



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER  
EL GRADO ACADÉMICO DE  
INGENIERO EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO  
AMBIENTE

“COMPARACIÓN DE CINCO METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE LA  
EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA CUATRO LOCALIDADES DE LA PAMPA  
HÚMEDA Y SEMIÁRIDA ARGENTINA”.

Bono Rapp, Franco Daniel

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2014

## **PREFACIO**

Esta tesina es presentada como parte de los requisitos para optar el Grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa (Argentina), durante el período comprendido entre diciembre del 2013 a junio del 2014, bajo la dirección del Ing. Agr. Guillermo Casagrande y la codirección del Ing. Agr. Sergio Abascal.

Agradezco al Ing. Agr. Guillermo Casagrande y al Ing. Agr. Sergio Abascal por haberme brindado la oportunidad de trabajar junto a ellos, por sus correcciones, enseñanzas, conducción, presencia y ayuda continuas. A la Ing. Agr. Graciela Vergara y al Dr. Pablo Dornes por sus correcciones y sugerencias y su buena predisposición. A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNLPam, por la financiación otorgada; a Paola Abarca por su ayuda con las traducciones al Inglés; a Laura Belmonte (INTA Anguil), Lucas Butti (campo anexo INTA Chacharramendi), Marta Pérez (INTA General Villegas), Graciela Cazenave (INTA Castelar) y a todo el personal de estas Estaciones Experimentales de INTA por brindarnos los datos de los cuales nos valimos para realizar este trabajo y su colaboración incondicional en todo momento.

También quiero agradecer al personal de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa por su buena predisposición ante las reiteradas consultas e insistencias, así como a todas aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado para llevar adelante el presente trabajo.

Finalmente, a mi familia y amigos por apoyarme durante la realización de este proyecto.

Bono Rapp, Franco Daniel.

Junio del 2014

Departamento de Recursos Naturales  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Universidad Nacional de La Pampa

## RESUMEN

El proceso de Evapotranspiración (ET) constituye el medio de reingreso de la humedad a la atmósfera desde las plantas y el suelo. Esto lo torna como un factor clave a la hora de la administración del recurso agua, principalmente para regiones de llanuras como las Pampas Argentinas. La necesidad de una estimación precisa de la ET lleva a sopesar distintas metodologías de estimación. En este trabajo se comparó la dinámica de cuatro metodologías de estimación de ET (Priestley-Taylor <PT>, Hargreaves-Samani <Hg>, Turc <Tu> y Thornthwaite <Tw>) respecto al método estándar de FAO (Penman-Monteith <PM>), mediante el análisis de regresión lineal simple, para cuatro localidades de la Pampa Húmeda y Semiárida Argentina: Chacharramendi y Anguil, (La Pampa); General Villegas y Castelar (Buenos Aires). Los resultados obtenidos mensualmente, muestran que la metodología de Hg se presenta como la opción más viable para las localidades de Chacharramendi y Anguil (ambiente Semiárido y Subhúmedo respectivamente), mostrando también un buen comportamiento para la localidad de General Villegas (Subhúmedo/húmedo), mientras que PT mostró un buen ajuste respecto a PM para Castelar (ambiente Húmedo). Los resultados obtenidos por las metodologías de Tu y Tw si bien presentan un buen ajuste ( $r > 0.88$ ), el sesgo entre sus resultados y el estándar es muy grande para todas las localidades, siendo Tw el método con peor ajuste respecto a PM de los métodos evaluados.

Palabras claves: Evapotranspiración, Pampa Argentina, Metodologías, Penman-Monteith

## **ABSTRACT**

The process of evapotranspiration (ET) is the means of re-entring of moisture into the atmosphere from plants and soil. It is a key factor in the management of water resources, especially for regions like the Pampas Argentine plains. Accurate estimation of ET leads to the necessity to weigh different methodologies as regards estimation, some more appropriate than others. The dynamics of four methodologies for estimating ET (Priestley-Taylor <PT>, Hargreaves-Samani <Hg>, Thornthwaite <Tw> and Turc <Tu>) compared to the standard method of FAO (Penman-Monteith <PM>) by a simple lineal regression analysis of four locations in the Humid and Semiarid Argentine Pampas: Chacharramendi and Anguil, (La Pampa); General Villegas and Castelar (Buenos Aires). Monthly results show that the methodology Hg presented as the most viable option for Chacharramendi and Anguil localities (Semi-arid and sub-humid environment respectively), which also performs appropriately in General Villegas town (Semi wet to wet), while PT showed a good adjustment as regards PM in Castelar (Humid environment). Although the results obtained by the Tu and Tw methodologies show a good adjustment ( $r > 0.88$ ), the bias between their results and the standard is very large for all locations, Tw being the worst method of adjusting the PM evaluated methods.

Keywords: Evapotranspiration, Pampa Argentine, Methodologies, Penman-Monteith.

## ÍNDICE

Introducción	5
Hipótesis	9
Objetivos	9
➤ Objetivos generales	9
➤ Objetivos específicos	9
Materiales & Métodos	10
➤ Área de estudio	10
➤ Metodologías	12
○ Penman-Monteith	12
○ Turc	16
○ Hargreaves-Samani	16
○ Thornthwaite	16
○ Priestley-Taylor	17
Resultados y Discusión	18
Conclusiones	26
Bibliografía	28
Anexo I	32
Anexo II	36

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos, fibras e insumos básicos para mantener una población en incremento continuo, aumenta la presión de la agricultura sobre los recursos naturales, entre ellos el agua y el suelo (FAO, 2002). Este escenario exige maximizar la eficiencia productiva abordando en mayor medida factores técnicos y de información, e incorporando estas herramientas a estrategias generales y al manejo estructural respecto al recurso en cuestión (Carreño & Viglizzo, 2007; Seiler, 2007).

La eficiencia en la utilización del recurso agua en los sistemas productivos, se torna clave para abordar un manejo óptimo. Estos sistemas basan su accionar en diversos procesos, entre los cuales se enclava la Evapotranspiración en el continuo suelo-planta-atmósfera. (Hillel, 1990)

El proceso de Evapotranspiración (ET) es un concepto que se compone de la suma de dos procesos simultáneos e interrelacionados: la Evaporación y la Transpiración. El primero de ellos ocurre cuando el agua retorna a la atmósfera desde superficies libres, como podrían ser el suelo o superficies cubiertas de agua; mientras que el segundo hace referencia al agua liberada a la atmósfera a través de los estomas vegetales (Allen et al., 2006; Chow et al., 1994). El fenómeno de ET se ve regulado por las condiciones meteorológicas así como por las características fisonómicas y fisiológicas de la vegetación (Allen et al., 2006), y constituye un factor que puede ser previsto y/o manejado con gran precisión (Pántano et al., 2013).

La ET resalta su importancia por tratarse del medio de reingreso de humedad a la atmósfera, siendo en regiones de llanuras la principal pérdida de agua del sistema suelo en capacidad de campo. Esto se debe a la escasa o nula pendiente en el relieve, derivando en una pequeña o ausente movilidad lateral del fluido; siendo inexistente, por lo general, canales de desagüe definidos (Usunoff et al., 1999). Según Domingo et al. (2003), en promedio éste proceso podría devolver a la atmósfera el 57% del total de agua precipitada, alcanzando el 90 a 100% en ambientes áridos y semiáridos.

En sistemas agrícolas con producción en secano, además de los factores edáficos y climáticos, el manejo hídrico es crucial a la hora de desarrollar la producción (Farahani et

al., 2007; García-Tejero, 2011; Nuñez et al., 2007). El escaso desarrollo de una agricultura de regadío y el establecimiento de un paradigma de agricultura de secano en la Pampa Húmeda y Semiárida Argentina, obliga a tener un claro desempeño del agua en el suelo, y una concepción de ésta como recurso limitante y estratégico para los cultivos (Bormann, 2011; Ferrelli, 2012; Gonzales & Nuñez, 2007).

La precipitación, como factor clave para el aprovechamiento agrícola bajo producción de secano, presenta una estocasticidad propia, tanto anual como interanual para toda la región, lo cual dificulta su óptimo aprovechamiento (Casagrande et al, 2006; Pántano & Penalba, 2012). Esta variabilidad en cantidad y frecuencia de las precipitaciones, así como las proyecciones climáticas para las décadas futuras en la región, obliga a tener un cuidadoso control del balance de agua en el suelo y su consecuente disponibilidad para la producción agrícola-ganadera. (De la Casa & Moore, 2008; Gonzales & Nuñez, 2007).

Prácticas como el barbecho permiten almacenar agua en el perfil edáfico previo al ciclo productivo de cada cultivo (Brizuela et al., 2010; Miranda, 2010). Estas prácticas, cruciales para el manejo del cultivo, si bien están establecidas en la región y son conocidas por los productores, necesitan un preciso balance hídrico del agua almacenada (Quiroga et al., 2005, Ratto, 2000). Este balance muchas veces se basa solo en aproximaciones y/o costumbres del productor.

Por su parte, la correcta determinación del agua disponible para el cultivo en el perfil solo será posible mediante una estimación lo más precisa posible del agua perdida a la atmósfera en forma de ET. Una medición directa de la ET (mediante lisímetros, tanques evaporímetros, etcétera), podría implicar acumulación de errores en los datos (producto de la observación y el método) y altos costos de recursos. Asimismo esos datos solo serían útiles para la localidad de estudio, imposibilitando su extrapolación a otras localidades. (Sánchez Martínez, M., 2001)

Distintas metodologías de base empírica y/o teórica explican, en mayor o menor medida, la dinámica del proceso de ET en el sistema. El caso de una metodología de base teórica, es la propuesta como estándar por la “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” (FAO), en su publicación número 56 “Evapotranspiración del cultivo”, donde se presenta una adaptación de la metodología de Penman – Monteith

(PM), la cual según el panel de expertos reunidos por este organismo, es la metodología que mejor explica el fenómeno bajo cualquier escenario posible. Jensen et al. (1990) llegan a la misma conclusión.

Si bien se trata de una opción robusta, la demanda de datos y parámetros necesarios para estimar ETo bajo PM dificultan su aplicación en regiones donde, ya sea por cuestiones económicas y/o logísticas, no se posee una adecuada red de estaciones meteorológicas así como tampoco una gran diversidad de parámetros monitoreados (Allen et al., 2011; Almorox, 2012; ASCE, 2000; Bochetti Vladilo M., 2010; Bracho & Puche, 2004; Droogers & Allen, 2002).

Otros tipos de metodologías de base empírica desarrolladas para distintos tipos de ambientes, utilizan principalmente relaciones entre parámetros y comportamientos estudiados de variables climáticas puntuales (como temperatura, humedad relativa y/o radiación por caso), arrojando datos confiables para dichos ambientes. Tal es el caso de las metodologías: Hargreaves & Samani (1982), Turc (1961), Priestley & Taylor (1971) y el método Thornthwaite (1948). Estas metodologías poseen, por lo general, una menor diversidad de variables a incorporar, tornándolas muchas veces como la única opción factible a la hora de abordar la cuantificación de la ET.

Distintos autores han estudiado la dinámica de algunas de estas metodologías bajo diferentes circunstancias (Bracho & Puche, 2004; Ocampo et al., 2009; Bochetti Vladilo, 2010; Rosenberry et al., 2007; Sun et al., 2005; Temesgen et al., 2005). Estos autores concuerdan en la necesidad de calibrar y validar las distintas metodologías a utilizar para las diferentes zonas del país.

Ocampo & Rivas (2010) han analizado el desempeño de tres metodologías para la transición ambientes Húmedos, Semiáridos y Áridos sobre la base de comparación respecto a un ambiente húmedo. Sin embargo estos autores no consideraron la dinámica de un ambiente árido mediterráneo, siendo los resultados no aplicables para locaciones continentales. Asimismo la necesidad de una calibración local para cada región, dificulta la posibilidad de aplicar dichos resultados en otras localidades.



En este trabajo se compararon el comportamiento de cuatro metodologías de estimación de la ET (Hargreaves-Samani –Hg-, Turc –Tu-, Priestley -Taylor –PT- y Thornthwaite –Tw-) respecto al método estándar de la FAO Penman-Monteith (PM), dentro de la Pampa húmeda Argentina para tres tipos de ambientes (diferenciados según el índice de Aridez de De Martonne): Húmedo, subhúmedo y semiárido mediterráneo. Se consideraron para esto las localidades de Castelar, General Villegas (Provincia de Buenos Aires), Anguil y Chacharramendi (Provincia de La Pampa), estudiadas bajo el periodo 2006-2013.

## **HIPÓTESIS**

Ciertas metodologías empíricas se ajustarán mejor a uno u otro tipo de ambiente según el sitio original donde fueron desarrolladas y calibradas

- Hargreaves ajustará mejor respecto al método de referencia para ambientes semiáridos/áridos.
- Turc ajustará mejor a las localidades de Castelar y General Villegas, debido a la mayor humedad relativa diaria de éstas locaciones.
- Thornthwaite presentará mayor ajuste para ambientes tipo pradera templada, como por ejemplo General Villegas, Castelar y/o Anguil.

Aquellas metodologías que utilicen mayor variedad de parámetros explicarán mejor la dinámica de la Evapotranspiración que aquellos basados en uno solo de ellos.

Habrà una variabilidad en las estimaciones con una misma metodología tanto espacial como estacional

## **OBJETIVOS**

### ***Objetivo general:***

Determinar de entre las opciones seleccionadas el método de estimación de la ET más adecuado para cada una de las localidades estudiadas (método de menor requerimientos de datos y de mayor ajuste respecto Penman-Monteith)

### ***Objetivos específicos:***

1. Estimar para cada una de las localidades la ET media mensual para el periodo 2006 – 2013
2. Evaluar el desempeño de las distintas metodologías bajo las condiciones ambientales imperantes en cada localización y a lo largo del año para cada una de las opciones testeadas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### Área de estudio:

Éste trabajo se desarrolló sobre cuatro localidades climáticamente diferentes en base al Índice de Aridez de De Martonne (IADm) (Mercado-Mansera et al., 2010), según los datos de la plataforma *Visor GeoINTA*. Los datos climáticos se obtuvieron de cuatro estaciones experimentales del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) localizados en las localidades de Chacharramendi y Anguil (Provincia de La Pampa), General Villegas y Castelar (Provincia de Buenos Aires). (Tabla 1)

El área de estudio está inserta en una matriz agrícola-ganadera, netamente dominada por la agricultura en secano, principalmente de cultivos anuales (cereales y oleaginosas). Más al oeste, la actividad dominante es la pecuaria (ganadería de cría, re cría e invernada), caracterizada por el aprovechamiento de pasturas naturales y verdes, y la producción forestal en menor medida (Figura 1).

Los suelos en el área de estudio comprenden los órdenes Molisoles y Entisoles en la porción occidental (Chacharramendi) acentuándose la presencia de Molisoles bien desarrollados hacia el este. Sobre el margen oriental del área de estudio se registran también Alfisoles y Vertisoles (Castelar). Por lo general los perfiles presentan un buen desarrollo en profundidad, Apareciendo afloramientos petrocálcicos (tosca) en ciertas zonas, principalmente en la porción occidental (Conti, et al., 2000; Moscatelli 1991; Panigatti, 2010).

El clima en la región es templado, con temperaturas medias promedio que oscilan entre los 15 °C al oeste y los 17°C al este. El régimen hídrico imperante es netamente arídico al oeste tornándose ústico a údico en la zona meridional derivando en un régimen ácuico en el extremo oriental. (Cano et al., 1980; Panigatti, 2010; Bianchi, 2013).

El relieve se presenta como una meseta ondulada en todo el área de estudio, con pendientes que rara vez exceden los 3° (> a 1° por lo general) de inclinación y escaso o ningún drenaje superficial (Usunoff et al., 1999; Cano et al., 1980)

Tabla 1: Características de las localidades analizadas. Fuente: Visor GeoINTA ([www.geointa.inta.gov.ar](http://www.geointa.inta.gov.ar))

Localidad	Lat.	Long.	Ppm (mm)	T (°C)	Msnm	IADm. (INTA)	URLS estación INTA
Chacharramendi	-37.33	-65.65	450	13-14	287	Semiárido	<a href="http://inta.gob.ar/unidades/821009">http://inta.gob.ar/unidades/821009</a>
Anguil	-36.52	-64.00	750	14-15	152	Subhúmedo	<a href="http://inta.gob.ar/unidades/821000">http://inta.gob.ar/unidades/821000</a>
General Villegas	-35.03	-62.99	950	14-15	105	Húmedo	<a href="http://inta.gob.ar/unidades/713000">http://inta.gob.ar/unidades/713000</a>
Castelar	-34.66	-58.65	1050	15-16	28	Húmedo	<a href="http://inta.gob.ar/unidades/201000">http://inta.gob.ar/unidades/201000</a>

Se utilizaron datos de: temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales (°C), humedad relativa media (%), velocidad de viento (m/s) (a dos metros en m/s), radiación incidente neta media (Mj/m<sup>2</sup>), precipitación (mm) y presión atmosférica (hPa); así como parámetros propios de la localización de las estaciones meteorológicas como: Latitud, Longitud y Elevación sobre el nivel medio del mar. Dichos datos provinieron de una estación meteorológica automática “Davis® Vantage PRO” (Chacharramendi), Estaciones meteorológicas convencionales del Instituto de Clima y Agua INTA (Castelar) y estación experimental INTA Anguil; y por último estación automática SIAP estándar (General Villegas), pertenecientes a estaciones experimentales del INTA, correspondientes al periodo 2006-2013 para cada una de las cuatro localidades. Un resumen mensual de los datos meteorológicos de las distintas estaciones, así como los valores de ETo mensual promedio según PM, se muestran para cada una de las localidades en el Anexo I.

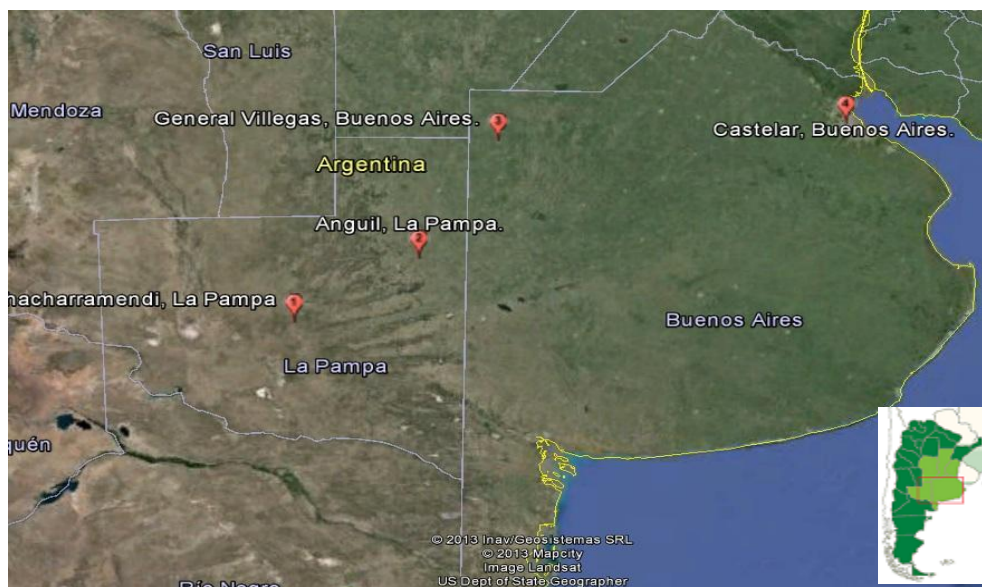


Fig. 1: Localización del área de estudio. En íconos rojos las distintas localidades estudiadas. (Fuente: Google Earth 2014™)

### Metodologías:

Los cálculos de estimación de Evapotranspiración potencial (ETp) y/o de referencia (ETo) según el caso, fueron obtenidos de manera mensual para todas las localidades y bajo todos los métodos. Como método de referencia se utilizó la propuesta como estándar por FAO, Penman-Monteith.

Si bien la metodología de Penman-Monteith permite el cálculo de periodos horario, diario o decadiario; su desempeño con datos mensuales presenta un buen comportamiento según muestra Allen et al. (1998), siendo mejor su dinámica que otras metodologías presentadas.

#### a) PM - Penman-Monteith (tomado de Allen et al, 2006).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

#### Donde:

**ET<sub>o</sub>**: es la evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>),

**R<sub>n</sub>**: es la radiación neta (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),

**G**: es el flujo de calor en el suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),

**T**: es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C),

**u<sub>2</sub>**: es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>),

**e<sub>s</sub>**: es la presión de vapor de saturación (kPa),

**e<sub>a</sub>**: es la presión real de vapor (KPa),

**(e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>)**: es el déficit de presión de vapor (KPa),

**Δ**: es la pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C<sup>-1</sup>),

**γ**: es la constante psicrométrica (KPa °C<sup>-1</sup>),

**0,408**: es un factor de conversión a mm día<sup>-1</sup>,

**273**: es un factor de conversión para expresar la temperatura en K,

**900**: es un coeficiente para el cultivo de referencia (Kg K kJ<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>),

**0,34**: es un coeficiente resultante de asumir una resistencia de cultivo de 70 s m<sup>-1</sup> y una resistencia aerodinámica de 208/U<sub>2</sub> para el cultivo de referencia (s m<sup>-1</sup>).

Los parámetros específicos considerados para el modelo Penman-Monteith que no son medidos en las estaciones climáticas automáticas del INTA, fueron obtenidos de las tablas del anexo II y/o estimados siguiendo las indicaciones propuestas por Allen et al. (2006), como se detallan a continuación:

El flujo del calor del suelo (G) se estimó para periodos mensuales según:

$$G = 0,07 * ((Ti + 1) - (Ti - 1))$$

Donde:

**G:** flujo de calor del suelo (Mj/m<sup>2</sup>día)

**Ti:** la temperatura media mensual para el mes "i" (°C)

**0,07:** Coeficiente de ajuste a periodo mensual

La radiación neta de onda larga se estimó según:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)$$

Donde:

**R<sub>nl</sub>:** Radiación Neta de onda larga (Mj/m<sup>2</sup>día)

**σ:** Constante de Stefan-Boltzmann [ 4,903 x 10<sup>-9</sup> MJ/ K<sup>4</sup> m<sup>2</sup>día ]

**T<sub>máx K</sub>:** Temperatura máxima absoluta en el periodo (°K)

**T<sub>mín K</sub>:** Temperatura mínima absoluta en el periodo (°K)

**e<sub>a</sub>:** Presión de Vapor Real (kPa)

**R<sub>s</sub>/R<sub>so</sub>:** Radiación relativa de onda corta (≤1)

**R<sub>s</sub>:** Radiación solar medida (MJ/m<sup>2</sup>día)

**R<sub>so</sub>:** radiación en un día despejado n/N=1 (MJ m<sup>2</sup>día)

La radiación solar para un día despejado (R<sub>so</sub>) Se estimó mediante la siguiente:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

Donde:

**R<sub>a</sub>:** Radiación extraterrestre (Mj/m<sup>2</sup>día)

**z:** Altura sobre el mar (m)

La radiación Neta de onda corta se calculó según:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

Donde:

**R<sub>ns</sub>:** Radiación neta de onda corta (Mj/m<sup>2</sup>día)

**R<sub>s</sub>:** radiación solar entrante (Mj/m<sup>2</sup>día)

**α:** Albedo (se utilizó un albedo de 0,23 correspondiente al cultivo hipotético de referencia propuesto por FAO)

La presión atmosférica medida en cada localidad se cotejó con la ecuación de estimación de presión atmosférica propuesta por Allen et al. (2006). Comprobada su correlación local elevada ( $R^2 > 97\%$ ), se estimó con ella este dato en aquellos años en los que no se contaba con él (Localidad Chacharramendi, año 2009). Se recurrió a la estimación local dado que la bibliografía recomienda esto, debido al posible error producto de la extrapolación, así como por el acusado efecto que éste parámetro tiene en regular la ETo. Se estimó bajo una temperatura estándar de 20 °C.

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$$

Donde:

P: presión atmosférica (kPa)

z: Elevación sobre el nivel del mar (m)

Cuando no se contó con la velocidad del viento a dos metros sobre la superficie ( $U_2$ ), se utilizó la siguiente ecuación para calcular la velocidad a esta altura a partir de la medición a otra altura:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)}$$

Donde:

$U_2$ : Viento medido a dos metros sobre la superficie (m/s)

$U_z$ : Viento medido a z metros sobre la superficie (m/s)

Z: altura de medición sobre la superficie (m)

La pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ( $\Delta$ ) se calculó según:

$$\Delta = \frac{4098 * \left[ 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2}$$

Donde:

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (kPa/°C)

T: Temperatura del aire (°C)

La presión real de vapor ( $e_a$ ) se estimó en función de la humedad relativa media, según:

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} e^{\circ}(T_{media})$$

Donde:

$e_a$ : Presión real de vapor de agua (kPa)

$HR_{media}$ : Humedad relativa media del periodo (%)

$e^{\circ}(T_{media})$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura media (kPa)

La presión de saturación de vapor a la temperatura “T” ( $e^{\circ}(T)$ ) se calculó según:

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp\left[\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right]$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire “T” (kPa)

**T**: Temperatura (°C)

Para el cálculo de la Presión media de saturación de vapor ( $e_s$ ), al tratarse de periodos mensuales, se optó por el cálculo en función de las temperaturas máximas y mínimas, según:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T \text{ max}) + e^{\circ}(T \text{ min})}{2}$$

Donde:

$e_s$ : Presión media de saturación de vapor (kPa)

$e^{\circ}(T_{\text{máx}})$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire máxima media del periodo (kPa)

$e^{\circ}(T_{\text{mín}})$ : Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire mínima media del periodo (kPa)



b)  $T_u - T_{urc}$  (tomado de Shahidian et al. 2012)

$$ETp = 0,01333 \left( \frac{T_i}{T_i + 15} \right) (23,8845Rs + 50)$$

*Si RH < 50% se multiplica ETp por el termino  $\left( 1 + \frac{50 - RH}{70} \right)$*

Donde:

**Ti:** Temperatura media mensual (°C)

**RH:** Humedad Relativa (%)

**Rs:** Radiación solar global (en Mj/m<sup>2</sup>/día)

c)  $H_g - H_{argreaves-Samani}$  (Tomado de Samani, Z., 2000)

$$ETo = 0,0135(Kt)(Ra)(Td)^{\frac{1}{2}}(Tm + 17,8)$$

Donde:

**Kt:** coeficiente empírico de ajuste (propuestos 0,162 para áreas “interiores” y 0,19 para regiones “costeras”)

**Ra:** Radiación astronómica (mm/día)

**Td:** diferencia de temperatura (Tmáx-Tmín en °C)

**Tm:** Temperatura media diaria (°C)

d)  $T_w - T_{hornthwaite}$  (Tomado de Shahidian et al., 2012)

$$ETP = ETPsc \left( \frac{N}{12} \right) \left( \frac{dm}{30} \right)$$

$$ETPsc = 16 \left( \frac{10Tm}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left( \left( \frac{Tm}{5} \right)^{1,514} \right)$$

$$a = 0,49239 + 1792x10^{-5}I - 771x10^{-7}I^2 + 675x10^{-9}I^3$$

Donde:

**ETP=** Evapotranspiración mensual corregida (mm mes<sup>-1</sup>)

**ETPsc=** Evapotranspiración potencial sin corregir (mm mes<sup>-1</sup>)

**Tm:** Temperatura media mensual (°C)

**N:** máximo de horas de sol hipotéticos en función de la latitud y el mes

**dm:** Número de días en el mes “m”

**Tm:** Temperatura media mensual del mes “m” (°C)

e) **Priestley- Taylor** (tomado de Priestley & Taylor 1972)

$$\lambda ET_0 = \frac{\alpha}{\lambda} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (Rn - G)$$

Donde:

**ET<sub>0</sub>**: es la Evapotranspiración de Referencia (mmdía<sup>-1</sup>),

**Rn**: es la Radiación Neta (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>),

**G**: es el flujo de calor al suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día),

**α**: Coeficiente empírico adimensional (se consideró 1,26 para “zonas húmedas” –Castelar, Gral Villegas y Anguil-, y 1,74 para zonas áridas –Chacharramendi-)

**Δ**: es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa° C<sup>-1</sup>)

**γ**: es la constante de psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

**λ**: es el calor latente de vaporización (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>)

La asociación entre las variables se estudió mediante una Regresión Lineal Simple (RLS) entre las distintas metodologías (T, Hg, Tw, PT) respecto al método de referencia (FAO 56). Para analizar la correlación entre los resultados de los diferentes métodos, se utilizó el Coeficiente de Pearson (r) por ser ambas variables cuantitativas; y posteriormente el Coeficiente de Determinación (R<sup>2</sup>) basado en el anterior coeficiente para una regresión lineal simple.

Asimismo se analizó la Desviación Media del Error (MBE [+1; -1]), la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RSEM [+/-]) y el Error Relativo (e [0; 1]); los cuales nos permiten conocer la precisión del modelo, siendo más acertado cuanto más próximo sean al “0”.

Estas metodologías permiten una rápida interpretación de la asociación entre las variables estableciendo un valor probabilístico. Todas las variables analizadas cumplieron con la condición de independencia, normalidad y varianza constante de los errores.

$$MBE = \sum_{i=1}^N (O_i - E_i) / N$$

$$RSEM = \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2 / N}$$

$$e = (O_i - E_i) / O_i$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según los datos arrojado por PM, la evapotranspiración de referencia en la localidad de Chacharramendi alcanzó los 1452 mm ETo/año en promedio, llegando a tasas máximas de 7,4 mm ETo/día en diciembre y mínimas de 1,3 mm ETo/día para junio. En Anguil, la ETo promedio escaló a los 1284 mm/año, con tasas máximas de 6,2 mm/día en diciembre y mínimas de 1,3 mm/día en junio. En General Villegas se evidenció el mismo comportamiento, con valores promedio de 1332 mm ETo/año, siendo la tasa máxima y mínima de 5,66 mm/día en diciembre, y 1,5 mm/día en junio. En Castelar este patrón anual cambió, con un promedio de 1025 mm ETo/año, siendo el mes con máxima ET promedio registrada 5,55 mm/día en enero y el de mínima junio con 0,73 mm/día.

Las rectas de ajuste producto de la regresión lineal simple entre los resultados de las distintas metodologías con respecto a los obtenidos por FAO 56, se muestran para cada una de las localidades en las figuras 2a, 2b, 2c y 2d. Las figuras 3a, 3b, 3c y 3d, muestran la marcha anual de la ETo para el año promedio del periodo 2006-2013 en cada una de las localidades y según cada una de las metodologías evaluadas. Los parámetros estadísticos obtenidos en los análisis de los datos se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Estadísticos obtenidos del análisis de la correlación entre las distintas metodologías aplicadas y el método e referencia FAO-56 para cada una de las localidades estudiadas.

Est.	Chacharramendi					Anguil					General Villegas					Castelar				
	r	R <sup>2</sup>	MBE	RMSE	e (%)	r	R <sup>2</sup>	MBE	RMSE	e (%)	r	R <sup>2</sup>	MBE	RMSE	e (%)	r	R <sup>2</sup>	MBE	RMSE	e (%)
Tu	0,979	0,959	-0,051	24,73	0,143	0,939	0,881	0,69	28,18	0,185	0,944	0,892	0,44	28,55	0,195	0,977	0,954	0,43	22,43	0,404
Hg	0,991	0,982	0,086	8,85	0,066	0,969	0,938	-0,17	15,10	0,114	0,951	0,905	-0,85	16,76	0,126	0,982	0,964	-0,58	18,75	0,34
Pt	0,977	0,954	0,224	29,13	0,195	0,960	0,921	0,35	24,83	0,252	0,926	0,858	0,32	22,35	0,185	0,978	0,956	0,17	13,26	0,17
Tw	0,973	0,946	0,181	54,42	0,456	0,923	0,852	0,46	45,74	0,424	0,887	0,786	0,32	47,27	0,413	0,949	0,900	0,13	22,90	0,206

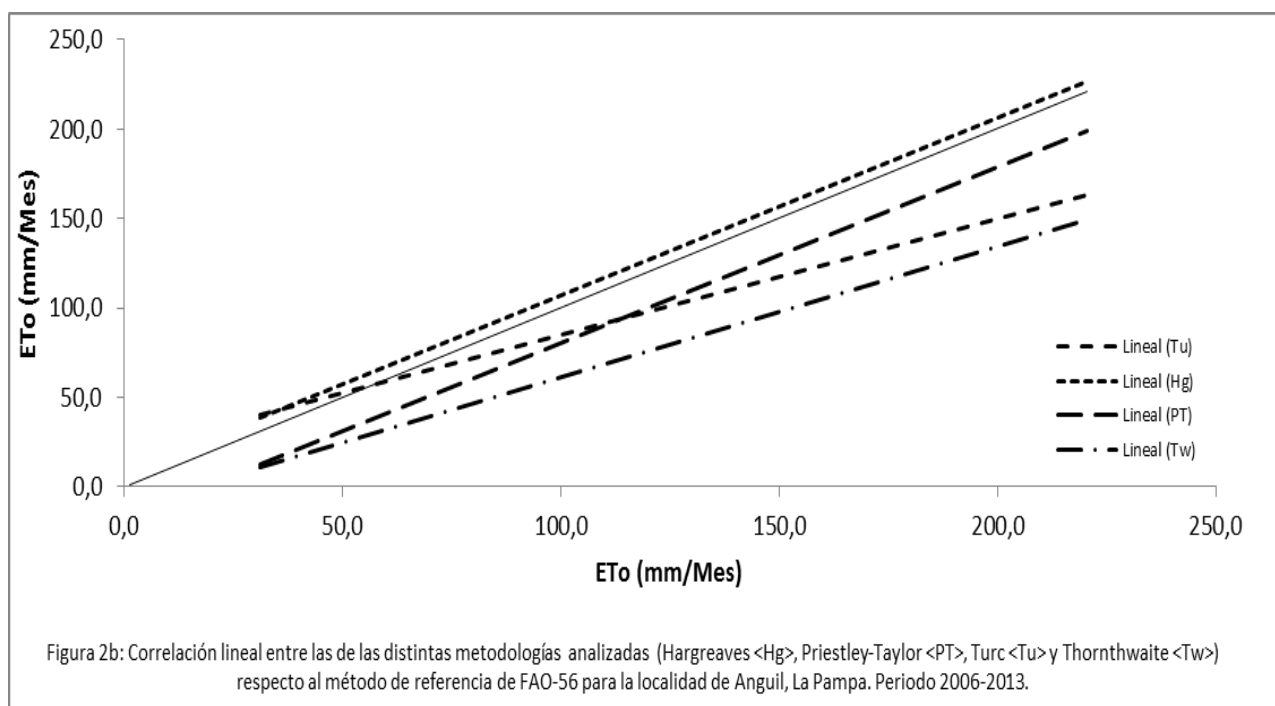
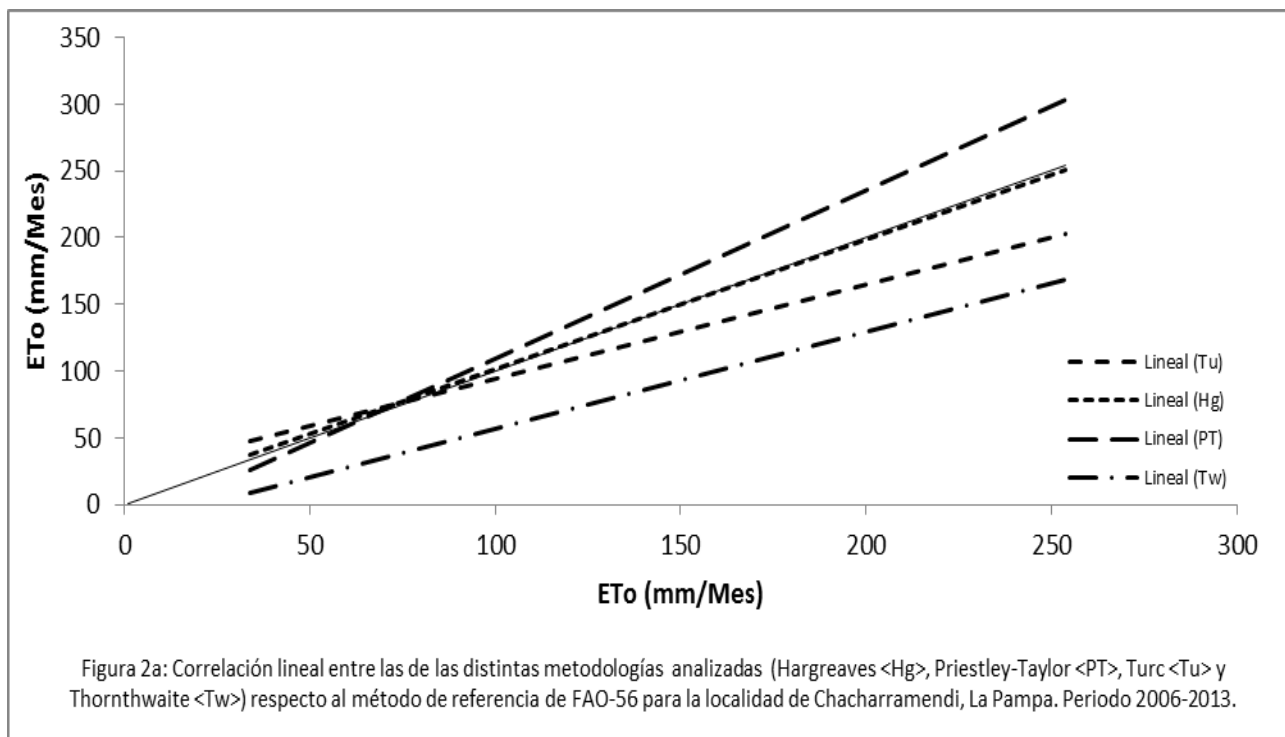
En el análisis de los resultados se observa que el método de Hargreaves- Samani es el que presentó mejor ajuste para la localidad de Chacharramendi (ambiente semiárido/árido, con un  $r=0,99$  y un  $e=0,06$ ), teniendo también un buen comportamiento para la localidad de Anguil (Subhúmedo/Semiárido) y General Villegas (húmedo/subhúmedo). Estos resultados coinciden con los encontrados por Ocampo et al. (2010) para ambientes similares en Argentina (árido), y por Droogers & Allen (2002), Hargreaves & Allen (2003) para otras regiones del mundo. Asimismo esta metodología sobrestima notablemente la ETo para localidades donde el régimen hídrico es mayor, como es el caso de las localidades de General Villegas (principalmente en meses de verano) y Castelar (en todo el periodo). Según Allen et al. (1998), esto se explicaría debido al protagonismo que pierde la interacción radiación/temperatura como factores determinantes a la hora de estimar ET, especialmente en locaciones con alta humedad relativa.

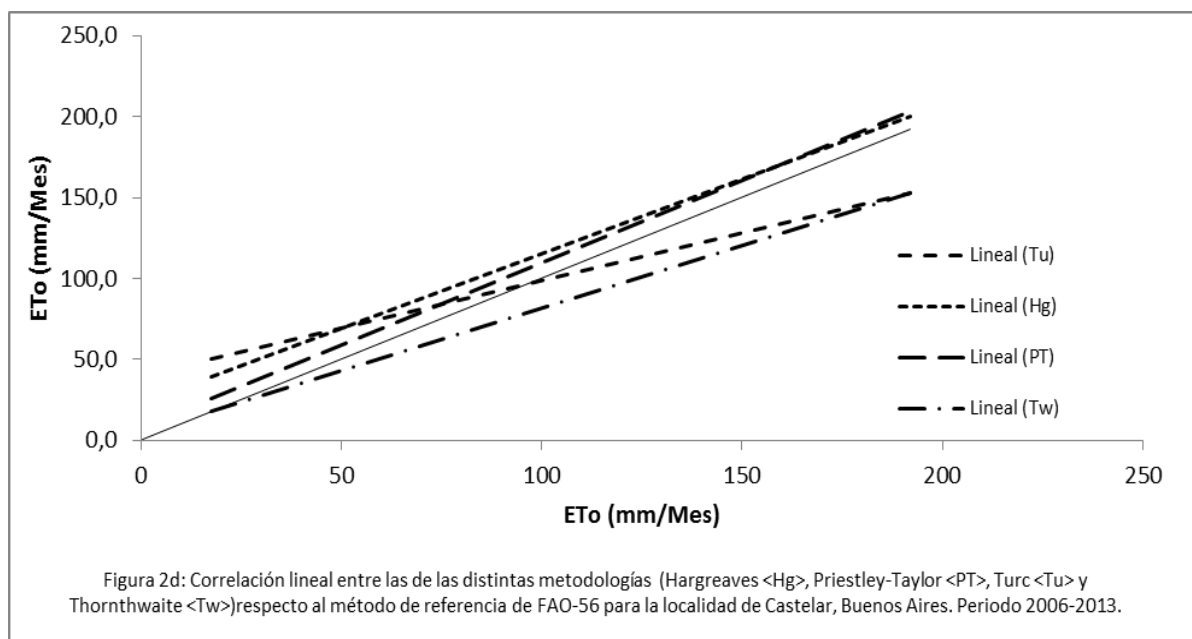
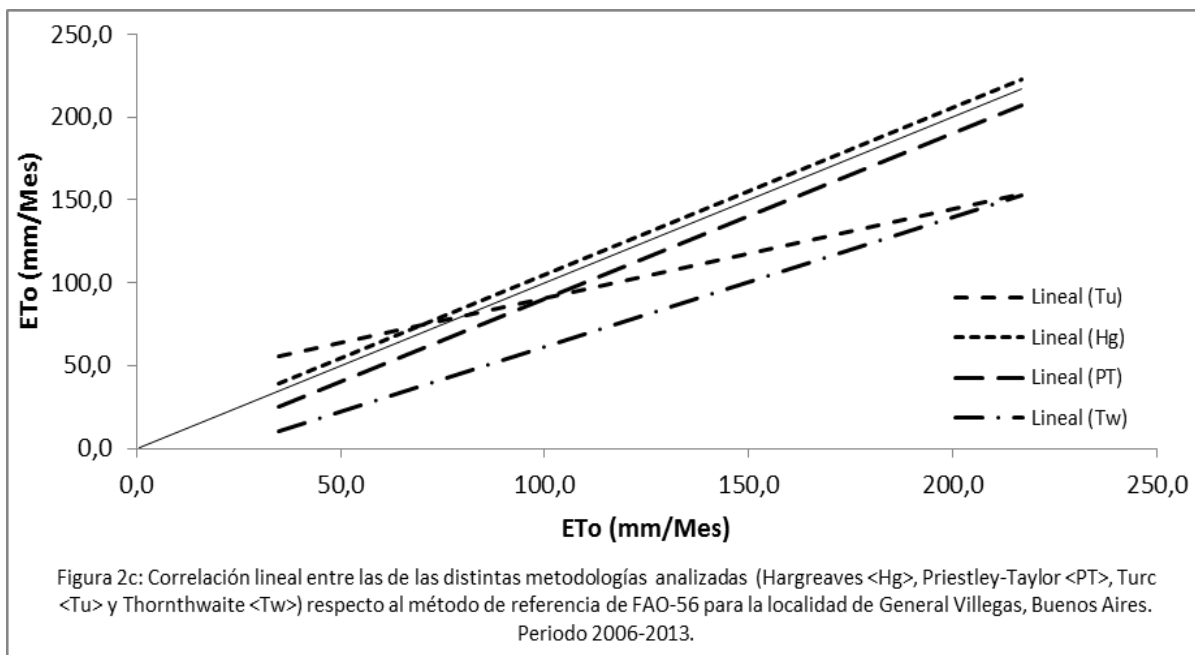
El método de Priestley-Taylor sobrestimó ET en meses de verano para áreas semiáridas (Chacharramendi con un  $\alpha$  de 1,74  $e= 0,19$ ) y subestimó para los mismos meses en regiones subhúmedas (Anguil con un  $\alpha$  de 1,26 arrojando RSME 24,8 mm/mes). Los resultados obtenidos para las localidades de Castelar y General Villegas indican una sobreestimación para los meses estivales (enero-marzo), presentando un buen ajuste en el resto del año ( $r=0,18$  y  $0,17$  respectivamente), siendo para la localidad de Castelar el método con menos sesgo respecto al método de referencia ( $e=0,17$  y  $RSME=13,2$  mm/mes). Esta disparidad se podría subsanar por la utilización de un coeficiente aerodinámico  $\alpha$  calculado *in situ*, y bajo las condiciones normales (principalmente para regiones áridas y semiáridas, atendiendo al fundamental papel desecante del viento en estas regiones).

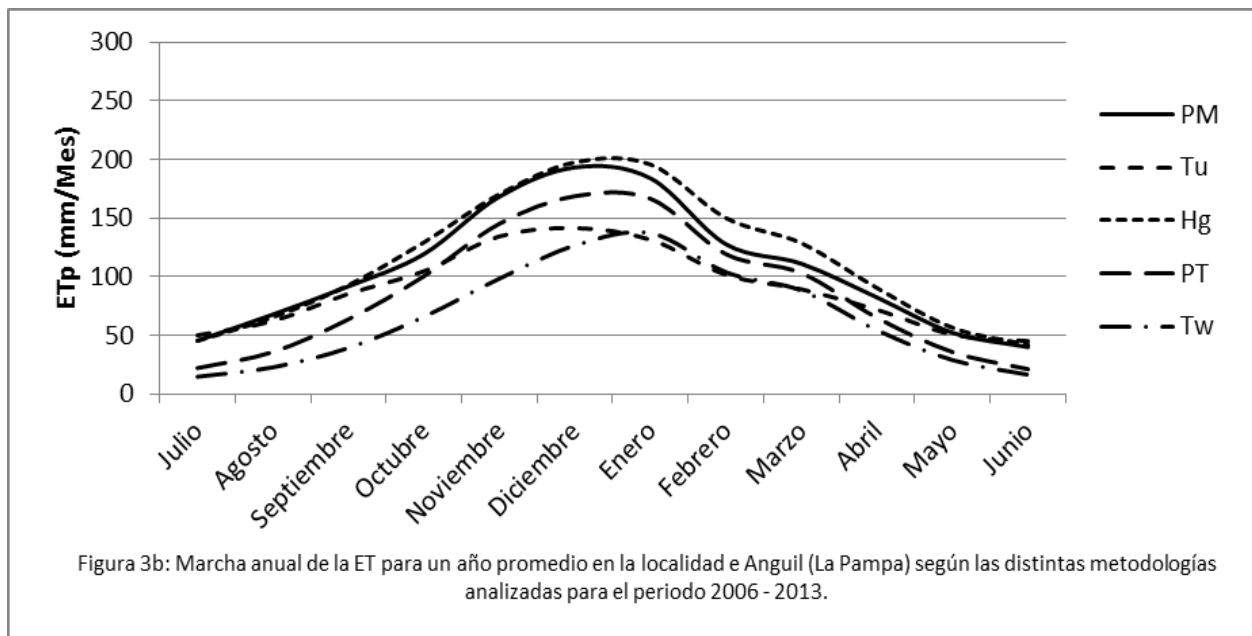
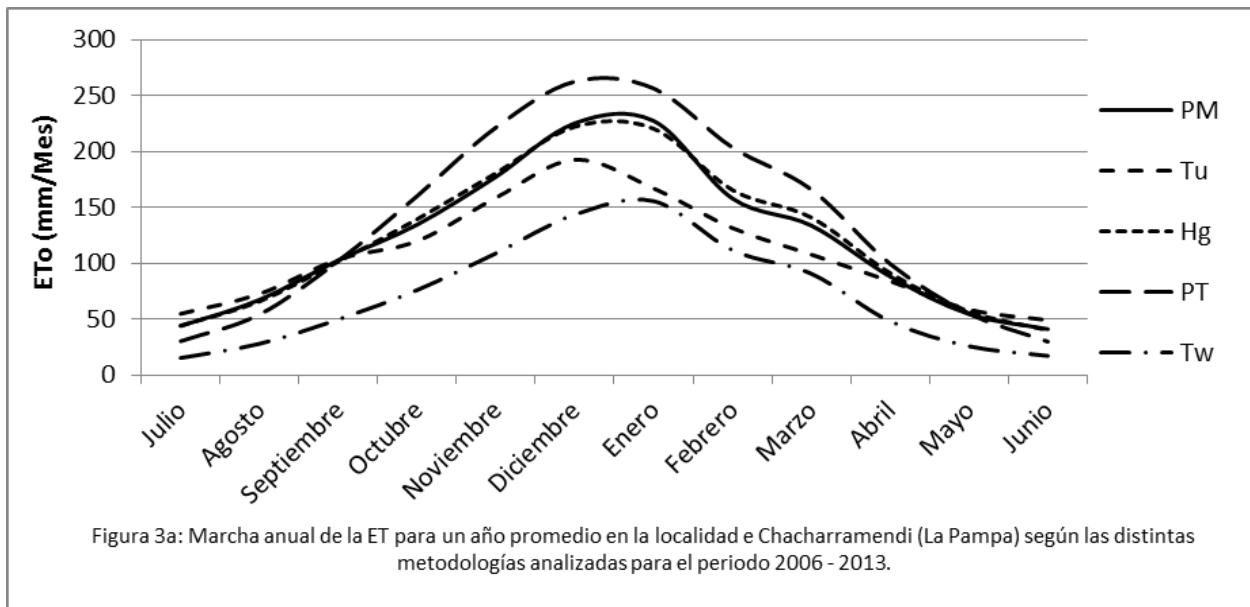
El método de Turc mostró una subestimación de la ETo en todos los ambientes testeados, principalmente para los meses estivales, coincidiendo estos con los meses de mayor demanda atmosférica. Sin embargo cabe destacar que fue mayor el ajuste para climas húmedos que para climas secos, como es el caso de Castelar ( $r=0,976$ ) o General Villegas ( $r= 0,94$  y  $e=0,195$ ), concordando con resultados encontrados por Ocampo & Rivas (2010) para climas similares y Martínez & Thepadia (2010) para climas subtropicales. Cabe aclarar que el método de Turc y sus coeficientes de ajustes originales, fueron desarrollados para climas fríos y húmedos (Sánchez Martínez, 2001), basándose a la interacción humedad relativa respecto a la radiación incidente, lo cual presenta una mayor amplitud en ambientes secos y cálidos. Esto explicaría la ineficacia del método en explicar

precisamente la dinámica de la ET para nuestra región, no siendo así para otras (Martínez & Thepadia, 2010).

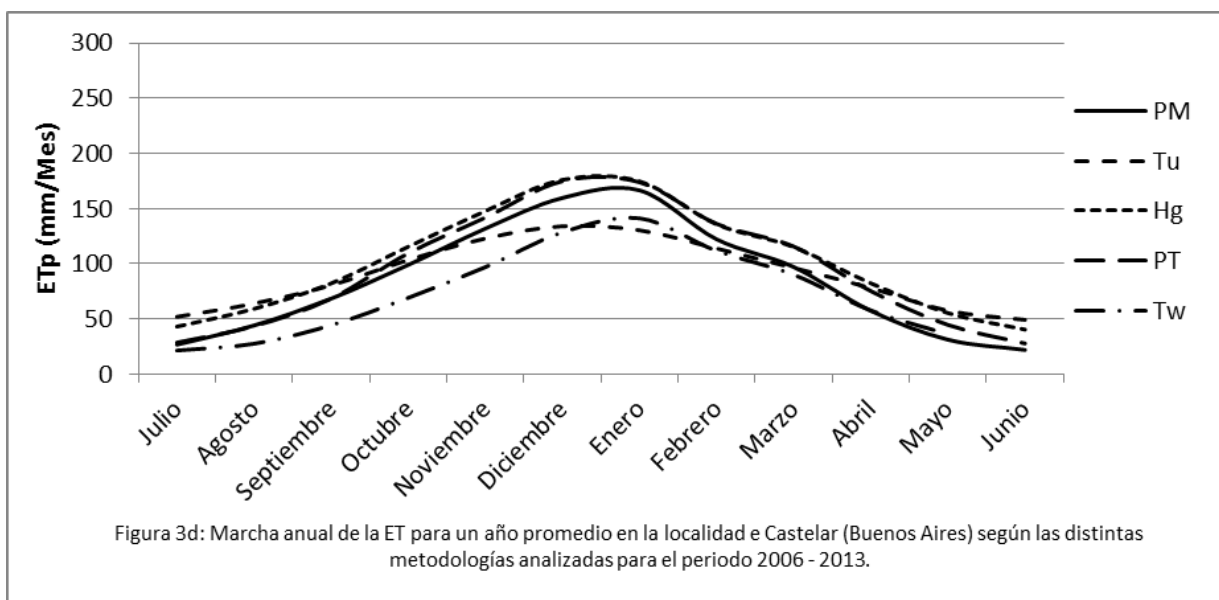
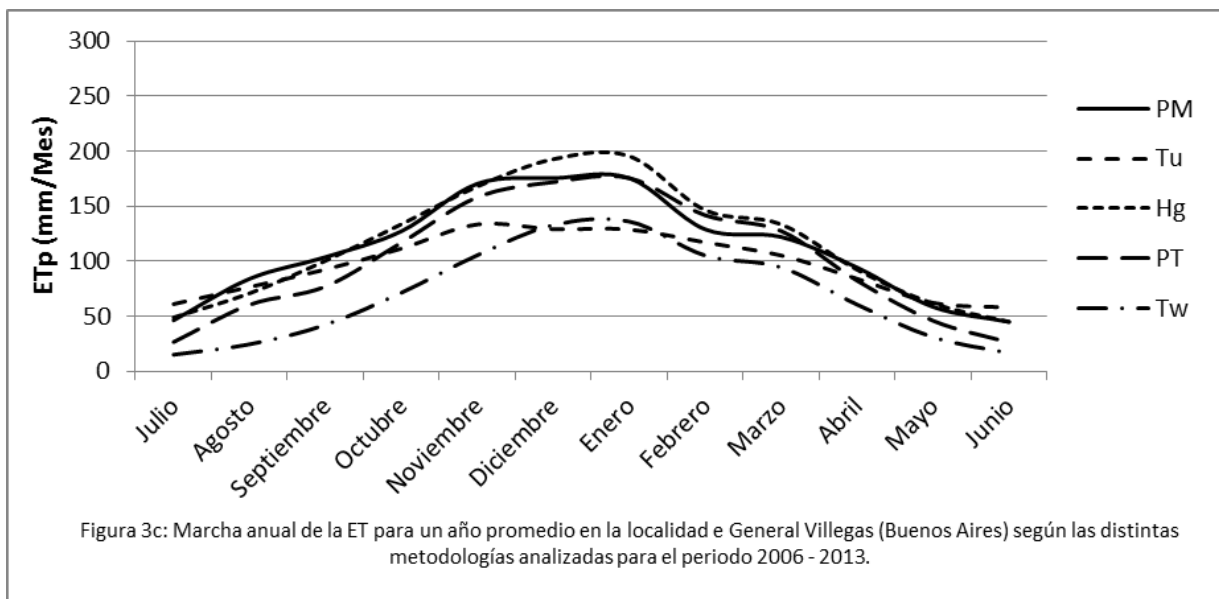
El método de Thornthwaite subestimó en las cuatro localidades analizadas la ET durante todo el año. Sin embargo, el ajuste de los datos mostró una importante correlación entre los resultados ( $r > 0,89$ ), lo que indicaría que una calibración local arrojaría buenos resultados en el tiempo. Esta metodología fue ampliamente utilizada, debido a la simpleza de su cálculo, así como por su acotada demanda de datos. Si bien este método arroja buenos resultados para otras regiones, principalmente húmedas y templadas, su aplicación directa sin calibración no sería recomendable para la nuestra. Sus conclusiones descansan en coeficientes de ajustes estudiados originalmente para las praderas sur meridionales de los EEUU, siendo necesaria la calibración.











Si bien el estudio muestra que ciertas metodologías podrían ser aplicadas directamente con buenos resultados, se sugiere utilizar de modo más preciso las ecuaciones de RLS como ecuación de calibración para cada una de las metodologías de contraste, siendo que no pueda contarse con los datos suficientes como para utilizar el método de FAO 56. Estas relaciones de calibración se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Ecuaciones de ajustes a la recta de RLS para cada una de las metodologías estudiadas respecto al método de referencia.

	<b>Chacharramendi</b>	<b>Anguil</b>	<b>General Villegas</b>	<b>Castelar</b>
<b>Tu</b>	$y = 0,7098x + 23,096$	$y = 0,6477x + 19,919$	$y = 0,538x + 37,041$	$y = 0,5853x + 40,112$
<b>Hg</b>	$y = 0,9709x + 4,5221$	$y = 0,9922x + 7,5465$	$y = 1,0081x + 3,9165$	$y = 0,9215x + 23,49$
<b>PT</b>	$y = 1,2591x - 16,601$	$y = 0,9866x - 18,262$	$y = 0,9993x - 9,9056$	$y = 1,0142x + 8,2765$
<b>Tw</b>	$y = 0,7262x - 16,347$	$y = 0,7325x - 11,982$	$y = 0,7821x - 17,088$	$y = 0,7751x + 4,2404$

## CONCLUSIONES

La ET se comportó de manera diferente según cada modelo y cada localidad. Fue posible individualizar un método de estimación de mayor ajuste para cada locación.

El método de Hargreaves-Samani original fue la opción de mayor ajuste para la localidad de Chacharramendi, siendo aplicable a las locaciones cercanas. Asimismo su comportamiento y la precisión en las estimaciones, indican que también es posible su utilización para las localidades de Anguil y/o General Villegas.

El método de Priestley-Taylor muestra un buen comportamiento para regiones más húmedas y cálidas, dónde no sea el viento sino la humedad el factor con papel determinante.

Turc, si bien presenta una alta correlación con el método de referencia en todas las localidades, no arrojó resultados precisos en ninguna de ellas.

Thornthwaite no explicó de manera precisa ETo en ninguna de las localidades usando el método original.

Para todos los métodos estudiados, sería oportuno una calibración local y estacional más precisa, con periodos de estudios más largos y preferentemente contrastados con algún método directo de medición de ET (Lisímetros, tanques evaporímetros, etcétera).

Cabe mencionar que el sesgo obtenido por el método de Priestley-Taylor en Anguil durante la correlación con PM alcanza el 25 %, por lo que no sería recomendable su adopción como primera opción para esta localidad.

Respecto a Turc, el sesgo en la subestimación de los datos que produce en sus resultados respecto a los PM provoca que no sea efectivo para la estimación sin una calibración previa, especialmente para la localidad de Castelar.

Thornthwaite no se aconseja para ninguna localidad sin una calibración previa. El método se mostró homogéneo en cuanto a sus predicciones, arrojando un gran error porcentual respecto al estándar, atenuándose éste para la localidad de Castelar. Esto indicaría que de darse una calibración oportuna Thornthwaite arrojaría resultados provechosos principalmente para esta locación.

Por último se recomienda una revisión similar de las adaptaciones y calibraciones más actuales de las metodologías de base aquí propuestas y su aplicabilidad al área en estudio, a fin de precisar mayores certezas en la problemática.

## **Bibliografía:**

Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. (p. 323). FAO (56:1). Roma, Italia. Versión en castellano (Trad. R. Trezza & M. García)

Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage N° 56*, 300.

Allen, R. G., Pereira, L., Howell, T., & Jensen, M. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. doi:10.1016/j.agwat.2010.12.015

Almorox, J. (2012). Calibración del modelo de Hargreaves para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Coronel Dorrego, *Revista Facultad Ciencias Agrarias (UNCUYO)* 44(1), 101–109.

ASCE, C. S. of R. E. T. (2000). ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation. In *National Irrigation Symposium in Phoenix* (pp. 1–11). Arizona.

Bianchi, A. 2013. SIG climático de Argentina. Visor GeoINTA. INTA Online. Revisado 15/01/2014 (<http://geointa.inta.gov.ar/web/index.php/sig-climatico-de-argentina/>)

Bracho, G., & Puche, M. (2004). Limitaciones del uso de la ecuación Penman-Monteith FAO para la generación de mapas, caso Venezuela, *Facultad de Agronomía, Universidad de Venezuela* 1–7.

Brizuela, A., Nosetto, M., & Aguirre, C. (2010). *Tendencias de la Evapotranspiración Anual en el periodo 2000 - 2010*, IV simposio Internacional de Climatología - Cambio Climático y sus Impactos en las zonas urbanas - Sociedad Brasileira de Meteorología (p. 5).

Bochetti Vladilo, M. Jesús. (2010). Análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida mediante distintas ecuaciones empíricas, aplicadas a la zona agrícola de Chillan. *Tesis de grado. Universidad católica de la santísima concepción.*, 1 – 68.

Bormann, H. (2011). Sensitivity analysis of 18 different potential evapotranspiration models to observed climatic change at German climate stations. *Climatic Change*, 104(3-4), 729–753. DOI: 10.1007/s10584-010-9869-7

Cano, Eduardo (Coord.) & otros. (1980). *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. Geomorfología, clima y suelos. Segunda edición.* INTA, UNLPam. 2da edición 2004. Buenos Aires.

Casagrande, G., Vergara, G., & Bellini, Y. (2006). Cartas agroclimáticas actuales de temperaturas, heladas y lluvia de la provincia de La Pampa (Argentina). *Revista Facultad Agronomía - UNLPam*, 17, 15 – 22.

Carreño, L., & Viglizzo, E. (2007). Provisión de servicios ecológicos y Gestión de los ambientes rurales en Argentina (p. 70). Ediciones INTA.

Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología Aplicada. (M. Suárez, Ed.) (p. 585). Español (traducción Saldarriaga – Santos) Bogotá - Colombia: Nomos S.A.

Conti, Marta (Coord.) & otros. (2000). Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos. 2da edición, 3ra reimpresión (2009). Editorial facultad agronomía. UBA. 430 pág.

De la Casa, A., & Moore, F. (2008). Impacto del cambio climático-Ambiental sobre la aptitud del cultivo de la Soja en tres localidades de la Región central de Argentina durante la segunda mitad del siglo XX. XII Reunión Argentina de Agrometeorología., 71–72.

Domingo, F., Villagarcía, L., & Were, A. (2003). ¿Cómo se puede medir y estimar la Evapotranspiración?: Estado actual y evolución. Ecosistemas, 12(1).

Droogers, P. & Allen, R. G. (2002). *Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions*. Irrigation and Drainage Systems, 16, 33–45.

FAO -Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura- (2002) Agricultura Mundial: Hacia los años 2015-2030. Informe Resumido. Español. Roma, Italia. (p. 106) ISBN: 9253047615.

Farahani, H. J., Howell, T. A., Shuttleworth, W. J. & Bausch, W. C. (2007). Evapotranspiration: Progress in measurement and modeling in agriculture. ASABE 100th Anniversary Soil and Water Invited Review Series., 50(5), 1627–1638. Retrieved from <http://handle.nal.usda.gov/10113/8995>

Ferrelli, F. (2012). La sequía 2008-2009 en el Sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Ecosistemas 21(1-2):235-238.

García-Tejero, I. F. (2011). *Water and Sustainable Agriculture* (p. 94). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-2091-6

Gonzales, M., & Nuñez, M. (2007). Escenarios futuros en La Pampa Bonaerense, Argentina. Revista Digital Universitaria (UBA).

Hargreaves, G.H.; Z.A. Samani (1982) Estimating potential evapotranspiration. J. Irrig. and Drain Engr., ASCE, 108(IR3):223-230.

Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129(1), 53–63.

Hillel, D. (1990). Role of irrigation in agricultural systems. Irrigation of Agricultural Crop. Edited by B. A. Stewart and D. R Nielsen. Agronomy No. 30,6-29.

Jensen ME, Burman RD, Allen RG (Eds.). (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASC Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. 332 pp

Martinez, C. J., & Thepadia, M. (2010). Estimating Reference Evapotranspiration with Minimum Data in Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136, 494–501. doi:10.1061/ASCE/IR.1943-4774.0000214

Mercado-Mancera, G., Troyo-Diéguez, E., Aguirre-Gómez, A., Mirrullo-Amador, B., Beltran-Morales, L. F., & García-Hernández, J. L. (2010). Calibración y aplicación del índice de Aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimados de la Aridez y desertificación de zonas áridas. *Universidad Y Ciencia.*, 26(1), 51–64.

Miranda, R. (2010). Agricultura en la Región Semiárida. In *Condiciones para el Desarrollo de Producciones Agrícola-Ganaderas en el S.O. Bonaerense* (p. 279–284).

Moscatelli, G. 1991. Los suelos de la región pampeana. Editor: Barsky, O. Morrás, H. 2003. La ciencia del suelo en la Argentina. Evolución y perspectivas. Ediciones INTA.

Núñez, M. y colaboradores. (2007). Capítulo 5: Vulnerabilidad de la Pampa Húmeda Bonaerense. Segunda Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Buenos Aires. 1ra. Ed. (Pág. 94-109).

Ocampo, D., Rivas, R., & Schirmbeck, J. (2009). Aptitud de diferentes métodos de estimación de la Evapotranspiración: Aplicación en una zona de clima templado., *Aportes de la Hidrogeología al Conocimiento de los Recursos Hídricos (Tomo I)* 10.

Ocampo, D., & Rivas, R. (2010). Comparación de métodos de estimación de la Evapotranspiración a escala local en zonas de clima húmedo y árido. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, 504 – 511.

Panigatti, J. L. (2010). Argentina: 200 Años, 200 Suelos. (p. 345). Buenos Aires: Ediciones INTA.

Pántano, V. C., & Penalba, O. (2012). Respuesta de la situación hídrica del suelo a la variabilidad temporal de la precipitación. *XI Congreso Argentino de Meteorología (Mendoza - Argentina)*, 1 – 12.

Pántano, V. C., Spescha, L., Penalba, O., & Murphy, G. (2013). Influencia de la Variabilidad de temperatura y precipitación en la situación hídrica del suelo, en la Región Oriental de secano de la República Argentina. *Meteorológica*, 1–20.

Priestley, C., & Taylor, R. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 81–92.

Quiroga, A., Funaro, D., Fernandez, R., & Noellemeyer, E. (2005). Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la región pampeana. *Ciencia del suelo*, 23(1), 79–86.

Ratto, Silvia. (2000) El agua en el suelo. Principios de edafología: Con énfasis en suelos Argentinos. Conti, Marta (coord.) Ed. Editorial Facultad Agronomía, UBA. Segunda edición. ISBN: 950-43-9315-2.

Rosenberry, D. O., Winter, T. C., Buso, D. C., & Likens, G. E. (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), 149–166. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.03.018

Samani, Z. (2000). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4), 1–13. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:4(265)

Sanchez Martinez, M. (2001). Métodos de estimación de la Evapotranspiración Utilizados en Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 28, 3 – 10.

Seiler, R. A. (2007). Cambio climático y variabilidad climática: necesidad de nuevas estrategias de adaptación en los sistemas de producción ganadera climática. *Revista Argentina de Producción Animal*, 27(2), 99–111.

Shahidian, S., Serralheiro, R., Serrano, J., Teixeira, J., Haine, N., & Santos, F. (2012). Hargreaves and Other Reduced-Set Methods for Calculating Evapotranspiration. *Remote Sensing and Modeling*, 59 – 81. Retrieved from [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

Sun, G., Lu, J., McNulty, S., & Amatya, D. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 621–633.

Temesgen, B., Eching, S., ASCE, Davidoff, B., & Frame, K. (2005). Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 73–84. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73)

Thornthwaite E, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38: 55-94

Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron*, 12(1), 13-49.

Usunoff, E., Rivas, R., Varni, M., & Weinzettel, P. (1999). Hidrogeología de grandes llanuras. *Boletín Geológico y Minero.*, 110(4), 391 – 406.



## Anexo I: Resumen climático periodo 2006 – 2013.

Tabla 4: Datos climáticos para el año promedio del periodo 2006 – 2013 para la localidad de Chacharramendi (La Pampa) según los datos obtenidos de una estación Davis *Vantage Pro* del Campo anexo INTA Chacharramendi y valores de ETo promedio mensuales obtenidos según el método de Penman – Monteith.

Chacharramendi, La Pampa. (37° 26' S - 287 msnm)	Mes promedio (2006 – 2013)	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Radiación Solar Global (Mj/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Vel. Viento (Km/h U2)
	Enero	40,0	79,3	227,17	26,5	34,0	25,3	16,3	9,0
	Febrero	51,2	59,1	157,73	23,6	31,5	23,1	14,2	7,3
	Marzo	54,3	69,1	133,55	18,8	28,7	20,2	11,0	6,9
	Abril	53,0	18,2	87,93	14,0	24,0	15,0	5,5	6,2
	Mayo	59,7	14,4	54,40	9,4	18,9	10,7	2,6	5,8
	Junio	57,6	9,7	40,94	7,5	15,7	7,7	0,1	6,1
	Julio	55,8	6,9	43,71	8,4	15,0	7,0	-1,1	6,1
	Agosto	49,5	19,7	67,14	11,5	17,8	9,3	0,2	7,5
	Septiembre	43,7	39,8	102,66	16,7	22,0	13,3	3,5	7,9
	Octubre	47,9	58,4	134,43	20,8	24,4	16,5	7,3	8,4
	Noviembre	42,6	62,6	177,33	25,7	28,7	20,4	10,7	8,6
Diciembre	33,7	47,8	225,14	28,5	32,3	23,7	13,7	8,5	
Promedio	49,1	-	-	-	-	24,4	16,0	7,0	7,4
Máxima	-	-	-	-	-	34,0	25,3	16,3	9,0
Mínima	-	-	-	-	-	15,0	7,0	-1,1	5,8
Total	-	-	485,0	1452,1	-	-	-	-	-

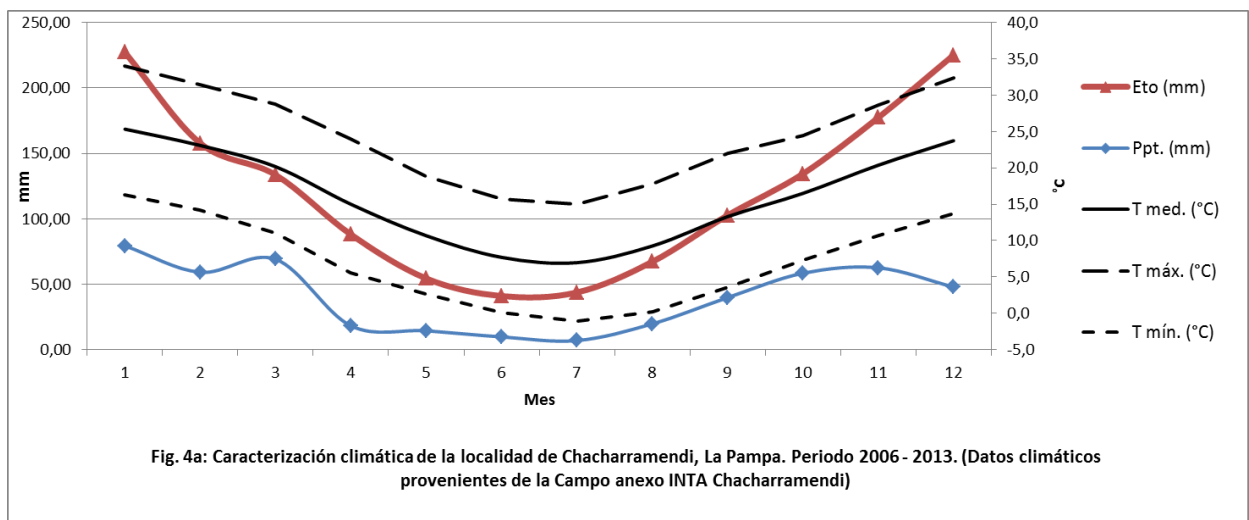


Tabla 5: Datos climáticos para el año promedio del periodo 2006 – 2013 para la localidad de Anguil (La Pampa) según los datos obtenidos de una estación Davis *Vantage Pro* de la Estación experimental INTA Anguil y valores de ETo promedio mensuales obtenidos según el método de Penman – Monteith.

Mes promedio (2006 – 2013)	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Radiación Solar Global (Mj/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Vel. Viento (Km/h U2)
Enero	55,4	112,1	183,97	23,2	31,3	23,7	16,2	9,1
Febrero	62,1	94,9	131,65	19,2	29,6	22,1	14,7	7,4
Marzo	66,8	128,8	111,11	15,7	27,1	19,7	12,3	6,6
Abril	62,9	40,2	82,38	12,0	24,2	15,9	7,7	5,9
Mayo	69,3	9,9	50,84	7,9	18,8	11,3	3,8	5,8
Junio	67,3	8,1	40,12	6,8	16,0	8,4	0,7	6,2
Julio	64,9	10,0	45,58	7,8	15,2	7,6	-0,1	7,2
Agosto	57,4	20,9	66,46	10,0	17,8	9,4	1,1	8,0
Septiembre	58,4	66,6	91,91	14,4	20,5	12,6	4,6	9,2
Octubre	60,3	84,7	119,43	18,2	23,5	16,0	8,5	8,7
Noviembre	52,5	73,7	168,36	23,5	28,2	19,9	11,7	9,5
Diciembre	50,9	70,3	193,24	25,0	30,3	22,4	14,4	9,1
Promedio	60,7	-	-	-	23,5	15,7	8,0	7,7
Máxima	-	-	-	-	31,3	23,7	16,2	9,5
Mínima	-	-	-	-	15,2	7,6	-0,1	5,8
Total	-	720,2	1285,0	-	-	-	-	-

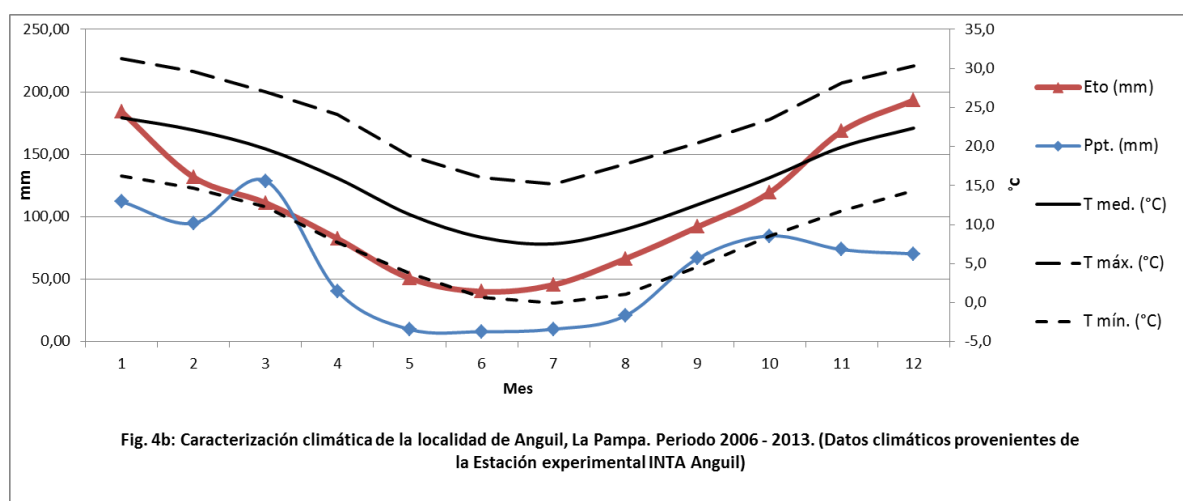


Tabla 6: Datos climáticos para el año promedio del periodo 2006 – 2013 para la localidad de General Villegas (Buenos Aires) según los datos obtenidos de una estación meteorológica Automática SIAP estándar de la Estación Experimental INTA General Villegas y valores de ETo promedio mensuales obtenidos según el método de Penman – Monteith.

General Villegas, Buenos Aires. (35° 55' S - 117 msnm)	Mes promedio (2006 - 20013)	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Radiación Solar Global (Mj/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Vel. Viento (Km/h - U2)
	Enero	65,2	105,6	150,5	23,1	31,7	23,8	16,5	8,2
	Febrero	73,3	110,2	111,3	20,9	29,9	22,6	16,3	6,6
	Marzo	71,9	96,8	97,6	18,5	28,5	20,8	13,6	6,9
	Abril	67,8	48,3	83,6	14,4	25,5	17,6	10,2	7,4
	Mayo	73,5	23,1	52,9	10,1	20,7	12,6	5,8	7,8
	Junio	74,4	9,4	36,4	9,3	17,7	9,3	2,7	6,9
	Julio	70,6	11,9	40,8	10,0	16,9	8,4	1,4	7,8
	Agosto	62,9	9,5	68,1	13,0	19,8	10,5	2,9	8,6
	Septiembre	62,0	53,9	94,7	16,0	22,4	13,9	5,9	10,9
	Octubre	65,8	102,2	117,5	19,4	24,8	17,3	10,2	10,1
	Noviembre	57,9	83,4	156,5	24,1	29,1	21,1	13,9	10,7
	Diciembre	60,6	88,4	158,2	23,0	31,0	23,3	16,1	8,3
	Promedio	67,2				24,8	16,8	9,6	8,4
	Máxima					31,7	23,8	16,5	10,9
Mínima					16,9	8,4	1,4	6,6	
Total		742,5	1168,1						

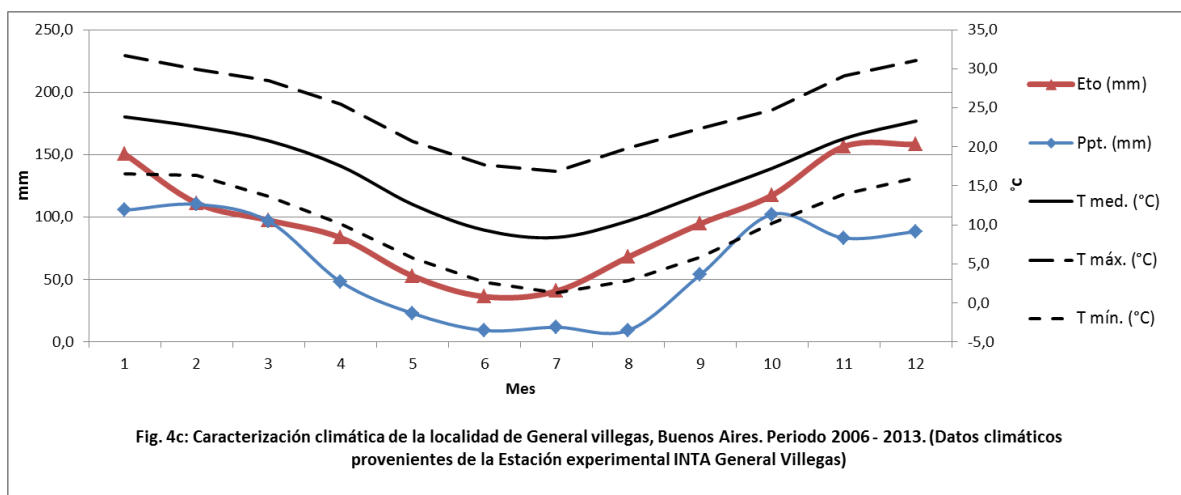
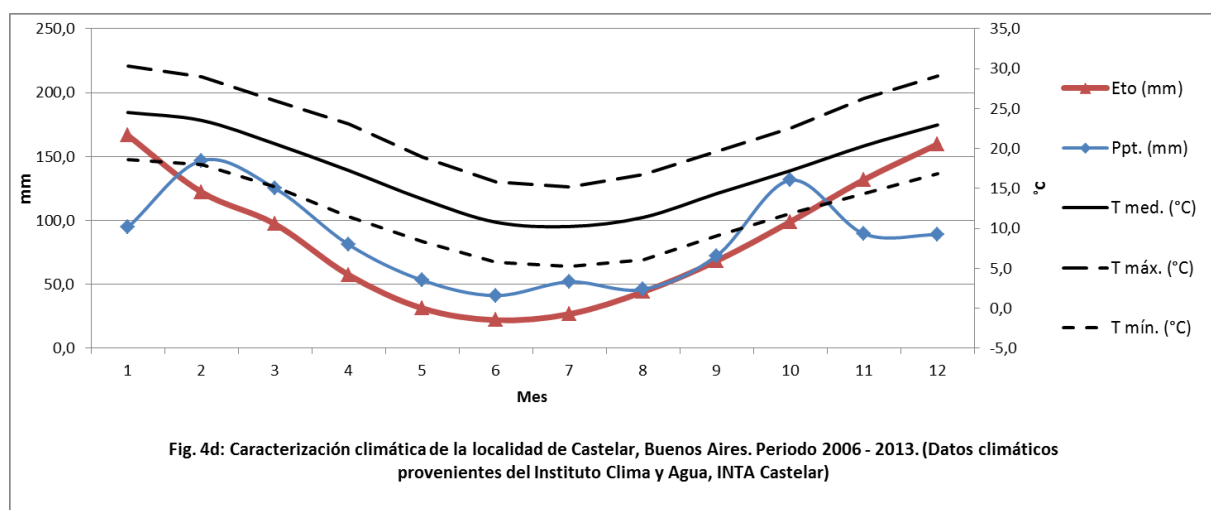


Tabla 7: Datos climáticos para el año promedio del periodo 2006 – 2013 para la localidad de Castelar (Buenos Aires) según los datos obtenidos de la estación meteorológica del Instituto Clima y Agua en INTA Castelar y valores de ETo promedio mensuales obtenidos según el método de Penman – Monteith.

Mes promedio (2006 - 20013)	Humedad Relativa (%)	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)	Radiación Solar Global (MJ/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Media (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Vel. Viento (Km/h - U2)
Enero	60,7	94,4	166,6	23,5	30,4	24,5	18,7	6,8
Febrero	68,1	146,8	122,2	20,3	29,0	23,5	18,0	5,7
Marzo	73,9	125,1	97,1	16,8	26,0	20,6	15,2	4,9
Abril	74,0	81,1	57,3	13,2	23,1	17,3	11,4	4,0
Mayo	76,9	53,2	31,2	9,2	19,0	13,7	8,4	4,1
Junio	75,7	41,2	21,9	7,6	15,8	10,8	5,7	4,7
Julio	73,2	51,9	26,7	8,1	15,2	10,2	5,2	4,9
Agosto	69,2	46,0	44,1	10,5	16,7	11,4	6,1	5,6
Septiembre	68,5	72,4	68,4	13,7	19,7	14,4	9,1	6,8
Octubre	70,0	131,5	99,0	18,2	22,6	17,2	11,9	6,2
Noviembre	64,8	89,5	131,9	22,0	26,3	20,3	14,3	6,7
Diciembre	61,4	88,9	159,7	24,2	29,1	23,0	16,8	6,6
Promedio	69,7				22,7	17,2	11,7	5,6
Máxima					30,4	24,5	18,7	6,8
Mínima					15,2	10,2	5,2	4,0
<b>Total</b>		<b>1021,8</b>	<b>1025,9</b>					



Anexo II:

**Tabla 8:** Horas máximas de insolación (N) a lo largo del año para distintas latitudes para el día 15 de cada mes. Las estimaciones basadas en el día 15 del mes arrojan buenas estimaciones ( $\leq 1$  %) (Fuente: Allen (2006))

Lat. grad.	Hemisferio Sur											
	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
70	24,0	17,4	13,0	8,4	2,7	0,0	0,0	6,4	11,2	15,7	21,7	24,0
68	21,9	16,7	12,9	8,7	4,3	0,0	1,7	7,0	11,3	15,3	19,9	24,0
66	20,1	16,2	12,8	9,1	5,3	2,0	3,7	7,6	11,3	15,0	18,8	22,1
64	19,0	15,8	12,8	9,3	6,1	3,7	4,8	8,0	11,4	14,7	18,0	20,3
62	18,3	15,5	12,7	9,6	6,7	4,8	5,6	8,3	11,4	14,5	17,4	19,2
60	17,6	15,2	12,6	9,8	7,2	5,6	6,3	8,7	11,5	14,3	16,9	18,4
58	17,1	14,9	12,6	9,9	7,6	6,2	6,8	8,9	11,5	14,1	16,5	17,8
56	16,7	14,7	12,5	10,1	8,0	6,7	7,2	9,2	11,6	13,9	16,1	17,3
54	16,3	14,5	12,5	10,2	8,3	7,2	7,6	9,4	11,6	13,8	15,8	16,9
52	16,0	14,3	12,5	10,4	8,6	7,5	8,0	9,6	11,6	13,7	15,5	16,5
50	15,7	14,2	12,4	10,5	8,8	7,9	8,3	9,7	11,7	13,6	15,3	16,1
48	15,4	14,0	12,4	10,6	9,0	8,2	8,5	9,9	11,7	13,4	15,0	15,8
46	15,2	13,9	12,4	10,7	9,2	8,5	8,8	10,0	11,7	13,3	14,8	15,5
44	14,9	13,7	12,4	10,8	9,4	8,7	9,0	10,2	11,7	13,3	14,6	15,3
42	14,7	13,6	12,3	10,8	9,6	9,0	9,2	10,3	11,7	13,2	14,4	15,0
40	14,5	13,5	12,3	10,9	9,8	9,2	9,4	10,4	11,8	13,1	14,3	14,8
38	14,4	13,4	12,3	11,0	9,9	9,4	9,6	10,5	11,8	13,0	14,1	14,6
36	14,2	13,3	12,3	11,1	10,1	9,6	9,8	10,6	11,8	12,9	13,9	14,4
34	14,0	13,2	12,2	11,1	10,2	9,7	9,9	10,7	11,8	12,9	13,8	14,3
32	13,9	13,1	12,2	11,2	10,4	9,9	10,1	10,8	11,8	12,8	13,7	14,1
30	13,7	13,0	12,2	11,3	10,5	10,1	10,2	10,9	11,8	12,7	13,5	13,9
28	13,6	13,0	12,2	11,3	10,6	10,2	10,4	11,0	11,8	12,7	13,4	13,8
26	13,5	12,9	12,2	11,4	10,7	10,4	10,5	11,1	11,9	12,6	13,3	13,6
24	13,3	12,8	12,2	11,4	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,6	13,2	13,5
22	13,2	12,7	12,1	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,5	13,1	13,3
20	13,1	12,7	12,1	11,5	11,1	10,8	10,9	11,3	11,9	12,5	13,0	13,2
18	13,0	12,6	12,1	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	11,9	12,4	12,9	13,1
16	12,9	12,5	12,1	11,6	11,3	11,1	11,1	11,5	11,9	12,4	12,8	12,9
14	12,7	12,4	12,1	11,7	11,4	11,2	11,2	11,5	11,9	12,3	12,7	12,8
12	12,6	12,4	12,1	11,7	11,4	11,3	11,4	11,6	11,9	12,3	12,6	12,7
10	12,5	12,3	12,1	11,8	11,5	11,4	11,5	11,7	11,9	12,2	12,5	12,6
8	12,4	12,3	12,1	11,8	11,6	11,5	11,6	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5
6	12,3	12,2	12,0	11,9	11,7	11,7	11,7	11,8	12,0	12,1	12,3	12,3
4	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,8	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,2
2	12,1	12,1	12,0	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,1	12,1
0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0

**Tabla 9:** Radiación astronómica –Ra- ( $Mj/m^2$ día) para el hemisferio sur correspondiente al 15vo día del mes. Las estimaciones basadas en el día 15 del mes arrojan buenas estimaciones ( $\leq 1$  %) (Fuente: Allen (2006))

Lat. grad.	Hemisferio Sur											
	Ene.	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
70	41,4	28,6	15,8	4,9	0,2	0,0	0,0	2,2	10,7	23,5	37,3	45,3
68	41,0	29,3	16,9	6,0	0,8	0,0	0,0	3,2	11,9	24,4	37,4	44,7
66	40,9	30,0	18,1	7,2	1,5	0,1	0,5	4,2	13,1	25,4	37,6	44,1
64	41,0	30,8	19,3	8,4	2,4	0,6	1,2	5,3	14,4	26,3	38,0	43,9
62	41,2	31,5	20,4	9,6	3,4	1,2	2,0	6,4	15,5	27,2	38,3	43,9
60	41,5	32,3	21,5	10,8	4,4	2,0	2,9	7,6	16,7	28,1	38,7	43,9
58	41,7	33,0	22,6	12,0	5,5	2,9	3,9	8,7	17,9	28,9	39,1	44,0
56	42,0	33,7	23,6	13,2	6,6	3,9	4,9	9,9	19,0	29,8	39,5	44,1
54	42,2	34,3	24,6	14,4	7,7	4,9	6,0	11,1	20,1	30,6	39,9	44,3
52	42,5	35,0	25,6	15,6	8,8	6,0	7,1	12,2	21,2	31,4	40,2	44,4
50	42,7	35,6	26,6	16,7	10,0	7,1	8,2	13,4	22,2	32,1	40,6	44,5
48	42,9	36,2	27,5	17,9	11,1	8,2	9,3	14,6	23,3	32,8	40,9	44,5
46	43,0	36,7	28,4	19,0	12,3	9,3	10,4	15,7	24,3	33,5	41,1	44,6
44	43,2	37,2	29,3	20,1	13,5	10,5	11,6	16,8	25,2	34,1	41,4	44,6
42	43,3	37,7	30,1	21,2	14,6	11,6	12,8	18,0	26,2	34,7	41,6	44,6
40	43,4	38,1	30,9	22,3	15,8	12,8	13,9	19,1	27,1	35,3	41,8	44,6
38	43,4	38,5	31,7	23,3	16,9	13,9	15,1	20,2	28,0	35,8	41,9	44,5
36	43,4	38,9	32,4	24,3	18,1	15,1	16,2	21,2	28,8	36,3	42,0	44,4
34	43,4	39,2	33,0	25,3	19,2	16,2	17,4	22,3	29,6	36,7	42,0	44,3
32	43,3	39,4	33,7	26,3	20,3	17,4	18,5	23,3	30,4	37,1	42,0	44,1
30	43,1	39,6	34,3	27,2	21,4	18,5	19,6	24,3	31,1	37,5	42,0	43,9
28	43,0	39,8	34,8	28,1	22,5	19,7	20,7	25,3	31,8	37,8	41,9	43,6
26	42,8	39,9	35,3	29,0	23,5	20,8	21,8	26,3	32,5	38,0	41,8	43,3
24	42,5	40,0	35,8	29,8	24,6	21,9	22,9	27,2	33,1	38,3	41,7	43,0
22	42,2	40,1	36,2	30,6	25,6	23,0	24,0	28,1	33,7	38,4	41,4	42,6
20	41,9	40,0	36,6	31,3	26,6	24,1	25,0	28,9	34,2	38,6	41,2	42,1
18	41,5	40,0	37,0	32,1	27,5	25,1	26,0	29,8	34,7	38,7	40,9	41,7
16	41,1	39,9	37,2	32,8	28,5	26,2	27,0	30,6	35,2	38,7	40,6	41,2
14	40,6	39,7	37,5	33,4	29,4	27,2	27,9	31,3	35,6	38,7	40,2	40,6
12	40,1	39,6	37,7	34,0	30,2	28,1	28,9	32,1	36,0	38,6	39,8	40,0
10	39,5	39,3	37,8	34,6	31,1	29,1	29,8	32,8	36,3	38,5	39,3	39,4
8	38,9	39,0	37,9	35,1	31,9	30,0	30,7	33,4	36,6	38,4	38,8	38,7
6	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
4	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
2	36,9	37,9	38,0	36,4	34,1	32,6	33,1	35,2	37,1	37,7	37,0	36,4
0	36,2	37,5	37,9	36,8	34,8	33,4	33,9	35,7	37,2	37,4	36,3	35,6

**Tabla 10:** Constante Psicrométrica ( $\gamma$ ) para distintas altitudes (z) (Fuente: Allen (2006))

z (m)	$\gamma$ kPa/°C <sup>-1</sup>	z (m)	$\gamma$ kPa/°C	z (m)	$\gamma$ kPa/°C	z (m)	$\gamma$ kPa/°C
0	0,067	1 000	0,060	2 000	0,053	3 000	0,047
100	0,067	1 100	0,059	2 100	0,052	3 100	0,046
200	0,066	1 200	0,058	2 200	0,052	3 200	0,046
300	0,065	1 300	0,058	2 300	0,051	3 300	0,045
400	0,064	1 400	0,057	2 400	0,051	3 400	0,045
500	0,064	1 500	0,056	2 500	0,050	3 500	0,044
600	0,063	1 600	0,056	2 600	0,049	3 600	0,043
700	0,062	1 700	0,055	2 700	0,049	3 700	0,043
800	0,061	1 800	0,054	2 800	0,048	3 800	0,042
900	0,061	1 900	0,054	2 900	0,047	3 900	0,042
1 000	0,060	2 000	0,053	3 000	0,047	4 000	0,041

basada en  $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ .