

DISEÑO DEL AÑO METEOROLOGICO TIPICO PARA LA CIUDAD DE SALTA CAPITAL

Andrés E. Díaz¹ y Alejandro L. Hernández²

Instituto de Investigaciones de Energía No Convencional (INENCO)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta –CIUNSa
Av. Bolivia 5150, C.P. 4400 – Salta
Tel. 0387- 4255579 – Fax: 0387- 4255489. E-mail: andresmadara86@gmail.com

Recibido 24/07/17, aceptado 25/09/17

RESUMEN: Se desarrolló un año meteorológico típico (TMY, del inglés Typical Meteorological Year) con un nuevo método que combina los factores de ponderación de cuatro conjuntos de diferentes generadores de TMY. La definición del TMY es fundamental para la elaboración del archivo climático utilizado por los códigos de Simulación Energética de Edificios. Este trabajo está dedicado a la definición del TMY en la ciudad de Salta (1232 msnm), para ser aplicado en el diseño de viviendas de interés social y colectores solares calentadores de aire. Se partió de datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina sobre diversas variables meteorológicas registradas en intervalos horarios a lo largo de 11 años (2006-2016) en el Aeropuerto Martín M. de Güemes, mientras los datos de radiación fueron proporcionados por el Instituto de Investigaciones de Energía No Convencional (INENCO). En base a criterios estadísticos, para cada mes del año, uno de todos los meses de muestra se cataloga como Mes Meteorológico Típico TMM. La concatenación de los doce TMM define el TMY.

Palabras clave: Año Meteorológico Típico, Métodos de Generación del TMY, Simulación Energética de Edificios.

INTRODUCCION

En la actualidad existen dos tipos comunes de datos meteorológicos típicos adoptados para la construcción de simulaciones energéticas: el Año de Prueba de Referencia (TRY) y el Año Meteorológico Típico (TMY). En un TRY, la información climática de 8.760 h para un año en particular se selecciona por un procedimiento simple establecido por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) en 1970, (DOES, 1980). En todo el proceso de selección, sólo se adopta un único índice climático, el de la temperatura de bulbo seco. Todos los meses de los años candidatos en el período de estudio se clasifican alternando entre la mitad caliente (Noviembre-Abril) y la mitad fría (Mayo -Octubre) del año. Los meses extremos se colocan en el orden de la temperatura promedio mensual de bulbo seco. Se selecciona un TRY eliminando aquellos años candidatos en el período de estudio que contienen meses con temperaturas de bulbo seco extremadamente altas o bajas. El proceso de eliminación se continúa hasta que sólo queda un año que es la TRY seleccionada.

Durante la selección de TRY, los meses candidatos con temperaturas de bulbo seco mensuales extremadamente altas o bajas se eliminan progresivamente, resultando en un año particularmente suave que puede no ser capaz de representar la condición climática típica a largo plazo. La construcción de simulaciones de energía utilizando datos meteorológicos del TRY es obviamente menos fiable en la reproducción de las condiciones históricas promedio, (Hui, 1996). Las cintas TRY

¹ Becario doctoral de CONICET.

² Investigador Independiente de CONICET

de tiempo fueron desarrolladas originalmente por el Centro Nacional de Datos Climáticos de los Estados Unidos para propósitos de investigación. ASHRAE declaró que el TRY no se recomienda para su uso en el estudio de mediano y largo plazo del rendimiento de los edificios, (ASHRAE, 1989).

El servicio climático alemán (DWD) y el holandés tienen múltiples investigaciones respecto a la actualización y mejora del TRY. El DWD tiene TRYs que no solo cubren más de diez parámetros sino que también tienen metodologías para calcular TRYs para años extremos.

TMY es otro tipo común de datos meteorológicos que es ampliamente adoptado por varios investigadores. Un conjunto de datos de TMY proporciona datos meteorológicos de un año completo que representan las condiciones climáticas en una ciudad específica durante un período de tiempo razonablemente largo. En la selección de un TMY se utilizan los datos de nueve índices climáticos críticos incluyendo las temperaturas máximas diarias, mínimas y medias de bulbo seco y punto de rocío; el máximo diario y la velocidad media del viento y la radiación solar global horizontal total diaria.

Para el procedimiento de selección del TMY, Hall et al. (1978) desarrollaron conjuntos de datos meteorológicos TMY para 26 estaciones de SOLMET en EE.UU. (conocido como el método Sandia), (Hall, 1978). En 1994, la Base Nacional de Datos de Radiación Solar (NSRDB) siguió el método Sandia con factores de ponderación modificados (como se muestra en la Tabla 1) para generar 239 conjuntos de datos TMY para una serie de estaciones meteorológicas en Estados Unidos, (Marion, 1995). Este nuevo conjunto de datos meteorológicos TMY fue etiquetado como TMY2.

Del mismo modo, un conjunto de archivos meteorológicos TMY fue producido por ASHRAE en 1997 mediante el uso de otro conjunto de nuevos factores de ponderación (véase Tabla 1] para los índices climáticos utilizados en el método de Sandia, (ASHRAE, 2002). Este conjunto de datos, denominado como los archivos meteorológicos del Clima Internacional Para Cálculos Energéticos (International Weather for Energy Calculation (IWEC)), contiene archivos meteorológicos de TMY por hora para 227 ciudades ubicadas en más de 70 países diferentes. En 2007, un nuevo conjunto de datos meteorológicos TMY (titulado TMY3), fue generado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), (Wilcox, 2008). Estos archivos meteorológicos TMY3 proporcionan datos meteorológicos actualizados con una mayor cobertura en más de 1000 ubicaciones en Estados Unidos.

En este trabajo se desarrolló un año meteorológico típico con un método que combina los factores de ponderación de los conjuntos generadores de TMY mencionados anteriormente. El método se lo nombro TMYPlus, el mismo se detalla en Tabla 1.

Durante el proceso de desarrollo de un TMY, los TMM se seleccionan para representar las propiedades a largo plazo de los datos meteorológicos. Las condiciones meteorológicas extremas causadas por eventos atípicos se filtran para asegurar que el archivo meteorológico TMY puede representar la condición climática a largo plazo (Dobos, 2012). Para el análisis financiero de un proyecto, por ejemplo solar, estos eventos atípicos pueden representar los peores años que afectan significativamente la decisión financiera del proyecto. Dado que los archivos TMY no incluyen datos meteorológicos de los años potencialmente peores, son más apropiados para estudiar el desempeño a largo plazo de un sistema solar en lugar de para la toma de decisiones financieras.

Para la decisión financiera sobre el proyecto se desarrollaron los datos meteorológicos P50 y P90 que se consideran más adecuados para este propósito, (Dobos, 2012). P50 y P90 representan los datos de un año típico en el que se superan los valores del 50% o 90%, respectivamente, de todos los años estudiados, mientras que los datos meteorológicos TMY son más adecuados para estudiar el rendimiento medio a largo plazo de un sistema térmico.

FACTORES DE PONDERACIÓN

Los valores de los factores de ponderación de los índices climáticos utilizados en el método de Sandia desempeñan un papel importante en el proceso de generación de TMY. Estos factores de ponderación expresan la importancia relativa del impacto de un determinado índice climático sobre el rendimiento

térmico y energético de un edificio o un sistema energético. Existen varios conjuntos de factores de ponderación adoptados por diferentes investigadores de todo el mundo que se enumeran en la Tabla 1. Los valores de estos factores de ponderación se asignaron principalmente de acuerdo con la experiencia del investigador sobre la influencia de los índices climáticos en el rendimiento térmico.

Para citar algunos trabajos de investigación anteriores llevados a cabo por investigadores sobre este tema, Bre F. y Fachinotti V. (Bre F., 2014) desarrollaron un año meteorológico típico para la región del litoral argentino, utilizando el método de Hall o comúnmente llamado TMY1. Yang y Lu (Yang H. y Lu I., 2011), investigaron el efecto del año meteorológico típico (TMY) y el ejemplo del año meteorológico (EWY) sobre los resultados de simulación de energía de edificios e híbridos solares-eólicos. De acuerdo a la experiencia previa de los autores y el juicio académico, se asignaron altas ponderaciones a la radiación solar y a la velocidad del viento (11/24 para cada una) para generar un TMY. Se realizó una simulación por computadora para evaluar el rendimiento energético de un sistema híbrido de energía solar-eólica utilizando el archivo meteorológico TMY generado por los autores. El resultado mostró que, para el sistema híbrido de energía solar-eólica, se pudo encontrar una diferencia máxima del 20% en el resultado de la simulación en comparación con la salida simulada utilizando un archivo meteorológico TMY generado con los factores de ponderación originales de Hall, concluyendo que el método EWY no es el apropiado para representar el archivo meteorológico anual.

Índice climático	TMY1 [Hall]	TMY2 [Marion] , TMY3 [Wilcox]	IWEC	AG [Chan]	TMYPlus
Temp. de bulbo seco MAX	1/24	1/20	5/100	0.061	0.0416
Temp. del bulbo seco MIN	1/24	1/20	5/100	0.003	0.0416
Temp. de bulbo seco MED	2/24	2/20	30/100	0.258	0.0833
Temp. del punto de rocío MAX	1/24	1/20	2.5/100	0.106	0.05
Temp. del punto de rocío MIN	1/24	1/20	2.5/100	0.008	0.05
Temp. del punto de rocío MED	2/24	2/20	5/100	0.017	0.1
Velocidad del viento MAX	2/24	1/20	5/100	0.146	0.05
Velocidad del viento MED	2/24	1/20	5/100	0.082	0.05
Radiación solar global horizontal total	12/24	5/20	40/100	0.319	0.319

Tabla 1: Conjuntos de factores de ponderación para varios índices climáticos.

Para modelar y estudiar la dispersión de contaminantes en la atmósfera, generalmente se adoptan datos a largo plazo (conocido como enfoque clásico). En Italia, (Mandurino y Vestrucci, 2009) exploraron la posibilidad de utilizar un TMY generado con un nuevo conjunto de factores de ponderación (10/16 para la velocidad media del viento, 5/16 para la radiación global y 1/16 para la temperatura media) que fue evaluado mediante un método de comparación de parejas, con la participación de un grupo de expertos. El resultado de la simulación utilizando el nuevo archivo meteorológico de TMY demostró un buen acuerdo con los resultados obtenidos mediante la simulación multianual de datos a 10 años.

Los años meteorológicos típicos para ocho ciudades con diferentes climas en China fueron generados por Jiang, (Jiang, 2010), utilizando los datos meteorológicos disponibles de un período de 1995-2004 y el método de Sandia. Según el juicio de los autores, se asignaron factores de ponderación relativamente grandes de 0,5 (0,25 para la radiación solar global y 0,25 para la radiación solar directa) y 0,25 (para la temperatura del bulbo seco). La razón es que la radiación solar y la temperatura de bulbo seco representan una parte significativa de la carga de enfriamiento del edificio; Y los otros índices climáticos son más o menos dependientes de la cantidad de radiación solar.

En Nigeria, los años meteorológicos típicos para cinco localizaciones diferentes fueron desarrollados por Ohunakin et al. (2013). Los autores asignaron intuitivamente los valores de los factores de ponderación para los principales parámetros meteorológicos. Los factores de ponderación de 5/12 y 2/12 se asignaron a la radiación solar global ya la temperatura media de bulbo seco, respectivamente, mientras que los otros parámetros meteorológicos recibieron iguales factores de ponderación con una suma de hasta 5/12. Estos TMYs se generaron principalmente para su aplicación en sistemas de energía solar. En el estudio de Rahman & Dewsbury et. al. (2007) aplicaron el método de Sandia para seleccionar datos meteorológicos típicos de Subang, Malasia con seis conjuntos de factores de ponderación arbitrariamente asignados para cuatro parámetros meteorológicos. El estudio reveló que los datos meteorológicos típicos seleccionados mediante el uso de factores de ponderación iguales eran adecuados para la construcción de simulaciones de energía, salvo que hubiera razones para utilizar otra combinación de factores de ponderación para seleccionar los datos meteorológicos típicos para su aplicación en otros sistemas energéticos. El autor A.L.S. Chan, (Chan, 2016) desarrolló un nuevo generador de archivos meteorológicos utilizando algoritmos genéticos (AG). Mediante el empleo de este generador de archivos meteorológicos, se pueden generar conjuntos óptimos de factores de ponderación para desarrollar archivos TMY apropiados para diferentes sistemas energéticos, Tabla 1.

Los estudios previos realizados por diversos investigadores concluyen que un conjunto de factores de ponderación correctos desempeña un papel crucial en la generación de archivos meteorológicos TMY apropiados para la simulación computacional de diferentes aplicaciones. Sin embargo, no existe ningún principio fundamental o acuerdo general sobre la asignación de los valores de los factores de ponderación a los factores climáticos en la generación de TMY.

PROCEDIMIENTOS DE SELECCIÓN DEL MES METEOROLÓGICO TÍPICO TMM

En este estudio, el desarrollo del archivo de datos meteorológicos TMY básicamente sigue los procedimientos de selección del método Sandia TMY, TMY2, IWEC, CHAN y TMYPlus. En los cinco métodos, nueve índices climáticos críticos incluyendo las temperaturas máximas diarias, mínimas y medias de bulbo seco y del punto de rocío; máxima diaria y velocidad media del viento; y la radiación solar global horizontal total diaria se evalúan utilizando las estadísticas de Finkelstein-Schafer (FS) para seleccionar 12 TMM. Para cada mes candidato en cada año individual, se determina la función de distribución acumulativa (CDF, del inglés Cumulative Distribution Function) para cada uno de los nueve índices climáticos. La CDF para cada índice climático x se define de la siguiente manera:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < x_1 \\ \frac{(k-0.5)}{n} & \text{si } x_k \leq x < x_{k+1} \\ 1 & \text{si } x > x_n \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

$S_n(x)$ = valor de la CDF en x .

n = número total de datos examinados (en esto caso la cantidad de días del mes examinado).

k = orden de la posición del dato examinado ($k=1, 2, \dots, n-1$).

De su definición, $S_n(x)$ es una función escalonada monotónicamente creciente con pasos de tamaño $1/n$ que ocurre en x_i y está limitado por 0 y 1.

Utilizando la misma ecuación, Ec. (1), también se evalúan los valores de CDF a largo plazo que cubren todo el período de los años estudiados. La Ec. (2) que se muestra a continuación se utiliza para calcular la diferencia absoluta (estadística FS) entre el CDF a corto plazo de un mes candidato en un año individual y el CDF a largo plazo para medir el grado de cercanía o semejanza.

$$FS_x(y, m) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |CDF_m(x_i) - CDF_{y,m}(x_i)| \quad (2)$$

Donde:

FS = estadísticas de Finkelstein-Schafer

y = año (= 1 al 11 para los años 2006-2016 en este estudio)

m = mes (= 1 al 12)

N = números de lecturas no repetidas durante el período de largo plazo para un mes candidato

Para reflejar la importancia relativa de cada índice climático en la selección del TMM, se aplica un conjunto de factores de ponderación (WF, del inglés Weighting Factors) para calcular una suma ponderada (WS) de las estadísticas del FS, expresadas en la Ec. (3). Un resumen de los factores de ponderación para los nueve índices climáticos se enumeran en la Tabla 1. En este estudio se utilizaron los cuatros conjuntos de factores de ponderación.

$$WS(y, m) = \sum_{j=1}^9 FS_j(y, m) * WF_j \quad (3)$$

Con la Ec. (3) y los factores de ponderación, los valores de WS se calculan para cada mes candidato de cada año individual. Entonces todos los meses se clasifican en un orden ascendente según sus valores de WS. Para cada mes, se seleccionan cinco meses candidatos con los valores WS más bajos para una selección adicional.

En el método de Sandía, se incorpora una estructura de persistencia con el fin de excluir los meses candidatos con el mes más largo (cantidad de días) o el más corto. Los percentiles fijos a largo plazo serán evaluados para la frecuencia y duración de la temperatura media de bulbo seco y radiación solar total diaria, sirviendo como criterio adicional para seleccionar un TMM de los cinco meses candidatos previamente identificados (con los valores de WS más bajos). Sin embargo, IWEC (ASHRAE, 2002) comentó que los cinco meses candidatos con los valores más bajos WS se puede rechazar mediante el criterio de estructura de persistencia en la etapa de selección final implementada por el método Sandía. En el presente estudio se siguió la recomendación del IWEC y no se adoptó la estructura de persistencia. El mes candidato con el valor WS más bajo se identificó como el TMM, ya que la suma ponderada WS me da cuan alejado estoy de la media de largo plazo analizada (en este caso 11 años de datos).

Los valores de la suma ponderada (WS) de las estadísticas del FS para cada mes candidato (Ene-Dic) del período de 11 años (2006-2016) se tabulan en la Tabla 2. Como se indica, los valores de WS impresos en negrita y subrayados identifican los TMMs candidatos de cada método.

En este trabajo se realizó el seleccionado del TMM candidato aplicando cinco diferentes métodos para la generación del TMY. El primero método consta del llamado TMY1, (Hall, 1978) cuyos factores de ponderación se muestran en Tabla 1, de manera similar para los demás métodos; TMY2 y TMY3 (Marion, 1995); IWEC (ASHRAE, 2002) y el método generado con el Algoritmo Genérico (AG) por el autor Chan (Chan, 2016). El quinto método es una combinación de los factores de ponderación de los cuatro conjuntos de WF que componen los métodos antes mencionados. Este método como se dijo es el TMYPlus, que finalmente se aplica para seleccionar el TMM de nuestro archivo final meteorológico.

Para tener una comparación cuantitativa entre estos cinco perfiles, se calcularon los valores de error de desviación medio (MBE) y el error cuadrático medio (RMSE) para estos cinco TMYs contra el promedio de 11 años. En base a estos errores se seleccionó el conjunto óptimo de factores de ponderación para sus respectivos índices climáticos que componen el TMYPlus. Las definiciones de MBE y RMSE se expresan en las ecuaciones (4) y (5) respectivamente.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{12} (v_i - w_i)}{12} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (v_i - w_i)^2}{12}} \quad (5)$$

Donde:

v_i = valor medio mensual para TMY o TMY2 o IWEC o CHAN o TMYPlus.

w_i = valor medio mensual de la media a largo plazo de 11 años, $w_i = \frac{\sum_{j=1}^{11} v_i}{11}$

DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

Para caracterizar las condiciones meteorológicas típicas en la ciudad de Salta (Lat. -24.7°, Long. -65.5° y 1232 msnm), partimos de datos proporcionados por el SMN registrados en el período 2006-2016 en el Aeropuerto Internacional Martín Miguel de Güemes y por el Instituto de Investigaciones de Energía No Convencional (INENCO). Las variables registradas son: Radiación Solar Global Horizontal, Temperaturas de Bulbo Seco, de Punto de Rocío, Bulbo Húmedo, Dirección del Viento, Velocidad del Viento, Presión Atmosférica y Humedad Relativa. Normalmente, el intervalo entre los registros del SMN es de una hora, mientras que los datos de radiación fueron medidos cada 15 minutos y constan de al menos 11 años de datos. La medición de la radiación fue tomada con un piranómetro KIPP ZONEN CM3 por el investigador Ricardo Echazú del INENCO.

RESULTADOS

El procedimiento descrito en la sección anterior se repite para todos los demás meses del año, produciendo las Tabla 2.1 y Tabla 2.2.

ENE	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus	FEB	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0,0816		0,0552	0,0498	0,0495	0,0514	0,0499
2007	0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0,1303		0,0406	0,0340	0,0394	0,0401	0,0344
2008	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0,0917		0,0774	0,0761	0,0945	0,0860	0,0565
2009	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,1218		0,0667	0,0565	0,0714	0,0732	0,0787
2010	0,0878	0,0631	0,0813	0,0844	0,0672		0,0845	0,0820	0,1011	0,1012	0,0871
2011	0,0573	0,0441	0,0552	0,0628	0,0443		0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0675
2012	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0826		0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0,0723
2013	0,0521	0,0414	0,0528	0,0586	0,0413		0,0853	0,0700	0,0749	0,0753	0,0438
2014	0,0520	0,0483	0,0585	0,0560	0,0474		0,0581	0,0409	0,0614	0,0618	0,0487
2015	0,0617	0,0484	0,0605	0,0646	0,0496		0,0670	0,0439	0,0569	0,0567	0,0991
2016	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0652		0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0,0992
MAR						ABR					
2006	0,0520	0,0435	0,0537	0,0557	0,0442		0,0447	0,0329	0,0423	0,0430	0,0346
2007	0,0553	0,0508	0,0556	0,0516	0,0511		0,0489	0,0378	0,0476	0,0460	0,0395
2008	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0951		0,0928	0,0831	0,1017	0,0862	0,0834
2009	0,0893	0,0676	0,0854	0,0837	0,0695		0,0686	0,0626	0,0785	0,0788	0,0618
2010	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0887		0,1136	0,0914	0,1242	0,1104	0,0948
2011	0,1034	0,0810	0,1147	0,1188	0,0824		0,0586	0,0452	0,0615	0,0597	0,0472
2012	0,0492	0,0397	0,0464	0,0454	0,0401		0,0855	0,0604	0,0799	0,0773	0,0652
2013	0,0977	0,0924	0,1107	0,0996	0,0916		0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,1060
2014	0,1113	0,1042	0,1259	0,1134	0,1031		0,0890	0,0565	0,0811	0,0741	0,0641
2015	0,0773	0,0681	0,0836	0,0869	0,0675		0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0,0573
2016	0,0944	0,0780	0,1113	0,1085	0,0780		0,0687	0,0565	0,0713	0,0721	0,0546
MAY						JUN					
2006	0,0826	0,0598	0,0844	0,0832	0,0644		0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0945
2007	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0987		0,1387	0,0956	0,0989	0,1227	0,1051

2008	0,0720	0,0618	0,0727	0,0605	0,0630		0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0784
2009	0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,0898		0,0845	0,0820 2	0,1011	0,1012	0,0978
2010	0,0789	0,0832	0,0844	0,0720	0,0896		0,0708	0,0469	0,0989	0,0671	0,0518
2011	0,0449	0,0325	0,0443	0,0465	0,0341		0,0652	0,0448	0,0671	0,0608	0,0488
2012	0,0987	0,0874	0,0832	0,0878	0,1013		0,0689	0,0496	0,0608	0,0612	0,0511
2013	0,0671	0,0537	0,0672	0,0637	0,0557		0,0897	0,0789	0,0612	0,0789	0,0898
2014	0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0991		0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,0945
2015	0,0844	0,0720	0,0987	0,0987	0,0995		0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0,0898
2016	0,0832	0,0789	0,0844	0,0720	0,099		0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0965

TABLA 2.1: Índices WS para todos los meses de Enero-Junio de todos los años de la muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

JUL	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus	AGO	TMY	TMY2	IWEC	CHAN	TMYPlus
2006	0,0774	0,0761	0,0945	0,0860	0,0879		0,0881	0,0578	0,0805	0,0786	0,0643
2007	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0699		0,12655	0,0987	0,0987	0,0845	0,0897
2008	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,0987		0,0776	0,0575	0,0837	0,0792	0,0607
2009	0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0,0698		0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0,0987
2010	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0,0897		0,11106	0,0776	0,1060	0,1059	0,0789
2011	0,0684	0,0499	0,0586	0,0697	0,0518		0,0880	0,0633	0,0773	0,0767	0,0678
2012	0,0832	0,0789	0,0844	0,0720	0,0897		0,0890	0,0634	0,0744	0,0762	0,0691
2013	0,0774	0,0538	0,0782	0,0701	0,0584		0,0987	0,0789	0,0790	0,0897	0,0897
2014	0,0633	0,0440	0,0547	0,0554	0,0475		0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0887
2015	0,0875	0,0616	0,0790	0,0745	0,0678		0,1109	0,0789	0,0897	0,0987	0,0787
2016	0,0928	0,0831	0,1017	0,0862	0,0897		0,1103	0,1000	0,1228	0,1142	0,0987
SET						OCT					
2006	0,0655	0,0608	0,0602	0,0677	0,0606		0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0985
2007	0,0499	0,0433	0,0487	0,0528	0,0434		0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0635
2008	0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0987		0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0,0678
2009	0,0824	0,0635	0,0897	0,0950	0,0980		0,09486	0,0793	0,0756	0,0745	0,0835
2010	0,0653	0,0441	0,0581	0,0582	0,0483		0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,1039
2011	0,1179	0,0911	0,1284	0,1146	0,0987		0,0601	0,0489	0,0628	0,0631	0,0503
2012	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0889		0,0471	0,0370	0,0550	0,0537	0,0378
2013	0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0,0996		0,1387	0,0956	0,0989	0,1227	0,0958
2014	0,1103	0,1004	0,1228	0,1142	0,1036		0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,1102
2015	0,1113	0,1042	0,1259	0,1134	0,0997		0,1110	0,0776	0,1060	0,1059	0,0802
2016	0,0591	0,0427	0,0589	0,0591	0,0443		0,0460	0,0387	0,0595	0,0532	0,0382
NOV						DIC					
2006	0,0599	0,0419	0,0576	0,0546	0,0453		0,1109	0,0851	0,1254	0,1263	0,0789
2007	0,1489	0,1135	0,1336	0,1221	0,1036		0,0855	0,0666	0,0776	0,0915	0,0689
2008	0,0552	0,0413	0,0517	0,0520	0,0439		0,0853	0,0700	0,0749	0,0753	0,0698
2009	0,1195	0,0687	0,1015	0,0883	0,0689		0,0581	0,0409	0,0614	0,0618	0,0412
2010	0,1633	0,1186	0,1385	0,1177	0,0956		0,0674	0,0551	0,0600	0,0615	0,0577
2011	0,1191	0,0844	0,1177	0,1041	0,0896		0,0824	0,0738	0,0929	0,0933	0,0717
2012	0,1489	0,1135	0,1336	0,1222	0,0553		0,0855	0,0604	0,0799	0,0773	0,0612
2013	0,0620	0,0539	0,0550	0,0552	0,0539		0,1161	0,1055	0,1138	0,1081	0,1005

2014	0,0893	0,0676	0,0854	0,0837	0,0669		0,0890	0,0565	0,0811	0,0741	0,0552
2015	0,0968	0,0896	0,1114	0,1091	0,0986		0,0989	0,0987	0,0789	0,0879	0,0545
2016	0,1034	0,0810	0,1147	0,1188	0,0803		0,0348	0,0264	0,0345	0,0338	0,0275

TABLA 2.2: Índices WS para todos los meses de Julio-Diciembre de todos los años de la muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY.

Las mismas muestran los índices WS para todos los meses de todos los años de la muestra para los cinco diferentes tipos de generadores de TMY. Por cada mes, el año con menor WS (subrayado en la Tabla 2.1 y Tabla 2.2) resulta mes candidato a TMM. La Tabla 3 lista los valores de MBE y RMSE para todos los meses candidatos de los cinco métodos diferentes de generación de TMY comparados con la media de 11 años.

Finalmente, la Tabla 4 resume el TMY, concatenación de todos los TMM del método TMYPlus. Los resultados de la Tabla 2.1 y Tabla 2.2 muestran que los TMM coinciden en los meses de Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Julio, Noviembre y Diciembre para los cinco métodos empleados de generación de TMY. En los meses de Enero, Agosto y Octubre poseen coincidencias parejas de los TMM, mientras que los meses de Junio y Septiembre cuatro métodos tienen semejanza en la elección del TMM.

Los valores promedio mensuales de las cuatro variables climáticas principales, incluyendo la temperatura de bulbo seco, la temperatura del punto de rocío, la velocidad del viento y la radiación solar global sobre plano horizontal, se representaron en las Figs. 1 a 4 para comparar los datos derivados de seis casos diferentes (i) TMY, (ii) TMY2, (iii) IWEC, (iv) CHAN, (v) TMYPlus y (vi) el promedio de 11 años (2006-2016).

Finalmente la elección final de los TMM está limitada por el resultado del método TMYPlus, Tabla 4.

Índice Climático	TMY	TMY2, TMY3	IWEC	CHAN	TMYPLUS
Temp. bulbo seco					
MBE °C	0,093	0,037	0,168	0,101	0,042
RMSE °C	0,486	0,529	0,522	0,487	0,461
Temp. Punto de rocío					
MBE °C	-0,378	0,350	0,518	-0,306	0,403
RMSE °C	2,795	0,540	0,830	2,830	0,539
Velocidad del viento					
MBE Km/h	0,697	-0,205	-0,307	0,610	-0,178
RMSE Km/h	2,728	0,505	0,636	2,732	0,473
Radiación solar global total diaria sobre plano horizontal					
MBE MJ/m ²	0,322	0,376	0,218	0,235	-0,136
RMSE MJ/m ²	0,875	0,935	0,925	0,955	0,867
Humedad relativa					
MBE %	1,563	2,002	2,123	3,569	1,083
RMSE %	3,023	3,355	3,897	4,698	2,141

Tabla 3: MBE y RMSE de los cinco métodos de generación de año meteorológico típico TMY.

Se observa en Tabla 3 que en el método TMYPlus los valores de RMSE son los más bajos en los cinco índices climáticos, comparados con los métodos TMY1, TMY2, IWEC y CHAN. Para la radiación solar total sobre plano horizontal el método por TMY1 tiene un valor de RMSE 0,875 MJ/m² cercano al del TMYPlus cuyo valor es 0,867 MJ/m², mientras que el valor del método de CHAN es el más alto con 0,955 MJ/m². Para la temperatura de bulbo seco los valores de RMSE de los cinco métodos no difieren en gran medida pero el método TMYPlus tiene el menor RMSE con 0,461 °C. Los métodos TMY2 y TMYPlus para la temperatura de rocío tienen un valor RMSE de 0,540 °C y 0,539 °C

respectivamente, el método de CHAN es el más elevado con 2,830 °C (este valor alto se debe a que el autor CHAN opta por un factor de ponderación elevado para dicho índice climático). Para la velocidad del viento y la humedad relativa los valores de RMSE del método TMYPlus son los más inferiores.

TMM	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Años (2006-2016)	2013	2007	2012	2006	2011	2011	2014	2008	2007	2016	2008	2016

Tabla 4: Meses meteorológicos típicos seleccionados del TMYPlus.

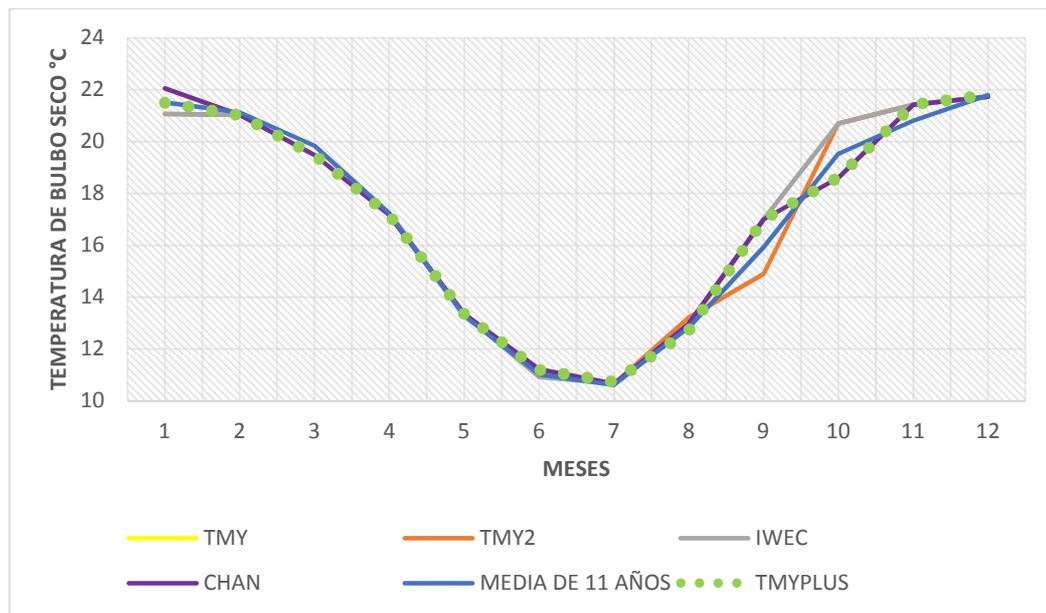


Fig. 1: Valores medios mensuales de la temperatura de bulbo seco.

Como se muestra en la Fig. 1, los perfiles mensuales de la temperatura media de bulbo seco de los cinco métodos están muy cerca del promedio de 11 años. La que mejor aproxima es la curva del TMYPlus, aunque la de CHAN es parecida pero el método TMY1 tiene menor MBE. Además, las variaciones mensuales de las dos TMY son casi idénticas excepto los datos de septiembre y octubre.

La Figura 2 muestra los valores medios mensuales de la radiación solar total diaria sobre plano horizontal, promediados sobre los cinco métodos de generación de TMY y sobre todos los años. El método que mejor aproxima la curva de promedios a largo plazo es la TMYPlus y de cerca le sigue el procedimiento del TMY1 o TMY cuya curva es de color amarillo. Como se nota en la curva los métodos de CHAN e IWEC son los más desviados de la media de 11 años.

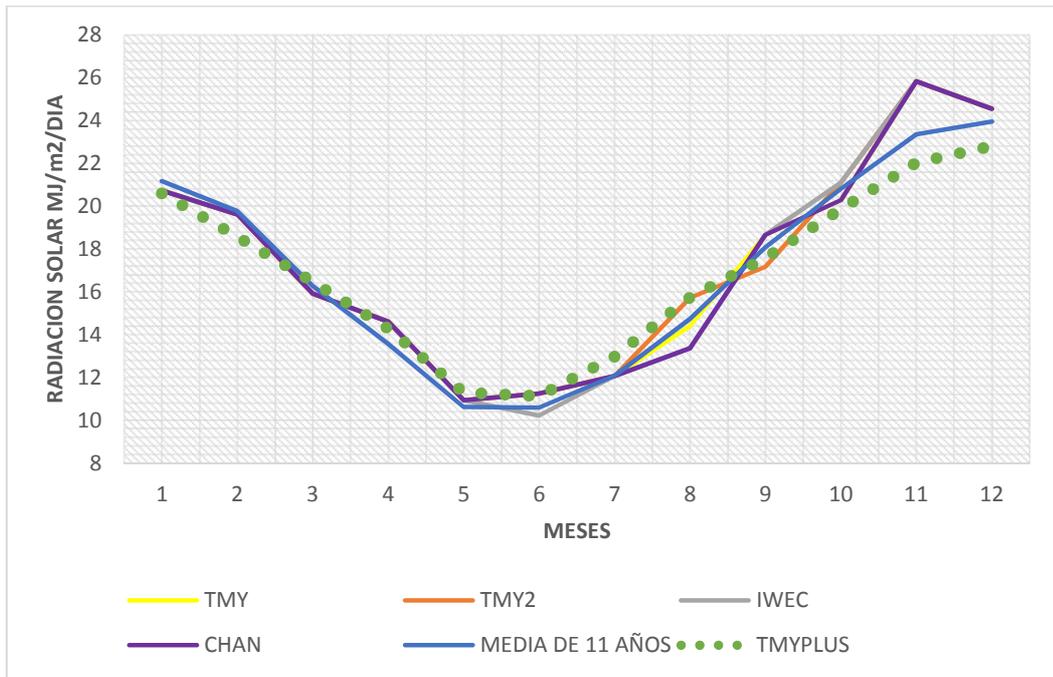


Fig. 2: Valores medios mensuales de la radiación solar total horizontal sobre plano horizontal.

La Fig. 3 presenta las curvas de la temperatura promedio mensual del punto de rocío para los cinco casos. El método TMYPlus tiene el mejor desempeño, mientras que el método CHAN tiene una desviación relativamente grande de la media a largo plazo. La desviación del método de CHAN con respecto a la media de 11 años se debe a que el factor de ponderación dado por CHAN para dicho índice climático es de un orden de magnitud menor que de los demás métodos.

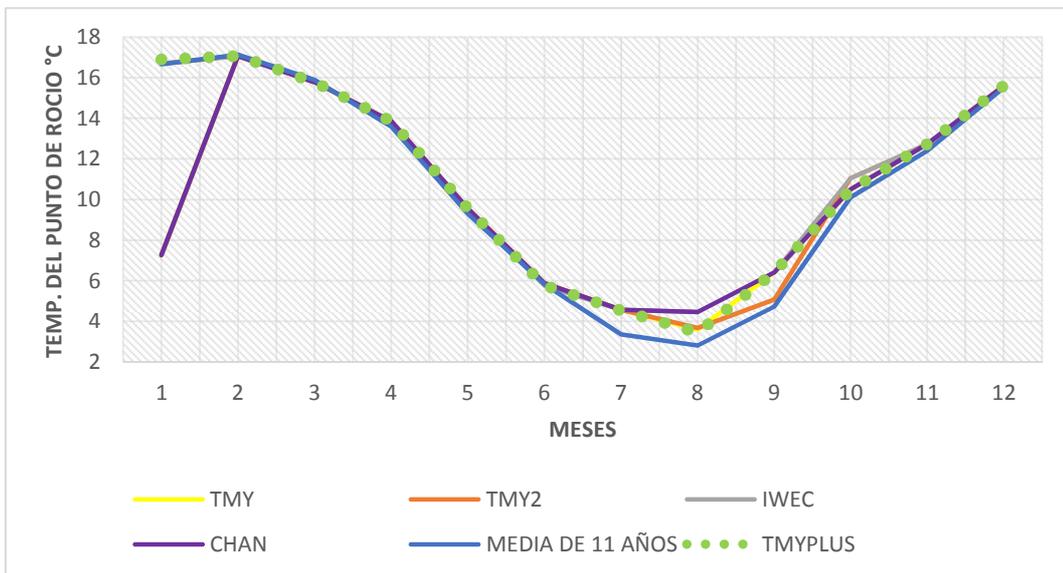


Fig.3: Valores medios mensuales de la temperatura del punto de rocío.

Los resultados de la velocidad del viento, se representan en la Figura 4. Los valores de RMSE oscilan entre los 0,473 Km/h en TMYPlus hasta los 2.73 Km/h para el método CHAN. No obstante, el TMYPlus presenta una mayor cercanía a la media a largo plazo que los cuatros métodos restantes. Como se nota en la curva de CHAN y de TMY1 para el mes de enero la desviación es el doble con respecto a la media 11 años, esta desviación se debe a que el archivo meteorológico obtenido de ambos método el TMM de enero corresponde al año 2014 mientras que los demás TMYs el TMM corresponden a enero 2013.

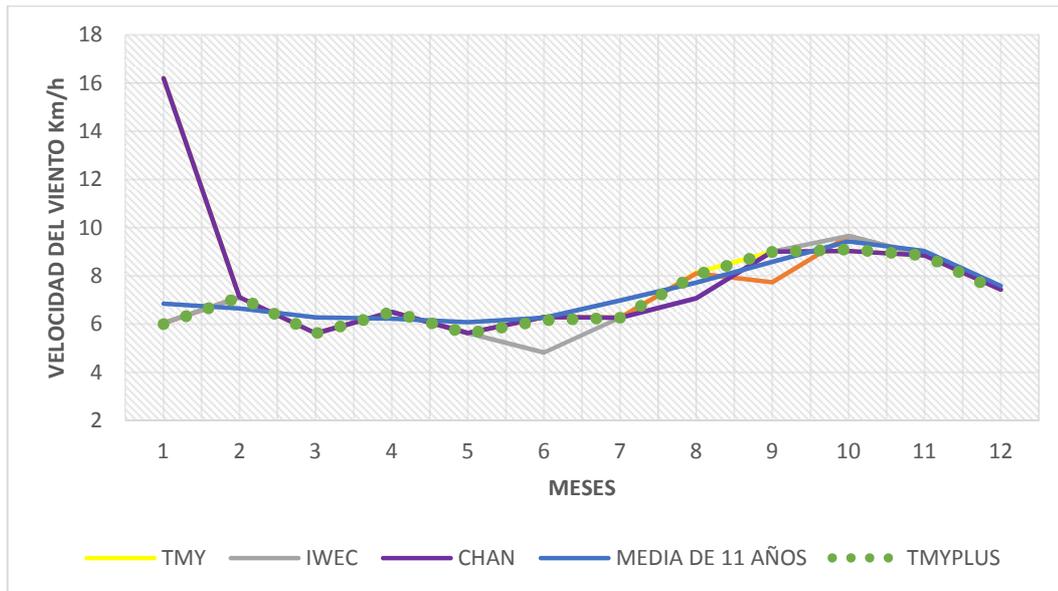


Fig.4: Valores horarios medios mensuales horarios de la velocidad del viento.

La figura 5 muestra las curvas del porcentaje de Humedad Relativa del metodo TMYPlus y de la media de 11 años. Los resultados arrojaron un RMSE de 2,14 % de humedad relativa, el más bajo de los cinco métodos.

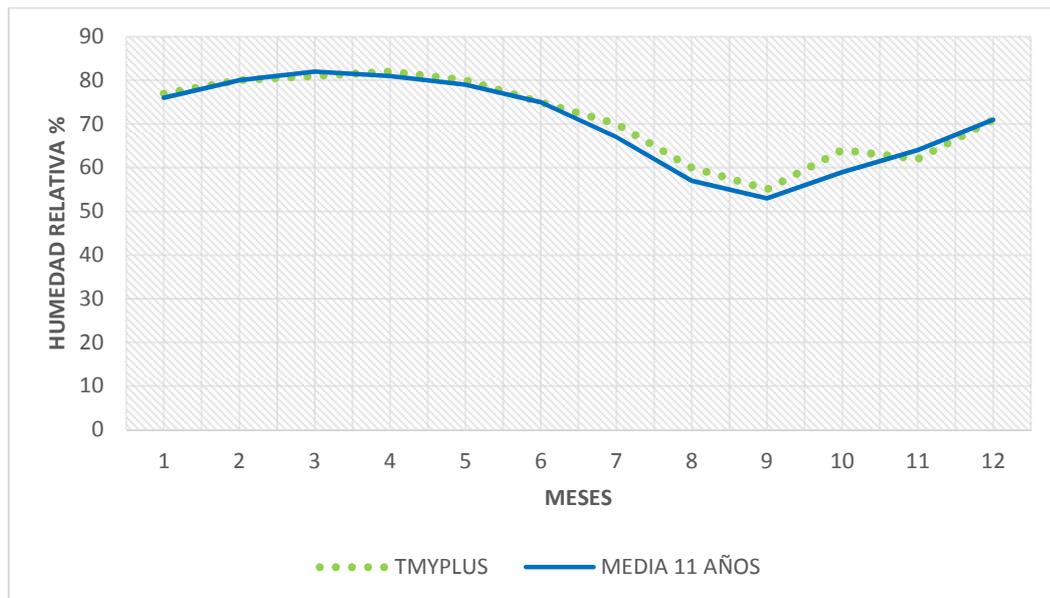


Fig. 5; Valores promedios mensuales del porcentaje de humedad relativa.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha generado el año meteorológico típico (TMY) de la ciudad de Salta con cinco conjuntos de diferentes factores de ponderación, antes inédito. Tal información resulta crucial para la precisión de los resultados en simulaciones computacionales de rendimiento energético de edificios, que es nuestro objetivo último.

Los resultados reflejaron que los métodos elegidos para diseñar el año meteorológico típico surge de la combinación de los métodos llamados TMY1, TMY2 y CHAN, dicho método se nombró TMYPlus. El método TMY1 se escogió para la elección del TMM para la variable meteorológica de temperatura de bulbo seco, mientras que el método TMY2 fue seleccionado para los TMMs de las variables meteorológicas de temperatura de punto de rocío y velocidad del viento. La radiación solar total diaria

sobre plano horizontal estuvo con su factor de ponderación correspondiente al método de CHAN. La combinación de todos estos factores de ponderación forma el TMYPlus.

En el camino, se han desarrollado códigos computacionales para la implementación de la metodología seguida para generar el TMY, que permitirán actualizar fácilmente los resultados a medida que contemos con nuevos datos experimentales. Gracias a este estudio, Salta es hoy la tercera ciudad argentina con TMY, después de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Santa Fe. Los códigos aquí desarrollados son directamente aplicables a cualquier otra localidad que cuente con un conjunto de datos meteorológicos suficientemente completo. Es nuestra intención aplicarlos al diseño de las viviendas sociales que producen los gobiernos provinciales, habilitando una modelización más precisa del comportamiento térmico de las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, que proveyó los datos meteorológicos registrados en el Aeropuerto Internacional Martín M. de Güemes de Salta Capital. Asimismo, agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y al Consejo de Investigación de la UNSa por el financiamiento de este trabajo de investigación.

Por último agradecen al investigador Ricardo Echazú del INENCO por los datos de radiación solar brindados.

BIBLIOGRAFIA

- ASHRAE, International Weather for Energy Calculations (IWEC Weather Files) User's Manual, Version 1.1, 2002.
- ASHRAE, Handbook Fundamentals, Chapter 24, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1989.
- 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 ASADES Vol. 18, pp.11.01-11.08, 2014, ISSN 2314-1433.
- Chan A., Generation of typical meteorological years using genetic algorithm for different energy systems, ELSEVIER Renewable Energy 90 (2016) 1e13.
- Dobos A., M. Kasberg, P. Gilman, P50/P90 analysis for solar energy systems using the system advisor model, in: 2012 World Renewable Energy Forum, Denver, Colorado, May 13-17, 2012.
- DOES, Reference Manual Part 2, Chapter VIII, National Technical Information Services, US Department of Commerce, 1980.
- Finkelstein J., R.E. Schafer, Improved goodness-of-fit tests, Biometrika 58 (1971) 641e645.
- Hall I., R.R. Prairie, H.E. Anderson, E.C. Boes, Generation of a typical meteorological year, in: Proceedings of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society, 1978, pp. 669e671.
- Hui C., Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong, PhD Thesis, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, 1996.
- Jiang Y., Generation of typical meteorological year for different climates of China, Energy 35 (2010) 1946e1953.
- Lovegrove K., W. Stein, Concentrating Solar Power Technology. Principles, Developments and Applications, Wood head publishing, 2012.
- Mandurino C., P. Vestrucci, Using meteorological data to model pollutant dispersion in the atmosphere, Environ. Model. Softw. 24 (2009) 270e278.
- Marion M., K. Urban, User's Manual for TMY2s Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base, National Renewable Energy Laboratory, 1995.

- Wilcox S., W. Marion, User's Manual for TMY3 Data Sets, Technical Report NREL/TP-581e43156, National Renewable Energy Laboratory, May 2008.
- Ohunakin O., M.S. Adaramola, O.M. Oyewola, R.O. Fagbenle, Generation of atypical meteorological year for northeast, Nigeria, *Appl. Energy* 112 (2013) 152e159.
- Rahman I., J. Dewsbury, Selection of typical weather data (test reference years) for Subang, Malaysia, *Build. Environ.* 42 (2007) 3636e3641.
- Yang H., Y. Li, L. Lu, R. Qi, First order multivariate Markov chain model for generating annual weather data for Hong Kong, *Energy Build.* 43 (2011) 2371e2377.

ABSTRACT

The definition of the typical meteorological year (TMY) is fundamental for the development of the climatic file used by the Building Energy Simulation codes. The TMY generation was performed with four different sets of weighting factors. This work is dedicated to the definition of TMY in the city of Salta (1232 msnm), to be applied in the design of social housing. It was based on data provided by the National Meteorological Service (SMN) of Argentina on various meteorological variables recorded in time intervals over 11 years (2006-2016) at the Martin M. de Güemes Airport, while the radiation data were provided By the Institute of Investigations of Non-Conventional Energy (INENCO). Based on statistical criteria, for each month of the year, one of all sample months is cataloged as TMM Typical Meteorological Month. The concatenation of the twelve TMMs defines the TMY

Keywords: Typical Meteorological Year, Salta city, Building Energy Simulation.