima (T_{\max}), mínima (T_{\min}) e média ($T_{\text{média}}$) do ar, na umidade relativa média ($RH_{\text{média}}$), mínima (RH_{\min}) e máxima (RH_{\max}), na velocidade máxima (WS_{\max}) e média ($WS_{\text{média}}$) do vento, na irradiação solar horizontal global (GHI) e na irradiação direta normal (DNI).

2. METODOLOGIA

A base do procedimento de geração do TMY deste estudo é a aplicação da estatística de Finkelstein-Schafer (FS) aos dados meteorológicos horários de um período de 13 anos, permitindo a seleção de meses meteorológicos típicos (MMT's) representativos. A escolha deste método estatístico baseou-se nos resultados apresentados pelos autores, que, segundo eles, se revelou mais poderoso do que o teste de Kolmogorov-Smirnov para este tipo de aplicação.

A função de distribuição cumulativa (FDC) determinada para cada um dos índices meteorológicos diários para cada mês/ano individual é comparada com a FDC do mesmo mês obtida para todo o período de dados. O mês/ano com a FDC mais próxima da FDC de longo prazo é selecionado como o MMT. Por exemplo, para janeiro, calculamos uma FDC de longo prazo que consiste nos dados de todos os 13 meses de janeiro, bem como 13 FDC's individuais para os dados de janeiro de cada ano. Isto é feito para cada mês do calendário, e os 12 MMT's resultantes são concatenados para produzir o TMY.

A comparação entre as FDC mês/ano e FDC de longo-termo para cada variável meteorológica foi realizada utilizando as estatísticas de Finkelstein-Schafer (FS). A estatística FS para cada índice é calculada utilizando a seguinte Eq. (1):

$$FS(x_i, y, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |FDC_m(x_i) - FDC_{y,m}(x_i)| \quad (1)$$

em que FDC_m corresponde a função de longo prazo para o mês m e $FDC_{y,m}$ é a de curto prazo para o mês m no ano y , N é o número de posições e x é a variável meteorológica em análise diário.

Para obter um valor singular para cada mês do calendário, temos de combinar as estatísticas FS de cada variável. Isso pode ser feito simplesmente calculando a soma das estatísticas FS, no entanto, isso assumiria que cada índice diário é tão importante quanto os demais ao determinar a proximidade de um mês à sua média de longo prazo. Uma soma ponderada das estatísticas FS para os M índices diários é calculada usando a seguinte Eq. (2):

$$WS(y, m) = \frac{1}{M} \sum_{x=1}^M w_{x_i} FS(x_i, y, m) \quad (2)$$

onde o fator de ponderação, w_{x_i} , para cada índice diário.

Tabela 1 - Conjunto de fatores de ponderação utilizado para calcular o TMY Solar pelo método de Sandia.

Esquema	T_{\max}	T_{\min}	$T_{\text{média}}$	RH_{\max}	RH_{\min}	$RH_{\text{média}}$	WS_{\max}	$WS_{\text{média}}$	GHI	DNI
TMY	1/24	1/24	2/24	1/24	1/24	2/24	2/24	2/24	12/24	-
TMY3	1/20	1/20	2/20	1/20	1/20	2/20	1/20	1/20	5/20	5/20

A Tab. 1 apresenta duas abordagens para determinação do parâmetro $WS(y,m)$. A primeira linha corresponde ao esquema de ponderação original (denominado TMY) sugerido por Hall *et al.* (1978). A linha inferior apresenta os valores de peso utilizados em modificação foi sugerida mais tarde por Wilcox-Marion (2008) para incluir a Irradiância Normal Direta (DNI) e o uso de bases de dados modelados no conjunto de variáveis meteorológicas utilizadas. Referimo-nos a esta abordagem como método de Hall atualizado "TMY3". Além disso, o TMY3 utilizou dados de radiação solar modelados.

Neste estudo investigamos a utilização de esquemas de ponderação diferentes e a sensibilidade do TMY gerado com estes fatores de ponderação. Existem vários métodos na literatura para selecionar o MMT final após o cálculo das somas ponderadas (WS) (por exemplo, Marion-Urban,1995; Huang *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2014; Su *et al.*, 2009). Estas envolvem a imposição de critérios de persistência ou o cálculo da raiz da diferença média quadrática (RMSD), mas, por uma questão de simplicidade, neste trabalho selecionamos simplesmente o mês com o menor valor de WS como o nosso MMT. Os dados horários para cada um dos 12 MMT's são concatenados produzindo assim o Ano Meteorológico Típico.

2.3 Dados observacionais in-situ

O estudo utilizou dados observados in-situ de estações meteorológicas automáticas do Serviço Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET) representando as cinco macrorregiões geográficas do país. A rede solarimétrica SONDA

(<http://sonda.ccst.inpe.br/>), é mantida e operada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e está ligada à Rede de Radiação Superficial de Base (BSRN-GEWEX). As estações foram selecionadas com base na representatividade do clima, qualidade e continuidade dos dados e são apresentadas na Tab. 2. Os TMY's calculados a partir de dados de observação *in-situ* são aqui referidos como TMY_{obs}.

Tabela 2 - Lista de estações meteorológicas de superfície utilizadas.

Estação	Nome	Região
A001	Brasília	Centro-Oeste
A009	Palmas	Norte
A316	Caicó	Nordeste
A707	Presidente Prudente	Sudeste
A803	Santa Maria	Sul

Nas séries horárias muito longas de dados meteorológicos *in-situ*, sempre existem algumas lacunas de dados ausentes por mais variadas razões. Para lacunas curtas (menos de 6 horas), os valores em falta são preenchidos por simples interpolação linear. No caso de lacunas mais longas, os meses com mais de 5 dias de dados em falta (100 horas) foram excluídos do cálculo do TMY. Isto foi feito para evitar que um potencial candidato à MMT contenha demasiados dados sintéticos, anulando o objetivo de utilizar uma TMY em vez da simples média de longo prazo. Além disso, foi efetuado um procedimento de controle de qualidade dos dados para eliminar dados espúrios, tais como valores fisicamente impossíveis ou inconsistentes de radiação solar ou velocidades do vento nos locais de estudo.

Neste estudo, fixamos em 10 anos de dados observados a partir dos quais os MMT's podem ser selecionados. Isto permitiu descartar, no máximo, 3 meses por cada mês de calendário. Em alguns casos, relaxamos essa condição para 9 anos, pois é difícil obter 10 anos de dados confiáveis em algumas regiões do Brasil. Para os locais que não atenderam a essa condição, uma estação alternativa na mesma região do Brasil foi usada para gerar o TMY.

2.4 Dados modelados

Como base de dados modelados de irradiação solar incidente empregou-se um o modelo numérico de base física Brasil-SR (Pereira et al, 2017) que estima as componentes da radiação solar incidente na superfície (GHI e DNI) combinando o método de dois fluxos na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados a partir de imagens de satélite GOES/NOAA (Pereira *et al.*, 2017; Casa-Grande *et al.*, 2021). O TMY_{mod}, usou apenas os dados GHI modelados e, portanto, usou o esquema de ponderação TMY. Já o TMY3_{mod}, utilizou tanto os dados modelados do GHI como do DNI com o esquema de ponderação TMY3.

Dados da reanálise horária ERA5-Land do ECMWF (Muñoz Sabater, 2019) constituíram a outra fonte de dados empregados nesse estudo para construção do TMY. Os dados de reanálise combinam dados modelados com observações para criar um conjunto de dados completo e consistente. Considerando a dificuldade na modelagem da nebulosidade na resolução espacial da base de dados de reanálise ERA5, os dados de reanálise, neste estudo utilizamos os dados de GHI e DNI produzidos pelo modelo BRASIL-SR foram combinados com os dados da ERA5 para os demais índices meteorológicos diários (temperatura, velocidade do vento e umidade relativa). Incluímos tanto o GHI como o DNI e, por conseguinte, utilizamos o esquema de ponderação TMY3 que foi denominado nesse estudo como TMY3_{rea}. A Tab. 3 apresenta o esquema dos experimentos realizados.

Tabela 3 - Esquema dos experimentos realizados

Método	Dados In-Situ	Dados Satelitais	Dados de Reanálises
TMY	TMY _{obs}	TMY _{mod}	-
TMY3	-	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}

3. RESULTADOS

3.3 Região Centro-Oeste: Brasília/DF (A001)

Para a estação de Brasília, havia, pelo menos, 10 anos em que o MMT poderia ser selecionado para cada mês do calendário, portanto não foi necessária a busca de nenhuma estação alternativa à da rede SONDA. O TMY foi gerado para cada uma dos quatro experimentos é apresentado na Tab. 4.

Tabela 4 - TMY's gerados para diferentes fontes de dados com os valores estatísticos finais do FS para A001

Mês	Ano do MMT			
	TMY _{obs}	TMY _{mod}	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}
Janeiro	2009	2009	2009	2009
Fevereiro	2011	2012	2011	2012
Março	2013	2013	2013	2009
Abril	2008	2007	2007	2017
Maió	2017	2014	2014	2006
Junho	2011	2015	2015	2017
Julho	2013	2012	2012	2007
Agosto	2015	2013	2013	2013
Setembro	2014	2014	2012	2012
Outubro	2016	2016	2016	2016
Novembro	2014	2017	2017	2016
Dezembro	2017	2010	2010	2006
FS	0,0065	0,0073	0,0094	0,0066

A partir dos TMY's gerados, podemos ver que existe concordância de pelo menos 4 MMTs tanto para TMY quanto para o TMY3. Para os meses janeiro e outubro, houve concordância completa do MMT entre as quatro abordagens do metodologia Sandia adotadas. A maior semelhança verifica-se entre os resultados do TMY_{mod} e do TMY3_{mod}, com apenas 2 meses de calendário em desacordo, o que não é surpreendente, uma vez que estes TMY's apenas diferem devido à inclusão do DNI no TMY3.

Na Fig. 1, a FDC para cada TMY é comparada com as FDC's de longo prazo (LP) observadas e modeladas para o GHI para cinco localidades. Evidentemente, essas FDC's são próximas umas das outras. Quanto mais baixo for o valor calculado para o parâmetro Finkelstein-Schafer, mais próximos serão os valores das duas curvas. Nota-se que as estações A707 e A009 apresentam um descolamento entre a FDC modelada e FDC observada o que sugere viés elevado do modelo para estes pontos ou problema de qualidade dos dados medidos (sujeira nos domos dos piranômetros).

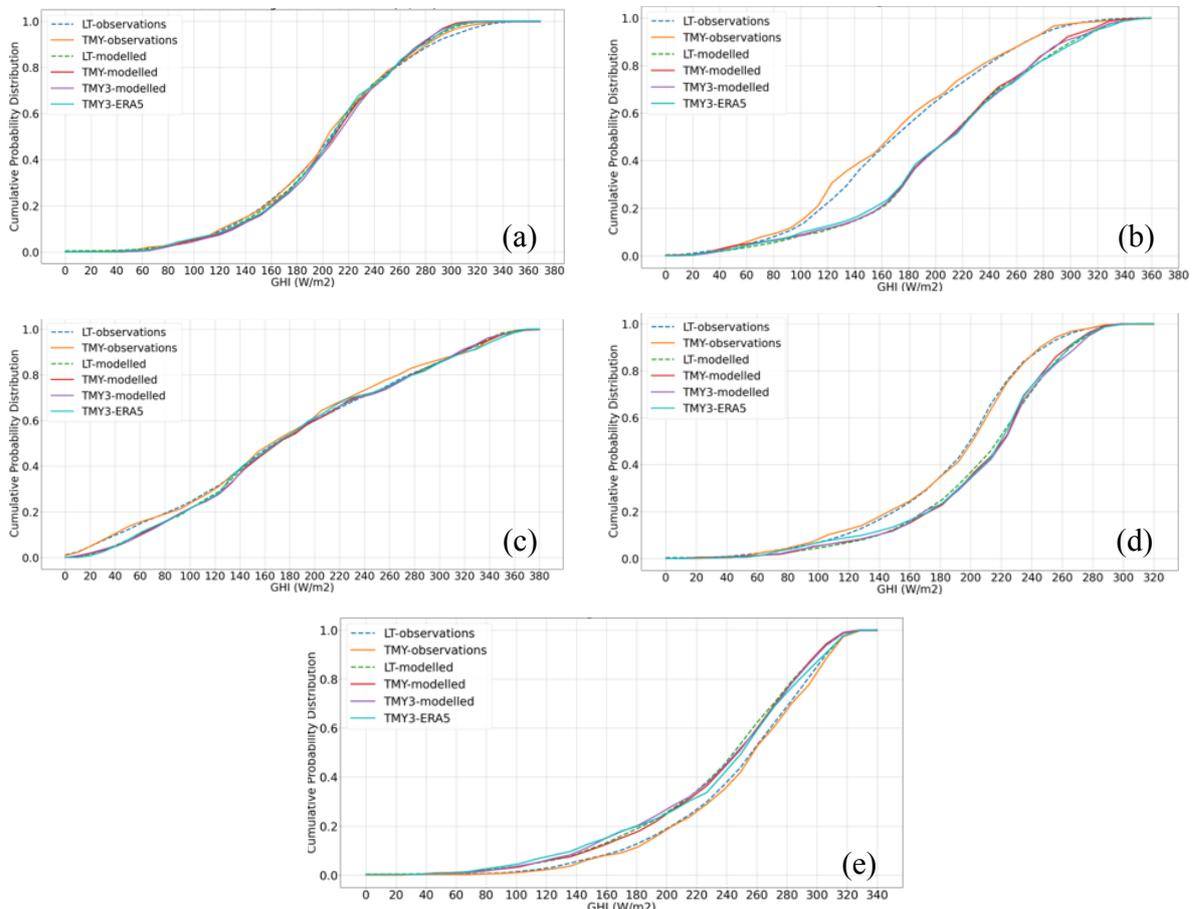


Figura 1 - FDC média de longo prazo para os valores de GHI observados e modelados para as estações: (a) A001, (b) A707, (c) A803, (d) A009, (e) A316

3.4 Região Sudeste: Presidente Prudente/SP (A707)

Para a estação Presidente havia, pelo menos, 10 anos de dados a partir dos quais o MMT podia ser selecionado para cada mês de calendário, portanto, não foi necessário o emprego de uma estação alternativa. Os TMYs obtidos podem ser encontrados na Tab. 5.

Tabela 5 - TMY's gerados para diferentes fontes de dados com os valores estatísticos finais do FS para A707

Mês	Ano do MMT			
	TMY _{obs}	TMY _{mod}	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}
Janeiro	2013	2009	2011	2016
Fevereiro	2010	2008	2008	2016
Março	2010	2017	2014	2009
Abril	2011	2010	2010	2017
Maiο	2010	2013	2012	2013
Junho	2017	2015	2015	2015
Julho	2011	2011	2011	2005
Agosto	2011	2013	2013	2013
Setembro	2013	2013	2013	2013
Outubro	2008	2011	2016	2011
Novembro	2012	2012	2012	2017
Dezembro	2006	2005	2012	2012
FS	0,0134	0,0074	0,0062	0,0090

A partir dos TMY's gerados, podemos ver que há concordância de pelo menos 3 MMTs para o método TMY e 4 MMTs para o método TMY3. Para 1 mês (setembro) a concordância foi completa do MMT. A concordância entre o TMY e TMY3 usando a mesma fonte de dados modelados foi de 8MMTs. A Tab. 9 mostra a estatística FS para cada TMY comparada com a sua respectiva FDC de longo prazo, sendo que neste caso os dados TMY3_{mod} apresentaram a melhor estatística FS enquanto os dados observacionais apresentaram o pior resultado. A FDC para cada TMY gerado é comparada com as FDC's observadas e modeladas a longo prazo (LT) para o GHI anual, como se mostra na Fig. 1(b). A partir deste gráfico, podemos ver que existe uma discrepância muito maior entre a radiação solar modelada e observada neste local, em comparação com a estação A001 em Brasília.

3.5 Região Sul: Santa Maria/RS (A803)

Para a estação de Santa Maria, havia pelo menos 10 anos dos quais a MMT poderia ser selecionada para cada mês do calendário, exceto para maio, junho e julho. Para esses meses, havia apenas 9 anos dos quais a MMT poderia ser selecionada, mas isso foi considerado aceitável no cálculo do TMY. O TMY gerado para cada uma das quatro fontes de dados diferentes e pode ser encontrado na Tab. 6.

Tabela 6 - TMY's gerados para diferentes fontes de dados com os valores estatísticos finais do FS para A803

Mês	Ano do MMT			
	TMY _{obs}	TMY _{mod}	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}
Janeiro	2007	2006	2006	2006
Fevereiro	2013	2013	2013	2016
Março	2014	2014	2014	2014
Abril	2011	2014	2014	2014
Maiο	2015	2011	2011	2013
Junho	2010	2010	2010	2017
Julho	2016	2013	2013	2010
Agosto	2008	2014	2014	2006
Setembro	2012	2012	2015	2013
Outubro	2016	2016	2016	2017
Novembro	2013	2011	2005	2013
Dezembro	2016	2016	2016	2006
FS	0,0106	0,0049	0,0057	0,0047

A Tab. 9 mostra as estatísticas de FS para cada TMY em comparação com a sua FDC de longo prazo. Nota-se que esta estação teve os valores mais baixos de FS dentre todas as estações analisadas, com um valor do quartil 75% abaixo de 0,0069. No entanto, o valor da FS para os dados observacionais foi mais elevado nesta estação. A partir dos TMY's gerados, podemos ver que há concordância de pelo 6 MMTs para o TMY e apenas 3 MMTs para o TMY3. A concordância

entre os métodos TMY e TMY3 novamente foi elevada com 10MMTs. Em 1 mês (março) há a concordância completa do MMT. Na Fig. 1(c), a FDC para cada TMY gerado é comparada com as FDC's de longo prazo (LT) observadas e modeladas para o GHI anual. A partir deste gráfico, podemos ver que existe uma boa concordância entre a radiação solar modelada e observada neste local.

3.6 Região Norte: Palmas/TO (A009)

Para a estação de Palmas, há pelo menos 10 anos dos quais o MMT pode ser selecionado para cada mês do calendário, exceto para novembro, onde existem 9 anos de dados disponíveis. Os TMYs obtidos podem ser encontrado na Tab. 7. A estatística de FS mostra o pior valor foi para os dados de reanálise.

Tabela 7 - TMY's gerados para diferentes fontes de dados com os valores estatísticos finais do FS para A009

Mês	Ano do MMT			
	TMY _{obs}	TMY _{mod}	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}
Janeiro	2010	2007	2007	2017
Fevereiro	2009	2012	2012	2012
Março	2011	2011	2011	2015
Abril	2011	2011	2007	2013
Mai	2012	2007	2007	2011
Junho	2017	2015	2015	2013
Julho	2011	2011	2011	2011
Agosto	2005	2011	2013	2016
Setembro	2008	2008	2008	2012
Outubro	2014	2016	2016	2014
Novembro	2013	2006	2006	2006
Dezembro	2014	2010	2014	2014
FS	0,0076	0,0094	0,0092	0,0107

A partir dos TMY's gerados, podemos ver que há concordância de 4 MMTs tanto para o TMY quanto para o TMY3. A concordância entre os métodos TMY e TMY3 chegou a 9 MMTs. Em 1 mês (julho) a concordância foi completa do MMT. Na Tab. 9, a estatística de FS para cada TMY comparada com a sua respectiva FDC LT mostra que o pior valor foi para os dados de reanálise. A FDC para cada TMY gerado é comparada com as FDCs de longo prazo (LT) observadas e modeladas para o GHI anual, como se mostra na Fig. 1(d). A partir deste gráfico, podemos ver que existe novamente uma grande discrepância entre a radiação solar modelada e observada neste local.

3.7 Nordeste: Caicó/RN (A316)

Para a estação de Caicó, há apenas 8 ou 9 anos dos quais a MMT pode ser selecionada para cada mês do calendário. Isto traduz a dificuldade em se obter medições estáveis de longo prazo para o vasto território do Brasil, sendo esta uma limitação dos resultados obtidos. O TMY para cada uma dos quatro experimentos pode ser encontrado na Tab. 8.

Tabela 8 - TMY's gerados para diferentes fontes de dados com os valores estatísticos finais do FS para A316

Mês	Ano do MMT			
	TMY _{obs}	TMY _{mod}	TMY3 _{mod}	TMY3 _{rea}
Janeiro	2009	2008	2009	2009
Fevereiro	2017	2008	2017	2012
Março	2007	2015	2015	2014
Abril	2007	2007	2007	2007
Mai	2007	2013	2013	2017
Junho	2010	2010	2010	2010
Julho	2010	2014	2010	2010
Agosto	2010	2010	2010	2014
Setembro	2013	2010	2010	2015
Outubro	2013	2014	2014	2014
Novembro	2008	2008	2012	2016
Dezembro	2011	2007	2007	2012
FS	0,0085	0,0060	0,0069	0,0107

A partir dos TMY's gerados, podemos ver que existe uma concordância de 4 MMTs para o TMY e 5 MMTs para o TMY3. A concordância entre os métodos TMY e TMY3 chega a 8 MMTs. Há 2 meses (abril e junho) com a concordância total do MMT. A estatística de FS mostra novamente o pior valor foi para os dados da reanálise. A FDC para cada TMY

gerado é comparada com as FDC's de longo prazo (LT) observadas e modeladas para o GHI anual, como mostra a Fig. 1(e). A partir deste gráfico, podemos ver que existe apenas uma ligeira discrepância entre a radiação solar modelada e observada neste local, mas não tão grande como noutros locais, o que explica em parte a boa concordância entre modelos e reanálises

A partir dos TMY's gerados para cada uma das 5 regiões do Brasil, podemos tirar quatro conclusões principais:

1. Há uma alta sensibilidade do TMY à fonte de dados utilizada uma vez que a mediana de concordância é de 4 MMTs (25%) conforme Tab. 9 para experimentos com dados distintos.
2. Há uma baixa sensibilidade entre os métodos TMY e TMY3 desde que mantidas as fontes de dados, como uma mediana de concordância de 9 MMTs (75%) conforme Tab. 9.
3. As estações A001 e A803 têm FDC's semelhantes entre dados observados/modelados e TMY/LT, pelo que não são sensíveis à seleção da fonte de dados. Embora os MMT's possam ser ligeiramente diferentes, a FDC global do TMY ainda é muito próxima da LT. Isto também se reflete nos valores mais baixos de FS entre as cinco estações estudadas.
4. No caso das estações A707, A009 e A316, existe uma discrepância entre as FDC's das observações e dos dados modelados, o que sugere que o TMY pode ser sensível à seleção da fonte de dados nestes locais. A Tab. 9 mostra o número de MMT's em concordância entre TMY_{obs} e qualquer um dos TMY's calculados a partir de dados modelados para cada estação e indica nenhuma correlação entre as estações que têm discrepância entre os dados observados e modelados e a concordância nas MMT's. Enquanto a estação A707 (que registrou uma grande discrepância entre os dados modelados e observados) tem apenas três meses de concordância, a estação A009, que também registrou uma grande discrepância, tem 6 meses de concordância. Isto sugere que, embora a discrepância dos dados seja importante no conjunto de dados TMY gerado, a escolha dos meses mais típicos não é muito afetada. Estas estações apresentaram os valores mais elevados de FS entre as estações estudadas.
5. As estações A803 e A707 apresentaram os piores resultados em comparação com as observações (Fig. 1(b) e (c), respetivamente). Isto também se reflete na maior discrepância do FS. A razão para tal deve-se à influência dos eventos ENSO do conjunto de dados. Sabe-se que o ENSO está muito bem (e positivamente) correlacionado com a parte sul do Brasil (que é representada pela estação A803), enquanto isso não é tão claro para o sudeste do Brasil (representado pela estação A707). Assim, a presença deste evento (ENSO) pode modificar a forma da curva e a diferença entre os dados de entrada.

Tabela 9 - Número de MMT's em concordância entre TMY_{obs} e TMY_{mod}/TMY_{3mod}/TMY_{3rea} para cada estação.

Local	TMY _{obs} e TMY _{mod}	TMY _{3mod} e TMY _{3rea}	TMY _{mod} e TMY _{3mod}	Entre todos	FS (75% quartil)
Brasília (A001)	4	4	10	5	0,0078
Pres. Prudente (A707)	3	4	7	3	0,0101
Sta. Maria (A803)	6	3	10	7	0,0069
Palmas (A009)	4	4	9	6	0,0097
Caicó (A316)	4	5	8	7	0,0091
Mediana (P50)	4	4	9	6	0,0091

Para aprofundar esta questão, poderíamos analisar as FDC's mensais individuais, por oposição à FDC anual, bem como considerar a classificação das MMT's selecionadas.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, uma variação do método proposto por Hall *et al.* (1978) foi usada para gerar um conjunto de dados de anos meteorológicos típicos (TMY) para cinco localidades com características climáticas distintas no Brasil. Esses TMY's foram calculados a partir de 13 anos de dados meteorológicos para 10 índices climáticos diários de três fontes diferentes: observações específicas do local, dados de satélite modelados e dados de reanálise.

Um exame da sensibilidade das fontes de dados revelou que os meses identificados como "mais típicos" pela metodologia são bastante sensíveis quando diferentes fontes de dados são usadas. Tanto a mudança entre dados medidos e modelados por satélite, quanto a mudança entre dados modelados por satélite e dados de reanálises, levaram a discordância na maior parte dos meses. Já a sensibilidade ao método de geração do TMY se mostrou baixa, como elevado número de meses concordantes entre os métodos TMY e TMY3.

No entanto, nos casos em que as fontes de dados viés elevado, não implica necessariamente em um maior número de meses discordantes. Este fato sugere que a tipicidade dos meses é geralmente consistente, mesmo quando a fonte de dados é diferente. Este resultado possibilita, por exemplo, que se obtenha os MMTs a partir de bases de dados mais longas e menos precisas e posteriormente se adquira ou produza algum produto mais preciso (ex: modelos em alta resolução) apenas para os meses selecionados.

Apesar dos resultados sugestivos pautados acima, este estudo possui algumas limitações que podem restringir sua aplicabilidade. O reduzido número de anos utilizado para a geração dos TMYs (entre 8 e 13 anos) pode aumentar artificialmente (por casualidade) o nível de concordância entre os experimentos. A utilização dos dados medidos para as demais variáveis ambientais (temperatura, umidade e vento) em todos os experimentos também induz a um nível maior de concordância. Por fim o reduzido número de estações de superfície dado o território brasileiro pode restringir a generalização dos resultados. Outras localidades e mais bases de dados modelados podem ser incluídos em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Anna Tippet agradece a bolsa recebida do Oxford University Summer Internship Program para sua estadia no Brasil, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Um dos autores (Enio Pereira) agradece ao CNPq pela Bolsa de Pesquisador visitante na UNITAU, processo no. 350023/2021-2 e de Produtividade, processo no. 310148/2020-0. Este trabalho também é uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC) financiado pela FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1 e CAPES/FAPS nº 16/2014.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR (2023) - <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>
- Almeida, M.A.M.; Vasconcellos, V.N. (2019) - Development of the typical meteorological year for the Copacabana INMET meteorological station in the city of Rio de Janeiro (in Portuguese), XV Brazilian and Latin American Thermal Comfort Meeting, João Pessoa, September, 2019.
- ANEEL (2023) - National Electric Energy Agency statistics – open data - <https://dadosabertos.aneel.gov.br/>
- ASHRAE (2023) - International weather for energy calculations (IWEC Weather Files) User’s Manual, Version 1.1.
- Bonini, V. R. B.; Starke, A. R.; Lemos, L.F.L. and Colle, S. (2022) - IX Brazilian Solar Energy Congress – Florianópolis, Brazil (<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/issue/view/3>).
- Casagrande, M., S. G. ; Martins, F.R. ; Rosário, N. M. E. ; Lima, F. J. L. ; Goncalves, A. R.; Costa, R. S.; Zazur, A. M.; Pes, M. P. ; Pereira, E. B. (2021) - Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote Sensing*, v. 13, p. 4527-4556, doi: 10.3390/rs13224527.
- Chan, A.L., Chow, T.T., Fong, S.K. and Lin, J.Z. (2006) - Generation of a typical meteorological year for Hong Kong. *Energy Conversion and management*, 47(1), pp.87-96, doi: 10.1016/j.enconman.2005.02.010
- Finkelstein, J.M. and Schafer, R.E. (1971) - Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*, 58(3), pp.641-645, doi:10.2307/2334400.
- Hall, I.J., Prairie, R.R., Anderson, H.E. and Boes, E.C. (1978) - Generation of a typical meteorological year (No. SAND-78-1096C; CONF-780639-1). Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA).
- Huang, Y, J; Su, F.; Seo, D.; Krarti, D. (2014) - Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477), ASHRAE Transactions, vol. 120, no. 1
- Huld, T; Paietta, E; Zangheri, P and Pascua, P. (2018) - Assembling Typical Meteorological Year Data Sets for Building Energy Performance Using Reanalysis and Satellite-Based Data, *Atmosphere* 2018, 9, 53; doi:10.3390/atmos9020053.
- IEA (2022), International Energy Agency, *Renewables 2022*, IEA License: CC BY 4.0, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, (accessed on May 9, 2023),
- Luiz, E.W.; Martins, F.R.; Pereira, E.B. and Schuch, N.J. (2012) - Determinação de um Ano Meteorológico Típico para Florianópolis SC, Determination of a Typical Meteorological Year for Florianópolis SC, V Brazilian Solar Energy Congress and V Latin American Conference of ISES – São Paulo, September 18 to 21, 2012
- Machado, R. D.; Bravo, G.; Starke, A.; Lemos, L. and Colle, S. (2019) - Generation of 441 typical meteorological year from INMET stations – Brazil, ISES SWC2019 / SHC2019 Conference Proceedings, doi: 10.18086/swc.2019.45.02.

- Marion, W. and Urban, K. (1995) - User's Manual for TMY2's (Typical Meteorological Years) - NREL/TP-463-7668, doi: 10.2172/87130.
- Munõz Sabater, J., (2019) - ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.e2161bac
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. L.; Rütther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. (2017) - Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p., doi: 10.34024/978851700089.
- Skeiker, K. and Ghani, B.A. (2009) - A software tool for the creation of a typical meteorological year. Renewable Energy, 34(3), pp.544-554, doi: 10.1016/j.renene.2008.05.046.
- Skeiker, K. (2004) - Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method. Energy Conversion and Management, 45(1), pp.99-112, doi: 10.1016/S0196-8904(03)00106-7.
- Su F.; Huang J.; Xu T. and Zhang, C. (2009) - An evaluation of the effects of various parameter weights on typical meteorological years used for building energy simulation. Building Simulation, 2009, 2(1): 19-28, doi: 10.1007/s12273-009-9106-3.
- Wilcox, S. and Marion, W. (2008) - User's manual for TMY3 data sets (Revised). Technical Report NREL/TP-581-43156.

DATA SOURCE SENSITIVITY IN SOLAR RADIATION TYPICAL METEOROLOGICAL YEAR (TMY) FOR FIVE DIFFERENT REGIONS OF BRAZIL

Abstract. *In this article, we examine how sensitive the methodology for calculating a "Typical Meteorological Year" (TMY) is to changes in the source of the meteorological data series and the weighting factors used. Three different sources of meteorological data - ground-based observations, modeled satellite-derived data, and ERA5 reanalysis data - were used to determine the sensitivity of the TMY to the data source. The TMY was created for five different regions in Brazil using 13 years of hourly data for 10 meteorological indices consisting of maximum, minimum, and average air temperature, relative humidity, maximum and average wind speed, global total horizontal radiation, and normal direct solar radiation. The study shows that the source of the meteorological data plays little role in determining the "most typical" months. The typicality of the months was consistent even when data sources as diverse as in situ and modeled data were used. The study also shows that the exact choice of weighting scheme for the meteorological data source is relatively arbitrary, if not irrelevant. This is because meteorological parameters are not independent variables and therefore often represent redundant information. A few independent parameters are sufficient to produce a good TMY, and adding several interdependent parameters does not improve the quality of the TMY produced.*

Keywords: Typical Meteorological Year, Solar Energy, TMY