

GENERACIÓN DEL AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO PARA LA CIUDAD DE LA PLATA, ARGENTINA

Facundo Bre (1); Mauro G. García Santa Cruz (2); Víctor D. Fachinotti (3)

- (1) Ingeniero, becario doctoral CONICET, facubre@cimec.santafe-conicet.gov.ar, Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), UNL, CONICET, Predio "Dr. Alberto Cassano", Colectora Ruta Nacional 168 s/n, 3000, Santa Fe, Argentina, Tel.: +54 342 4511594 int. 7047
- (2) Arquitecto, becario doctoral CONICET, mggarciasc@gmail.com | Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata (FBA UNLP) | Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) | Diag. 78 N° 680, La Plata, Buenos Aires, Argentina, Tel.: +54 221 4236598
- (3) Dr. en Ingeniería, Investigador Independiente CONICET, vfachino@intec.unl.edu.ar, Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), UNL, CONICET, Predio "Dr. Alberto Cassano", Colectora Ruta Nacional 168 s/n, 3000, Santa Fe, Argentina, Tel.: +54 342 4511594 int. 7045

RESUMEN

El presente artículo es el resultado de un trabajo interdisciplinario y se realizó en el marco de las tesis doctorales de Bre (Mecánica Computacional) y García Santa Cruz (Arquitectura). El objetivo es la generación del año meteorológico típico (TMY) para la ciudad de La Plata en Argentina, sobre la base de los datos meteorológicos medidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) durante el período 1996-2016 y tiene como antecedentes los trabajos desarrollados por Bre y Fachinotti (2014; 2016) para la generación de los TMY de la ciudad de Santa Fe y de otras 14 localidades de la Región Litoral de Argentina. Se parte de las bases de datos meteorológicas proporcionadas por el SMN que contienen la temperatura de bulbo seco, temperatura de punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, dirección del viento, velocidad del viento, presión, humedad relativa, nubosidad total, altura del techo de nubes, precipitaciones, entre otras, medidas normalmente sobre una base horaria. Debido a que el SMN no cuenta con mediciones de radiación solar, esta variable es generada utilizando el modelo de radiación de Zhang-Huang calibrado para Paraná, localidad con clima Cfa como el de la ciudad de La Plata. Se define el TMY como una concatenación de 12 meses meteorológicos típicos (TMM), siguiendo el clásico método Sandia (Hall y otros, 1978). La tipicidad de un mes dentro de la base de datos se mide utilizando estadística de Finkelstein-Schafer aplicada a nueve índices. Como contribución de este trabajo a la simulación energética de edificios, se convirtió el TMY aquí generado al formato .epw requerido por EnergyPlus.

Palabras clave: año meteorológico típico, simulación energética de edificios, La Plata, Argentina.

ABSTRACT

The current article is the result of a interdisciplinary work done in the frameworks of the doctorate thesis of Bre (Computational Mechanics) and García Santa Cruz (Architecture). The goal is to generate the typical meteorological year (TMY) for La Plata city in Argentina, based on weather data measured by the Argentine Meteorological Service (SMN) during the period 1996-2016, and on the previous works of Bre and Fachinotti (2014; 2016) for the generation of TMY for Santa Fe and other 14 locations in the Argentine Littoral Region. The starting point are the weather databases from SMN, containing dry-bulb temperature, dew point temperature, wet-bulb temperature, wind direction and speed, pressure, relative humidity, total sky cover, ceiling height, precipitations, among others, normally measured on a hourly basis. Since SMN does not measure radiation, this variable is obtained using the Zhang-Huang radiation model, as it was calibrated to Paraná city, a location with Cfa climate like La Plata. The TMY is defined as the concatenation of 12 typical meteorological months (TMM), following the classical Sandia method (Hall et al., 1978). The typicality of a month in the database is measured using Finkelstein-Schafer statistics applied to nine daily indices. In order to contribute to building energy simulation, the currently generated TMY was converted to the .epw format required by EnergyPlus.

Keywords: typical meteorological year, building energy simulation, La Plata, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe la metodología utilizada para la generación del año meteorológico típico de la ciudad de La Plata y es el resultado de un trabajo interdisciplinario realizado en el marco de dos investigaciones doctorales en curso. La primera, denominada “Optimización del desempeño térmico y energético de viviendas en la región Litoral Argentina” desarrollada por el Ing. F. Bre en el marco del Doctorado en Ingeniería Mención Mecánica Computacional de FICH UNL, y la segunda, denominada “Determinación de las variables de análisis y construcción de los indicadores que permitan evaluar el nivel de conservación y sustentabilidad en edificios para la cultura” desarrollada por el Arq. M. G. García Santa Cruz en el marco del Doctorado en Arquitectura y Urbanismo FAU UNLP. El artículo tiene como antecedentes los trabajos desarrollados por Bre y Fachinotti (2014; 2016) para la generación de los años meteorológicos típicos (TMY) de la ciudad de Santa Fe y de otras 14 localidades de la Región Litoral de Argentina.

La ciudad de La Plata es la capital de la provincia de Buenos Aires, esta se localiza a una altura de 23m sobre el nivel del mar en la latitud $34^{\circ}55'$ S y longitud $57^{\circ}57'$ O. Posee una población de 654.324 hab., que representa el 4,18 % de la población de la provincia y el 1,63% de la población del país (CNPBV, 2010).

Según la clasificación de Köppen-Geiger, actualizada por Peel et al. (2007), su clima es Cfa (*C* por *warm temperate*, *f* por *fully humid*, *a* por *hot summer*). Más específicamente, de acuerdo a la norma IRAM 11603 (1996), La Plata se encuentra en la Zona bioambiental III (templada cálida) Subzona b (Figura 1). Esta región se caracteriza por veranos relativamente calurosos con temperaturas medias comprendidas entre $20-26^{\circ}\text{C}$ y máximas mayores que 30°C , inviernos no muy fríos con temperaturas medias entre $8-12^{\circ}\text{C}$ y mínimas que excepcionalmente son inferiores a 0°C . Sus amplitudes térmicas son menores a 14°C a lo largo de todo el año.

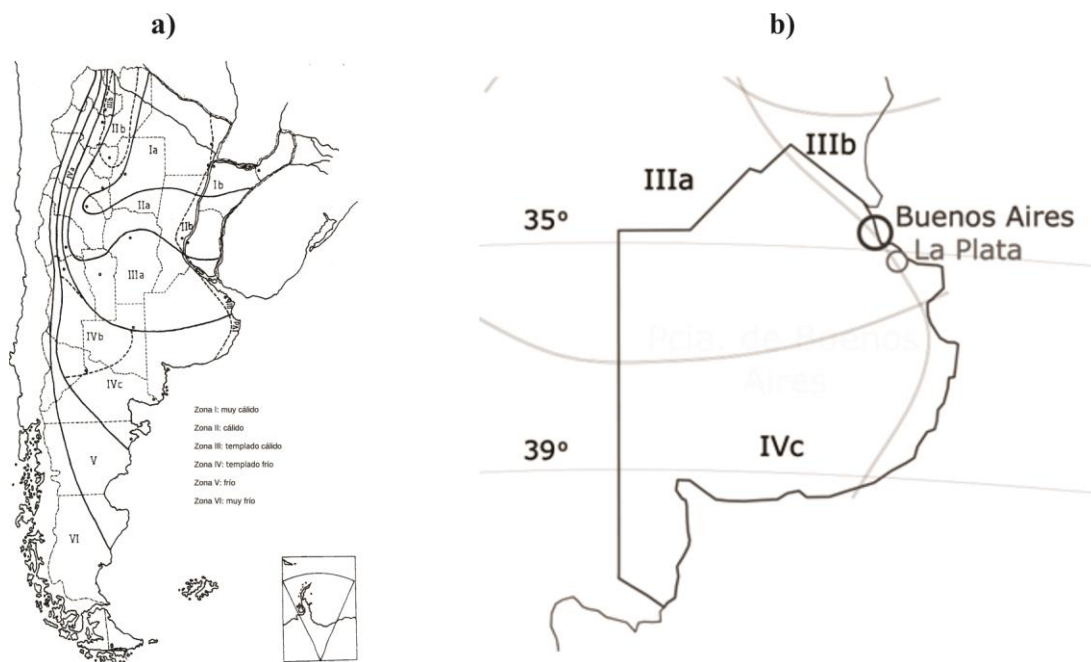


Figura 1 - a) Mapa de Argentina con las zonas bioclimáticas. b) Ubicación de las estaciones meteorológicas (IRAM 11603)

Para este trabajo el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina proporcionó los datos meteorológicos medidos en La Plata durante el período 1996-2016. La información provista consiste en los valores horarios de temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de punto de rocío (TPR), temperatura de bulbo húmedo (TBH), dirección del viento (DV), velocidad del viento (VV), presión (P), humedad relativa (HR), nubosidad total (NT), altura del techo de nubes (ATN), precipitaciones (Pr) y código de tiempo presente (TTP) registrados durante un período de 20 años. Sin embargo las bases de datos del SMN carecen de radiación solar, para lo cual no hay registros a largo plazo, continuos y frecuentes de esta variable en la localidad analizada. Por este motivo uno de los principales inconvenientes reside en la falta de datos experimentales de radiación solar. Bre y Fachinotti (2016), siguiendo el desarrollo de ASHRAE en IWEC (Thevenard y Brunger, 2002) e IWEC2 (Huang et al., 2014), evaluaron dos modelos basados en regresión: el modelo de Kasten (Kasten y Czeplak, 1980) y el modelo de Zhang-Huang (Zhang et al., 2002). Mediante el ajuste de las mediciones disponibles, así como de los datos de los archivos IWEC de localidades vecinas a la

región Litoral Argentina (Asunción-Paraguay y Buenos Aires-Argentina) y los datos derivados de satélites de la base de datos SSE (NASA, 2014), demostraron que el modelo de Zhang-Huang con coeficientes calibrados para Paraná es el más adecuado para estimar la radiación solar a largo plazo en la región Litoral. Dado que La Plata presenta el mismo clima Cfa que la región Litoral Argentina, se utilizará dicho modelo para completar los datos de radiación solar global (RSG) durante el período analizado.

Para cálculos de energía precisos en una localización dada es necesario conocer el clima local a intervalos cortos (usualmente con una frecuencia horaria) a lo largo de un año considerado como típico. Existen dos enfoques generales para definir un año típico:

1. Seleccionar un período continuo de 12 meses como típico.
2. Seleccionar cada mes del calendario típico por separado, y luego concatenar los 12 meses típicos para construir el año típico.

El primer enfoque se introdujo en la década de 1970, con ejemplos como el *Test Reference Year* (TRY) del *National Climatic Center* (NCC) en Estados Unidos (NCC, 1976), y el *Example Weather Year* (EWY) del *Chartered Institution of Building Services* (CIBS) en el Reino Unido (Hitchin et al., 1983). Esta aproximación excluye las condiciones extremas encontradas en los registros de largo plazo, produciendo años típicos excesivamente moderados.

Para evitar esto se decidió utilizar el segundo enfoque, siguiendo el trabajo pionero de Hall et al. (1978) en *Sandia National Laboratories* (EE.UU.). En este trabajo introdujeron el concepto de “año meteorológico típico” (TMY) como una concatenación de doce meses meteorológicos típicos (TMM).

Ejemplos más recientes son el TMY2 (Marion y Urban, 1995) y TMY3 (Wilcox y Marion, 2008) del *US National Renewable Energy Laboratory* (NREL), el nuevo *Test Reference Year* (TRY) del *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE, Reino Unido) (Levermore y Parkinson, 2006), IWEC (Thevenard y Brunger, 2002a, 2002b) e IWEC2 (Huang et al., 2014) de la *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers* (ASHRAE). Para un análisis comparativo de estos métodos, se recomiendan los trabajos de Crawley (1998), Lhendup y Lhundup (2007), y Chan (2016).

En el sitio web de datos meteorológicos de EnergyPlus (A.A.V.V., 2016) se pueden encontrar archivos que definen el año típico de más de mil localidades alrededor del mundo. Estos derivan de 20 fuentes distintas, incluyendo TMY de Sandia (Hall et al., 1978), TMY2 (Marion y Urban, 1995) y TMY3 (Wilcox y Marion, 2008) de NREL, y IWEC de ASHRAE (Thevenard y Brunger, 2002a, 2002b). En esta gran base de datos existen muy pocas localidades pertenecientes al sureste de América del Sur. Países como Paraguay y Uruguay están representados por una sola localidad cada uno ellos. Argentina se encontraba en la misma situación, con un solo archivo disponible (Buenos Aires). Actualmente, gracias al trabajo de Bre y Fachinotti (2016), Argentina cuenta con 15 TMYs más en formato EPW para utilizar en simulaciones térmicas y energéticas de edificios mediante EnergyPlus.

Teniendo en cuenta este contexto, se genera el año típico para La Plata sobre la base de los datos meteorológicos medidos por el SMN durante el período 1996-2016, complementado por la radiación solar calculada utilizando el modelo de Zhang-Huang (Zhang et al., 2002) calibrado para Paraná (Bre y Fachinotti, 2016).

Para generar el Año Meteorológico Típico (TMY) se utiliza una variante del método original de Hall et al. (1978), comúnmente denominado método Sandia. Un TMY es un conjunto de 12 meses meteorológicos típicos (TMMs). Tal como propone Hall et al. (1978), y luego retomaron Thevenard y Brunger (2002) para la generación de IWEC, la tipicidad de un mes se mide usando estadísticas de Finkelstein-Schafer basadas en nueve índices diarios (temperatura máxima, mínima y media de bulbo seco, punto de rocío, velocidad máxima y media del viento, y radiación solar global).

2. OBJETIVO

El objetivo del trabajo es la generación del año meteorológico típico (TMY) para la ciudad de La Plata, Argentina, partiendo de los datos meteorológicos medidos por el SMN durante el período 1996-2016, complementados por la radiación solar calculada utilizando el modelo de Zhang-Huang (Zhang et al., 2002) calibrado para Paraná (Bre y Fachinotti, 2016) donde el clima es Cfa como en La Plata.

3. METODOLOGÍA

3.1. Descripción de los datos meteorológicos

La base meteorológica utilizada para este trabajo fue confeccionada por el SMN a partir de mediciones realizadas durante el período 1996-2016 en la estación meteorológica localizada en el aeropuerto de La Plata. Los datos disponibles incluyen, entre otros, valores horarios de las siguientes variables meteorológicas:

1. Temperatura de bulbo seco (TBS)
2. Temperatura de punto de rocío (TPR)
3. Temperatura de bulbo húmedo (TBH)
4. Dirección del viento (DV)
5. Velocidad del viento (VV)
6. Presión (P)
7. Humedad relativa (HR)
8. Nubosidad total (NT)
9. Altura del techo de nubes (ATN)
10. Precipitaciones (Pr)
11. Código de tiempo presente (TTP)

Esta base de datos puede presentar registros faltantes, es decir, variables no medidas para determinadas horas. Los faltantes de hasta 5 hs se completan por interpolación lineal, mientras que los de 6 a 47 hs se completan con datos para idénticas horas de días adyacentes, siguiendo el procedimiento adoptado por NREL (1992) para la generación de la *National Solar Radiation Data Base* (NSRDB).

Si la base de datos de un mes tuviera faltantes más prolongados, la decisión de conservarla o descartarla se toma siguiendo el criterio de ASHRAE (2013) para el cálculo de las condiciones climáticas de diseño: se conserva si al menos el 85% del total de horas del mes tiene Temperatura de bulbo seco (TBS) registrada (ya sea medida o rellenada), y la diferencia entre cantidad de horas diurnas y nocturnas con TBS registrada es inferior a 60.

Luego de aplicar esta metodología se obtiene una base de datos completa para todo el período 1996-2016. Teniendo en cuenta que ASHRAE (2013) considera suficiente contar con 8 años de datos para cada mes calendario en un lugar determinado para el cálculo condiciones climáticas de diseño, concluimos que la base de datos disponible para este trabajo es suficientemente extensa.

3.2. Radiación Solar

Los datos aportados por el SMN no incluyen Radiación Solar Global (RSG), variable de primordial importancia para la definición del TMY. Por ello, en este trabajo se acudió al modelo de radiación de Zhang-Huang (Zhang et al., 2002), adaptado para la región Cfa de Argentina en un trabajo previo (Bre y Fachinotti, 2016). Este modelo permitió calcular la radiación solar global horaria en función de otras variables climáticas locales y de esta forma poder complementar la base de datos de La Plata con los requerimientos necesarios para su análisis estadístico.

3.2.1. Modelo de Zhang-Huang

Zhang y Huang (2002) definieron la radiación solar global en una superficie horizontal a la hora h como:

$$I(h) = \max(I_0 \sin \beta (c_0 + c_1 NT + c_2 NT^2 + c_3 (TBS(h) - TBS(h - 3)) + c_4 HR + c_5 VV) + d, 0) \quad \text{Ecuación 1}$$

donde $I_0 = 1355 \frac{W}{m^2}$ es la constante global solar, β es el ángulo de altura solar, c_0, \dots, c_5 y d son coeficientes de regresión. El ángulo de altura solar está definido por:

$$\beta = \sin^{-1}(\cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta) \quad \text{Ecuación 2}$$

donde L es la latitud local, δ la declinación solar y H el ángulo solar horario, definido como el desplazamiento angular del sol de este a oeste del meridiano local; los valores δ y H fueron obtenidos según

ASHRAE (2009). En un trabajo posterior, Zhang (2006) demostró que los resultados de ajuste no son sensibles al término de la velocidad del viento por lo que este puede ser descartado de la ecuación.

Los coeficientes de regresión utilizados se pueden observar en la Tabla 1, los mismos fueron obtenidos y validados por Bre y Fachinotti (2016).

Tabla 1: Coeficientes, factor de correlación (R) y error cuadrático medio (RMSE) para el modelo de radiación Zhang-Huang ajustado a la radiación solar horizontal global en Paraná durante 2013.

C0	C1	C2	C3	C4	d	R	RMSE
4,0042	0,8651	0,1627	-0,4871	0,0047	-0,0038	0,979	60,1

La Figura 2 muestra el ajuste del modelo de Zhang-Huang para la ciudad de Paraná.

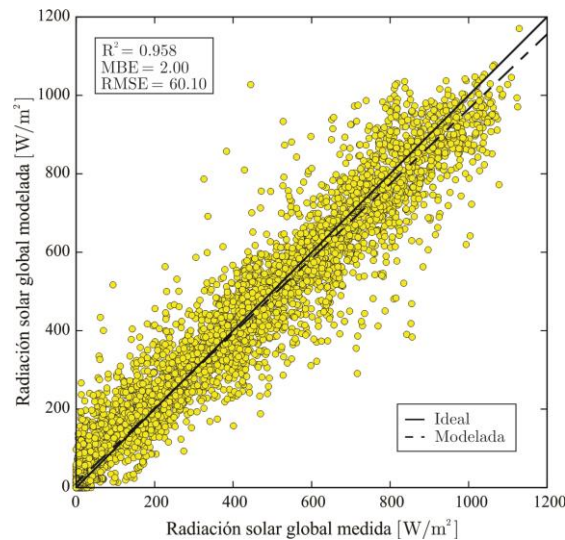


Figura 2 - Modelo de radiación de Zhang-Huang: ajuste de la radiación solar horizontal medida por hora (GHSR) en Paraná durante 2013.

3.3. Definición del año meteorológico típico

Considerando que ahora la ciudad de La Plata cuenta con una base completa de datos de variables meteorológicas por hora (incluida la radiación solar) para todos los meses del calendario en el período de 1996-2016, en esta sección se describe el proceso de definición del año meteorológico típico de la Plata basado en esta información. Siguiendo el método Sandia (Hall et al., 1978), se define el año meteorológico típico (TMY) como la concatenación de 12 meses meteorológicos típicos (TMMs).

Para ejemplificar el proceso de definición de un TMM se detalla la determinación del mes típico de enero para La Plata. Su base de datos tiene 21 eneros utilizables en el período 1996-2016. Siguiendo a Hall et al. (1978), se determina la bondad de cada uno de estos enero considerando los nueve índices meteorológicos diarios enumerados en la Tabla 2. Sea uno cualquiera de esos índices, por ejemplo la máxima diaria de la temperatura de bulbo seco (TBSMAX), se ordenan los datos de TBSMAX a lo largo de un período dado en forma creciente: $TBSMAX_1, TBSMAX_2, \dots, TBSMAX_n$, donde $TBSMAX \leq TBSMAX_{i+1}$ y n designa el número total de datos. Luego, se estima la función de distribución acumulada (CDF) para la variable TBSMAX en el período dado (en el que hay n datos) como:

$$\begin{aligned}
 & \text{CDF}(\text{TBSMAX}, \text{Periodo}) \\
 &= \begin{cases} 0 & \text{si } TBSMAX < TBSMAX_1 \\ (i - 0.5)/n & \text{si } TBSMAX_i \leq TBSMAX \leq TBSMAX_{i+1} \\ 1 & \text{si } TBSMAX > TBSMAX_n \end{cases} \quad \text{Ecuación 3}
 \end{aligned}$$

Para saber cuan representativa es la TBSMAX de un enero en particular, por ejemplo enero 1996, se utiliza la estadística de Finkelstein-Schafer (1971):

FS(TBSMAX, ene2016)

$$= \sum_{i=1}^{31} |\text{CDF}(\text{TBSMAX}_i, \text{ene1996-2016}) - \text{CDF}(\text{TBSMAX}_i, \text{ene1996})| \quad \text{Ecuación 4}$$

La representatividad de enero 1996 considerando su TBSMAX será tanto mayor cuanto menor sea el correspondiente FS. De manera análoga, se determina FS(X, ene1996) para X = TBSMIN, TBSMED, TPRMAX, etc. usando las Ecuaciones Ecuación 3 y Ecuación 4 con TBSMAX remplazada por X.

En general, algunas variables serán más relevantes que otras en la elección del mes típico. Para ello, se define el FS ponderado:

$$\text{WFS}(\text{ene1996}) = \sum_X w_X \times \text{FS}(X, \text{ene1996}) \quad \text{Ecuación 5}$$

donde w_X es el peso que se le asigna a la variable X. La representatividad de enero 1996 en términos de todos los índices diarios es mayor cuanto menor sea su WFS. Siguiendo a Thevenard y Brunger (2002a), los w_X utilizados son los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 - Índices meteorológicos diarios para la definición del TMM y sus respectivos factores de ponderación, utilizados por el método Sandia (Hall et al., 1978) y por el método de generación de IWEC (Thevenard y Brunger, 2002a).

Índice I	Variables diarias	Sigla	Factores de ponderación	
			Sandia	IWEC
1	Temperatura de bulbo seco Máxima	TBSMAX	1/24	2/40
2	Temperatura de bulbo seco Mínima	TBSMIN	1/24	2/40
3	Temperatura de bulbo seco Media	TBSMED	2/24	12/40
4	Temperatura de punto de rocío Máxima	TPRMAX	1/24	1/40
5	Temperatura de punto de rocío Mínima	TPRMIN	1/24	1/40
6	Temperatura de punto de rocío Media	TPRMED	2/24	2/40
7	Velocidad del viento Máxima	VVMAX	2/24	2/40
8	Velocidad del viento Media	VVMED	2/24	2/40
9	Radiación solar global Total	RSGTOT	12/24	16/40

Se repite el procedimiento detallado para enero 1996 para todos los demás eneros, obteniendo sus correspondientes WFS(eneYYYY), YYYY=1997,...,2016. Finalmente, siguiendo a Thevenard y Brunger (2002a) y Huang et al. (2014), se elige como TMM para enero al que tiene el menor WFS.

4. RESULTADOS

La elección de los TMMs para los demás meses calendarios es análoga a la descrita para enero. La Tabla 3 muestra los WFS para todos los meses en el período 1996-2016. Allí están subrayados los meses con menor WFS, que son los seleccionados como TMM. El año meteorológico típico es la concatenación de los 12 TMMs, listados en Tabla 4. En general, los TMMs para meses contiguos provienen de diferentes años. Luego, aparecen saltos de las variables meteorológicas entre el final de un TMM y el inicio del siguiente, que se eliminan mediante suavizado cúbico basado en las últimas seis horas del primer mes y las seis primeras horas del segundo mes, según lo recomendado por Hall et al. (1978).

Tabla 3 - WFS para todos los meses calendarios del año utilizando factores de ponderación IWEC.
Los meses meteorológicos típicos están en cursiva y subrayados.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1996	0.075	0.074	0.082	0.066	0.056	0.116	0.125	0.082	0.077	0.070	<u>0.051</u>	0.087
1997	0.092	0.108	0.063	0.070	0.101	0.104	0.073	0.097	0.070	0.071	0.102	0.163
1998	0.171	0.160	0.085	0.126	0.092	0.079	0.137	0.094	0.063	<u>0.054</u>	0.068	0.076
1999	0.150	0.070	0.100	0.128	0.059	0.092	0.061	0.062	0.066	0.059	0.077	<u>0.048</u>
2000	0.072	0.067	0.087	0.135	0.122	0.130	0.162	0.096	0.063	0.092	0.121	0.081
2001	0.091	0.111	0.156	<u>0.063</u>	0.105	0.099	0.084	0.173	0.066	0.155	0.082	0.094
2002	0.077	0.111	0.141	0.104	0.099	0.091	0.084	0.056	0.079	0.086	0.086	0.124
2003	0.057	0.121	0.065	0.096	0.052	0.093	0.079	0.116	0.073	0.087	0.092	0.117
2004	0.082	0.112	0.124	0.080	0.124	0.122	0.064	0.078	0.052	0.072	0.147	0.109
2005	0.065	0.113	0.100	0.100	0.053	0.145	0.115	0.090	0.091	0.133	0.112	0.137
2006	0.149	0.075	0.109	0.063	0.139	0.058	0.137	0.109	0.090	0.066	0.066	0.083
2007	0.089	0.074	0.113	0.068	0.121	0.109	0.133	0.142	0.109	0.081	0.112	0.067
2008	0.056	0.067	0.079	0.099	0.082	0.076	0.111	0.080	0.101	0.087	0.141	0.057
2009	0.074	0.082	0.083	0.082	<u>0.048</u>	0.079	0.104	<u>0.053</u>	0.097	0.094	0.093	0.141
2010	0.072	0.100	<u>0.053</u>	0.108	0.073	0.071	0.065	0.112	0.054	0.128	0.086	0.111
2011	0.056	0.099	0.121	0.084	0.074	0.060	0.076	0.093	0.103	0.075	0.071	0.080
2012	0.107	<u>0.048</u>	0.056	0.090	0.114	<u>0.048</u>	0.169	0.126	<u>0.049</u>	0.092	0.065	0.056
2013	0.073	0.071	0.125	0.071	0.051	0.072	<u>0.043</u>	0.129	0.089	0.062	0.070	0.114
2014	<u>0.045</u>	0.183	0.088	0.078	0.097	0.072	0.055	0.090	0.101	0.112	0.052	0.060
2015	0.113	0.078	0.125	0.133	0.087	0.091	0.051	0.129	0.096	0.160	0.063	0.059
2016	0.071	0.134	0.116	0.148	0.192	0.153	0.112	0.061	0.079	0.079	0.052	0.105

Tabla 4 - Meses meteorológicos típicos (TMM) para la ciudad de La Plata

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2014	2012	2010	2001	2009	2012	2013	2009	2012	1998	1996	1999

La Figura 3 muestra los valores horarios mensuales de la radiación solar global y la temperatura de bulbo seco, promediados sobre el TMY, sobre todos los años y sobre un año conformado con los peores meses en términos de WSF.

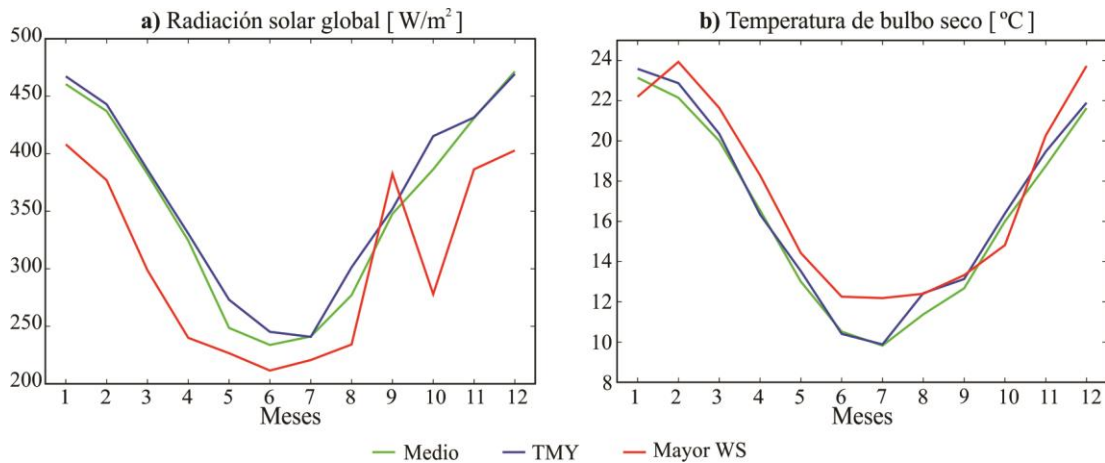


Figura 3 - Valores horarios mensuales promediados sobre el TMY, sobre todos los años y sobre un año conformado con los peores meses en términos de WFS: a) Radiación solar global; b) Temperatura de bulbo seco.

La Figura 4 muestra los valores horarios de la radiación solar global promediada sobre el TMM, sobre todos los meses del período 1996-2016, y sobre el mes con WFS más alta para un mes de verano (Enero) y uno de invierno (Julio).

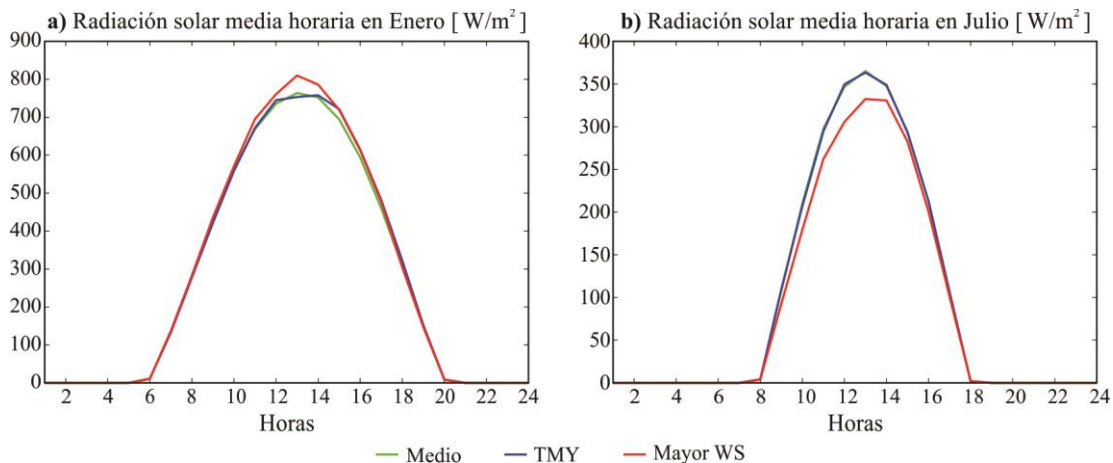


Figura 4 - Valores horarios de la radiación solar global promediada sobre el TMM, sobre todos los meses del período 1996-2016, y sobre el mes con WFS más alta: a) Enero, b) Julio.

La Figura 5 muestra los valores horarios de la temperatura de bulbo seco promediada sobre el TMM, sobre todos los meses del período 1996-2016, y sobre el mes con WFS más alta para un mes de verano (Enero) y uno de invierno (Julio).

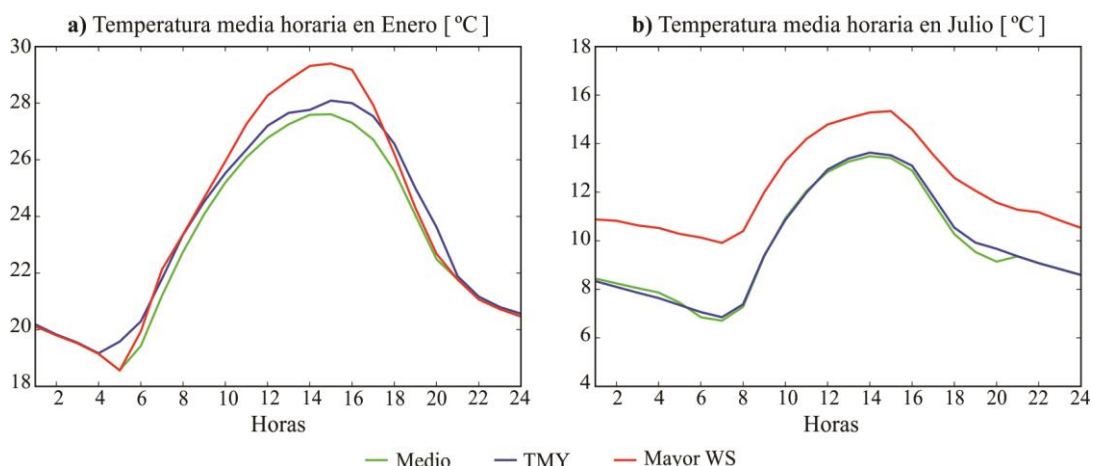


Figura 5 - Valores horarios de la temperatura de bulbo seco promediada sobre el TMM, sobre todos los meses del período 1996-2016, y sobre el mes con WFS más alta: a) Enero, b) Julio.

5. CONCLUSIONES

La primera contribución de este trabajo es el procesamiento de las bases de datos meteorológicas proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para la ciudad de La Plata correspondientes al período 1996-2016. En general estas bases de datos tienen intervalos sin mediciones, pero se han completado mediante el uso de métodos válidos de rellenado de datos, que las ha tornado aceptables para el posterior análisis. Sin embargo estas bases carecían de datos de radiación solar, los que se generaron utilizando el modelo de radiación de Zhang-Huang (Zhang et al., 2002) calibrado para Paraná (Bre y Fachinotti, 2016), donde el clima es Cfa como en La Plata (Peel et al., 2007). De esta forma se obtuvieron todos los datos meteorológicos necesarios para la definición del año meteorológico típico (TMY) de La Plata, objetivo final de este trabajo.

El TMY de La Plata fue generado como una concatenación de meses meteorológicos típicos (TMM) mediante una versión modificada del método Sandia original (Hall et al., 1978). Los resultados obtenidos de la aplicación de esta metodología mostraron las diferencias claras entre las características de un año meteorológico típico y uno que no es representativo en cuanto a su cercanía con el año medio. Esto brinda una idea de la repercusión que genera una mala elección de los datos climáticos (condiciones de borde) para utilizar en simulaciones térmicas y energéticas de edificios.

Finalmente, como otra contribución de este trabajo a la simulación energética de edificios, se convirtió el TMY generado para La Plata al formato EPW requerido por el programa de simulación energética EnergyPlus. Trabajos futuros se focalizarán en extender la metodología a otros climas del país como así también generar otros formatos posibilitando utilizar los datos meteorológicos típicos en simulaciones del desempeño de edificios mediante otros programas tales como ESP-r y DAYSIM/Radiance.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por financiar las investigaciones doctorales en el marco de las cuales fue posible realizar este trabajo. A las autoridades del Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) y de la Facultad de Bellas Artes (FBA UNLP) por autorizar la realización de las investigaciones doctorales en sus instalaciones. Al Centro de Información Meteorológica (CIM) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina por brindar la base de datos con mediciones meteorológicas de La Plata para el período 1996-2016, fuente clave de información para el desarrollo de este trabajo. A los Dres. Dru Crawley y Linda Lawrie por haber revisado la calidad del archivo EPW generado en este trabajo para su posterior distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.A.V.V. EnergyPlus weather data, 2016. URL <https://energyplus.net/documentation>.
- ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE 2013 Handbook – Fundamentals, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, 2013.
- BRE, F.; FACHINOTTI, V. D. Generación del año meteorológico típico para la ciudad de Santa Fe en la Región litoral Argentina. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 18, pp.11.01-11.08, 2014.
- BRE, F.; FACHINOTTI, V. D. Generation of typical meteorological years for the Argentine Littoral Region. **Energy and Buildings** v. 129, p 432-444, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.006>
- CHAN, A.L.S. Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems, **Renewable Energy** v. 90, p 1–13, 2016.
- CNPHV - Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Disponible en <http://www.estadistica.ec.gba.gov.ar/dpe/Estadistica/censo2010/censo2010resultdefinitivo.html>
- CRAWLEY, D.W. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? **ASHRAE Trans.** 104 (2) (1998), TO-98-2-2, 1-18.
- HALL, I.J.; PRAIRIE, R.R.; ANDERSON, H.E.; BOES, E.C. Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations. Technical Report SAND78-1601, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, 1978.
- HITCHIN, E.R.; HOLMES, M.J.; HUTT, B.C.; IRVING, S.; NEVRALA, D. The CIBS example weather year, **Build. Serv. Eng. Res. Technol.** 4 (3) (1983) 119–124.
- HUANG, Y.J.; SU, F.; SEO, D.; KRARTI, M. Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477), **ASHRAE Trans.** 120 (Part 1) (2014) 340–355.
- IRAM - Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Norma IRAM 11603: Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. 1996.
- KASTEN, F.; CZEPLAK, G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, **Solar Energy** 24 (2) (1980) 177–189.
- LEVERMORE, G.J.; PARKINSON, J.B. Analyses and algorithms for new test reference years and design summer years for the UK, **Build. Serv. Eng. Res. Technol.** 27(4) (2006) 311–325.

- LHENDUP, T.; LHUNDUP, S. Comparison of methodologies for generating a typical meteorological year (TMY), **Energy Sustain. Dev.** XI (3) (2007) 5–10.
- MARION, W.; URBAN, K. User's Manual for TMY2s Typical Meteorological Years, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Golden, CO, USA, 1995.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. Surface meteorology and Solar Energy (SSE), 2014. URL <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi>.
- NCC - National Climatic Center. Test Reference Year (TRY), DSI-9706, 1976.
- NREL - National Renewable Energy Laboratory. NSRDB Volume 1 – User's Manual – National Solar Radiation Data Base (1961–1990), Version 1.0, NREL, Golden, CO, USA, 1992.
- PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., AND MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 11, p 1633–1644, 2007. doi:10.5194/hess1116332007, 2007.
- RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, 2012, URL http://www.roriz.eng.br/epw_9.html
- SKEIKER, K. Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein–Schafer statistical method, **Energy Convers. Manag.** 45 (2004) 99–112.
- SU, F.; HUANG, J.; XU, T.; ZHANG, C. An evaluation of the effects of various parameter weights on typical meteorological years used for building energy simulation, **Build. Simulat.** 2 (2009) 19–28.
- THEVENARD, D.J.; BRUNGER, A.P. The development of typical meteorological weather years for international locations: Part I, Algorithms, **ASHRAE Trans. Res.** 108 (2002a) 376–383.
- THEVENARD, D.J.; BRUNGER, A.P. The development of typical meteorological weather years for international locations: Part II, Production/Discussion, **ASHRAE Trans.** 108 (2002b) 480–486.
- WILCOX, S.; MARION, W. Users Manual for TMY3 Data Sets, Technical Report NREL/TP-581-43156, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy, Golden, CO, USA, 2008.
- ZHANG, Q.; HUANG, J.; LANG, S. Development of typical year weather data for Chinese locations, **ASHRAE Trans.** 108 (Pt. 2) (2002).
- ZHANG, Q.; Development of the typical meteorological database for Chinese locations. **Energy and Buildings.** v. 38, p 1320-326, 2006