

Ajuste de la estimación de la evapotranspiración de Hargreaves y Samani a la metodología de Penman-Monteith (FAO, 56), para localidades del Noroeste Argentino

Adjusting estimating evapotranspiration Hargreaves and Samani methodology Penman-Monteith (FAO, 56), for locations in Northwestern Argentina

**Moreno, C.A.*¹; Hurtado, R.H.¹; Portal, M.R.¹; Valdiviezo Corte, M.B.¹;
Riquelme, A.¹; Alabar, F.¹; Mayo, H.¹.**

¹ *Cátedra de Agrometeorología FCA-UNJu, Alberdi 47. San Salvador de Jujuy.*

Argentina. CP 4.600.

***Contacto:** carlamoreno0483@hotmail.com

Resumen

La evapotranspiración potencial (ETP) es un parámetro fundamental en el balance de energía tierra-atmósfera e indispensable para la suplementación del agua en el suelo. La metodología más precisa que se reconoce como un estándar es de Penman-Monteith (PM) modificada en FAO 56 (PM-FAO 56), pero una limitante son los numerosos parámetros necesarios para su cálculo. En el noroeste argentino existe dificultad a la hora de estimar la ETP, por escasez de registros. Para éste trabajo se utilizaron siete estaciones meteorológicas, tres de la provincia de Jujuy (La Quiaca, Jujuy Aero y Augusto Romain), tres de Salta (Orán, Tartagal y Salta Aero) y una de Tucumán (Tucumán Aero), para estimar la ETP por PM-FAO 56, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo y Hargreaves y Samani (H-S). El objetivo, es comparar PM-FAO 56, con las demás metodologías, encontrar la que mejor ajusta y obtener una función general para estaciones que no poseen datos suficientes para estimarla por el método de referencia. Los resultados muestran que la ecuación de H-S es la más satisfactoria, con un valor de coeficiente de determinación de 0,88. La distribución espacial de los valores ajustados con la nueva expresión de ETP, aumentan de oeste a este en forma mensual y anual.

Palabras clave: Metodologías, Evapotranspiración Potencial, Comparación, Noroeste Argentino.

Summary

Potential evapotranspiration (ETP) is a fundamental parameter in the balance of Earth-Atmosphere energy and essential for the supplementation of water in the soil. The most precise methodology is Penman-Monteith (PM) modified in FAO 56 (PM-FAO 56), which is recognized as a standard but a limitation is the numerous parameters necessary for its calculation. In the Argentine northwest there is difficulty when estimating the ETP, due to a lack of records. For this work seven meteorological stations were used, three from the province of Jujuy (La Quiaca, Jujuy Aero and Augusto Romain), three from Salta (Oran, Tartagal and Salta Aero) and one from Tucumán (Tucumán Aero), to estimate the ETP by

PM-FAO 56, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo and, Hargreaves and Samani (HS). The objective is to compare PM-FAO 56, with the other methodologies, find the one that best fits and obtain a general function for stations that do not have enough data to be calculated by the reference method. The results show that the H-S equation is the most satisfactory, with a coefficient of determination value of 0.88. The spatial distribution of the adjusted values with the new expression of ETP, increase from west to east on a monthly and annual basis.

Keywords: Methodologies, Potential Evapotranspiration, Comparison, Northwest Argentina.

Introducción

El uso de modelos informáticos en la agricultura para simular condiciones a campo se ha generalizado. Actualmente la mayor parte de ellos, son utilizados para la evaluación de la humedad del suelo, la predicción del rendimiento de los cultivos, la planificación del riego y los estudios hidrológicos, entre otras aplicaciones. Estos modelos emplean el concepto ampliamente aceptado de evapotranspiración potencial (ETP) como función matriz para el cálculo de la evapotranspiración real.

Rosenberg (1974) define a la ETP como la evaporación de una superficie extendida de un cultivo en estado vegetativo y de poca altura, que sombree completamente al suelo, siempre está bien provista de agua y ejerce poca resistencia al flujo de ésta. Existen varios métodos de cálculo de ETP y los mismos generalmente producen resultados similares aunque no idénticos. Hatfield (1996), considera tres categorías: directos, indirectos y de simulación del balance de agua en el suelo. Los primeros utilizan instrumentos como el método gravimétrico, lisimétrico y el evapotranspirómetro de Thornthwaite. Los indirectos estiman el requerimiento de agua en el ciclo vegetativo del cultivo, mediante fórmulas empíricas (Thornthwaite (1948), Turc (1961), Papadakis (1961), Blaney-Criddle (1977)); con base fisicomatemática (Bowen (1926), Penman (1948) y Van Bavel (1968)) o combinación de ambas (Penman-Monteith (1949), Jensen-Haise (1963) y Doorenbos-Pruitt (1977)).

Brutsaert (1982) revisa en detalle los métodos directos de medición de la evapotranspiración, que son costosos y que consumen mucho tiempo. Sin embargo, las estimaciones de evapotranspiración basadas en datos climatológicos disponibles son posibles empleando el concepto de ETP. Este concepto es ampliamente aceptado y fue propuesto por primera vez por Thornthwaite (1944, 1948), quien sugirió que la transpiración de la vegetación abundantemente suministrada con agua procedía de la misma a una velocidad gobernada por las características de la atmósfera. De hecho, el concepto original de Thornthwaite establecía que el ETP era igual al uso consuntivo (necesidad de agua de las plantas) en la agricultura de regadío. A partir de la definición de ETP, se minimizó la variación en la evaporación resultante del componente de la vegetación especificando un crecimiento activo y completo de un dosel de baja altura. Los efectos del contenido de agua del suelo en la evaporación se normalizaron exigiendo que el suelo se suministre abundantemente con agua. Los problemas en la utilización del concepto de ETP están relacionados con el carácter impreciso de la definición, siendo ésta una abstracción. Las tasas de ETP, rara vez prevalecen en la naturaleza. La disponibilidad de agua en la

superficie de evaporación y la concentración de vapor de agua en la atmósfera determinan la velocidad de evaporación. Si se agrega agua a las superficies mediante irrigación o precipitación, se elimina esencialmente toda la variabilidad asociada con la disponibilidad de agua. Debido a que los efectos de la evaporación en superficies bien irrigadas parecen ser esencialmente similares (Gay, 1981), muchos estudios han tratado de estimar la evaporación únicamente a partir de los parámetros medibles de la atmósfera.

De los métodos indirectos de cálculo de ETP, el que más se aproxima al valor medible, es la expresión de Penman-Monteith FAO 56, la cual es considerada como referencia para calibrar otras expresiones de estimación. Autores como Xu & Singh (2001 y 2002), Droogers & Allen (2002), (Bautista et al. (2009) y Vega y Jara (2009) contrastaron los resultados obtenidos por distintos métodos incorporando algunos y ajustando otros en las ecuaciones empíricas, para adaptar los modelos a la realidad local.

En algunos países como Canadá, los métodos más comunes en uso incluyen adaptaciones a la ecuación de Jensen-Haise (1963), a las fórmulas de Baier-Robertson (1965) y a la de Priestley-Taylor (1972), de acuerdo a las sugerencias de FAO 56.

En Estados Unidos de Norteamérica, y específicamente para el estado de La Florida, Douglas et al. (2009), determinaron que las ecuaciones de Priestley-Taylor (1972) y Turc (1961), son las que mejor se adaptan a la de Penman-Monteith FAO 56 (PM-FAO 56). Para las condiciones del Altiplano Boliviano, García et al. (2004), compararon las expresiones de PM, Hargreaves-Samani (H-S) y Thornthwaite, con la ETP de un cultivo de gramíneas, tomado como referencia (ETPo), concluyendo que la mejor expresión la constituye la de PM, seguida por H-S. En Venezuela, Trezza (2008), comparó métodos de estimación de la ETP a nivel mensual para zonas andinas en su país, determinando que la mejor ecuación es la de Hargreaves y Samani (1985), siendo la principal ventaja de ésta, la disponibilidad de información en casi todo el país.

En Argentina, se han contrastado diferentes metodologías de estimación de la ETP con el objetivo de detectar alternativas al método de PM. Ocampo y Rivas (2011), analizaron diferentes expresiones de cálculo para zonas de clima húmedo, semiárido y árido (región pampeana y llanura patagónica). Fernández Long y otros (2014), comparando métodos de ETP concluyen que el método de H-S puede ser aplicado en distintas ecorregiones del país. Sin embargo, no se ha explorado este tipo de comparación para regiones con diferentes características climáticas y fitogeográficas, como ocurre en la provincia de Jujuy.

Los modelos para el cálculo de ETP basados exclusivamente en elementos atmosféricos, dependen de la capacidad de ellos para producir estimaciones consistentes y significativas de ETP dependiendo de la disponibilidad de información de las variables atmosféricas. La ecuación de PM presenta la limitación de necesitar para su estimación numerosos parámetros, sin embargo, es reconocida como un estándar para compararla con otras ecuaciones propuestas por distintos autores. Por otro lado, están aquellas más simples, que requieren sólo temperatura del aire y latitud del lugar (Thornthwaite, 1948), aunque en la mayoría de los casos, no estiman adecuadamente la demanda atmosférica. Una alternativa es la utilización del método de H-S, el cual es de uso general y sólo precisa el valor de la radiación astronómica y registros de temperatura media, máxima y mínima, datos de fácil

obtención para nuestras zonas de producción. El mismo ha sido comparado con éxito con la ETP- PM, ajustando sus resultados adecuadamente.

El objetivo de este trabajo es estimar la ETP por tres métodos diferentes, contrastarla con la de Penman-Monteith FAO 56 y obtener una función general aplicable a localidades del noroeste argentino que no poseen datos climáticos.

Materiales y métodos

Para estimar la evapotranspiración por las metodologías de Penman-Monteith sugerida por Allen et al (2006) en FAO 56 (PM-FAO 56) y de Hargreaves-Samani (H-S), se han utilizado datos provenientes de una estación de la Cátedra de Agroclimatología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Jujuy en convenio con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de seis estaciones pertenecientes al SMN localizadas en las provincias de Jujuy, Salta y Tucumán, (cuadro 1 y figura 1).

Cuadro 1: Georreferenciación y altura sobre el nivel del mar de las estaciones en estudio.

Estaciones	Latitud	Longitud	asnm
1. Romaín	-24,20	-65,32	1259
2. La Quiaca	-22,10	-65,60	3458
3. Jujuy Aero	-24,38	-65,12	936
4. Orán Aero	-23,13	-64,33	362
5. Tartagal Aero	-22,53	-63,82	502
6. Tucumán Aero	-26,80	-65,20	426
7. Salta Aero	-24,78	-65,40	1187

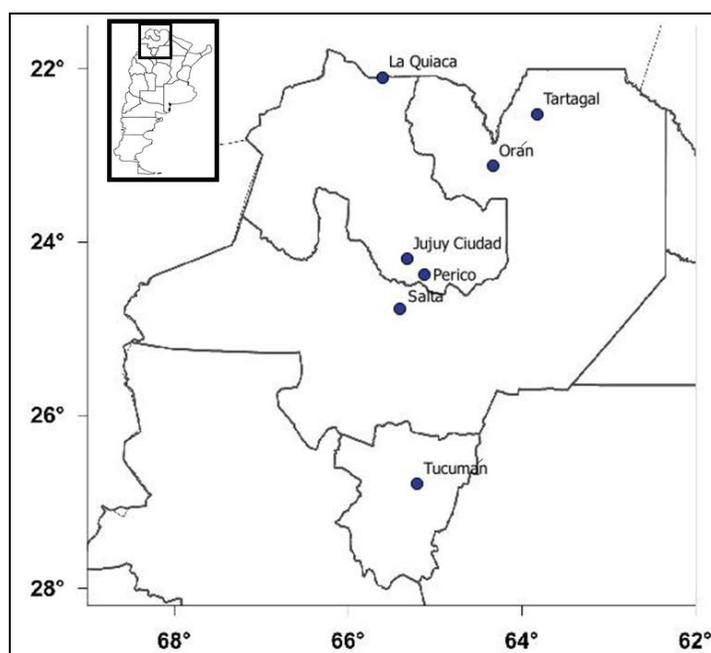


Figura 1: Ubicación de las estaciones utilizadas para estimar la ETP-PM.

La información corresponde al periodo 1986 -2017. Para ajustar la expresión ETP por H-S, se ha trabajado con datos de temperaturas medias mensuales de 355 localidades (Figura 2) de las provincias de Jujuy, Salta y Tucumán (Bianchi y Yañez, 1994). Las temperaturas mínimas medias mensuales se obtuvieron de Pascale y otros (2001) para las mismas localidades, y las temperaturas máximas medias mensuales se calcularon por diferencia del doble de la temperatura media mensual y la temperatura mínima mensual.

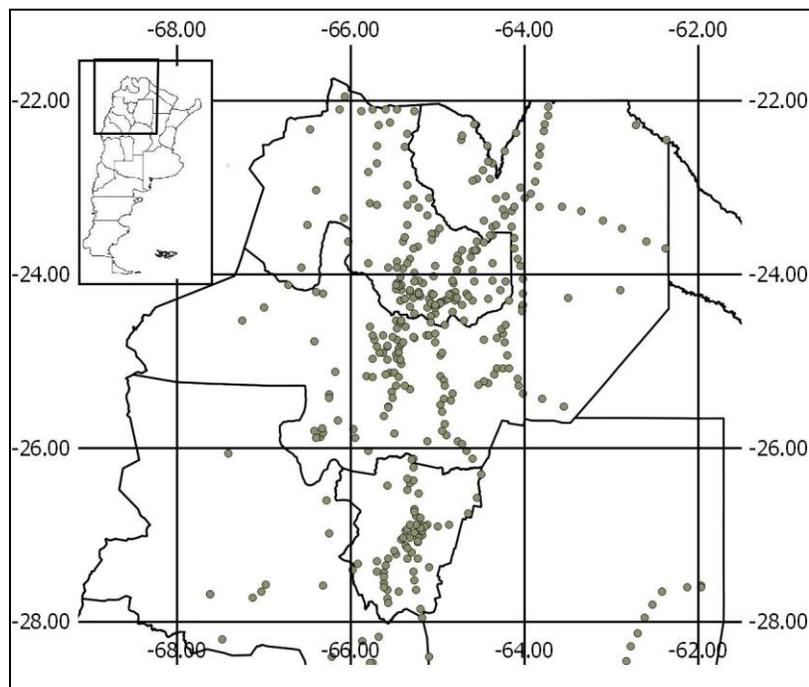


Figura 2: Ubicación de las estaciones con información de temperatura máxima, mínima y media estimadas por Bianchi y Yañez, (1994); y Pascale y otros, (2001).

Para determinar la expresión de estimación de ETP que mejor se aproxima a la ecuación de Penman-Monteith FAO 56 (PM-FAO 56) se han utilizado las de: Thornthwaite, 1948 (TH); Thornthwaite-Camargo, 1971 (TH-C) y Hargreaves y Samani, 1985 (H-S). Las variables utilizadas para cada ecuación figuran en el cuadro 2.

Cuadro 2: Variables utilizadas en cada modelo para cálculo de la EPT.

Ecuaciones	Lat.	T med	T max	T min	HR	Vv	He	Ra	e
PM-FAO 56	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TH	x	x							
T-C	x	x	x	x					
H-S	x	x	x	x				x	

Referencias: Latitud (Lat.), Temperatura media (T med), Temperatura máxima (T max), Temperatura mínima (T min), Humedad relativa (HR), Velocidad del viento (Vv), Heliofanía efectiva (He), Radiación astronómica (Ra) y Tensión de Vapor Actual (e).

La función de ajuste que mejor se asocia entre la ETP de PM-FAO 56 y las demás ecuaciones de estimación, se obtuvo mediante una función lineal, con significancia estadística al 99% (t de Student), a través del coeficiente de correlación (R), cuyos parámetros empíricos de ajustes se aplicaron posteriormente a las estaciones con información de temperatura únicamente.

A continuación, se calcularon las diferencias entre los valores de evapotranspiración de los métodos PM-FAO 56 y $H-S_{mod-PM}$ para cada estación en forma porcentual.

Mediante la metodología de interpolación denominada Kriging con el software Surfer v.10, se representó espacialmente para las provincias de Jujuy y Salta, la ETP ajustada en forma mensual y anual a través de isolíneas.

Resultados y discusión

El cuadro 3, muestra las asociaciones entre los diferentes modelos de estimación de ETP y el de PM-FAO 56, con un nivel de significancia del 99%. Como se puede observar, la relación que mejor ajusta es la obtenida por Hargreaves-Samani (1985), con valores de correlación de 0.93 para la estación Jujuy Aero a 0.99 para las estaciones de Tucumán Aero y Orán Aero, al igual que las estimadas por Trezza (2008) y Fernández Long y otros (2014).

Cuadro 3: Coeficientes de correlación (R) entre Penman-Monteith (PM-FAO 56) y Thornthwaite (TH), Thornthwaite – Camargo (TH-C) y Hargreaves-Samani (H-S), para las distintas estaciones del NOA y significancia estadística (SE) al 99 % (**).

Estaciones	Penman-Monteith FAO 56	TH	SE	TH-C	SE	H - S	SE
Romain		0,90	**	0,92	**	0,97	**
La Quiaca		0,77	**	0,77	**	0,98	**
Jujuy Aero		0,70	**	0,92	**	0,93	**
Orán Aero		0,87	**	0,98	**	0,99	**
Tartagal Aero		0,78	**	0,96	**	0,97	**
Tucumán Aero		0,86	**	0,97	**	0,99	**
Salta Aero		0,79	**	0,96	**	0,98	**

De los tres métodos analizados el que más información meteorológica necesita es Hargreaves-Samani (1985), seguido por Thornthwaite y Camargo (1971) y por último la ecuación de Thornthwaite (1948). El primero considera parámetros térmicos (temperaturas máximas, mínimas y medias) y radiación astronómica, que varía con la latitud y época del año. En coincidencia con Trezza (2008), la mejor relación entre PM-FAO 56 y H-S estuvo dada por el término radiativo.

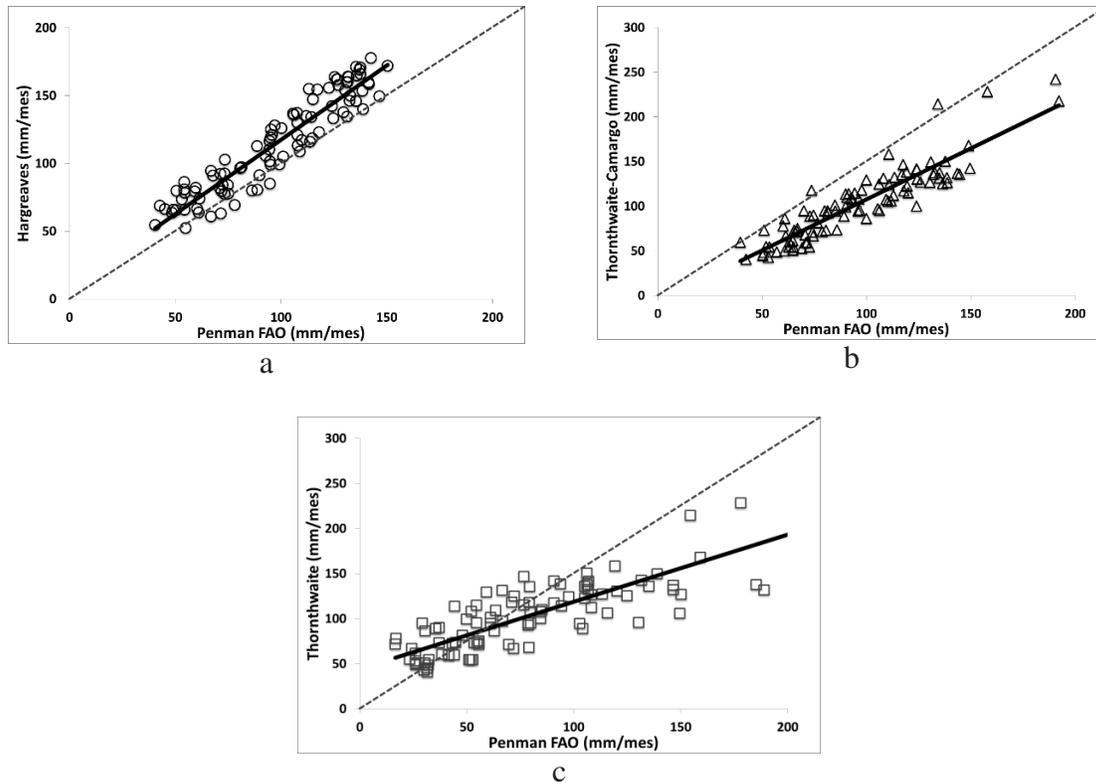


Figura 2 a, b y c: Dispersión entre los métodos de H-S (a), T-C (b), TH (c) con el de PM-FAO 56, para las siete estaciones en estudio.

Los resultados de los modelos comparados con el de referencia, muestran que la mejor dispersión respecto a la relación 1:1, es la calculada por el método de H-S ($r^2 = 0,8806$), aún cuando se observa una sobreestimación (Fig. 2a). El segundo modelo de dispersión con mejor ajuste ($r^2 = 0,8218$), es TH-C, que muestra una subestimación de la ETP (Fig. 2b); en tanto que Thornthwaite comparado con la ecuación de referencia ($r^2 = 0,6805$), presenta una sobreestimación para valores de ETP que no superan los 100 mm y una subestimación para aquellos superiores al mismo (Fig. 2c). La principal diferencia entre estos últimos modelos, TH y PM-FAO56, se debe a los parámetros considerados; el primero solo utiliza la temperatura y la latitud para obtener el índice térmico y el coeficiente de ajuste respectivamente, mientras que la estimación de la ETP por PM-FAO 56 tiene un fundamento fisicomatemático que incluye, un balance de radiación, velocidad del viento y déficit de saturación. De esta forma, el algoritmo de la expresión de H-S ajustado a la de PM-FAO 56 para las estaciones en estudio queda determinado por la siguiente expresión (Ecuación 1):

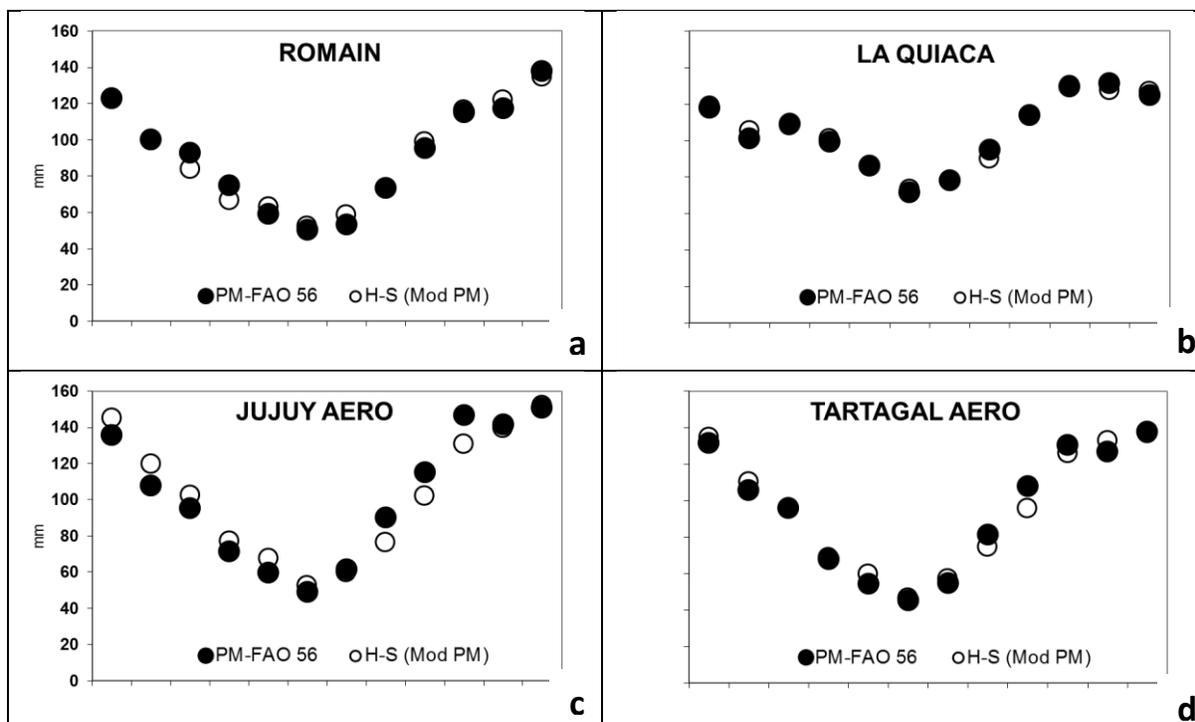
$$\mathbf{H-S}_{(mod-PM)} = \mathbf{1.0941x (H-S) + 8.0256} \quad \text{Ec. 1}$$

Posteriormente se aplicó esta ecuación para estimar la ETP según H-S para las 355 localidades de las provincias de Jujuy, Salta y Tucumán, con los datos de temperatura publicados por Bianchi y Yañez (1994) y Pascale y otros (2001).

La cuantificación porcentual anual de las diferencias entre los valores de la ecuación alternativa de H-S $_{(mod PM)}$ respecto a PM-FAO 56, muestra para la estación Jujuy Aero, un 15.8 % respecto a la de referencia, en los meses de febrero, mayo, agosto y octubre, ocurriendo el máximo contraste en el primer mes. Tartagal Aero y Tucumán Aero, presentaron diferencias superiores al 8% en los meses de febrero, mayo, agosto y septiembre; y febrero, junio y octubre, respectivamente. Mientras que para Salta Aero la misma es de 4.2% y Romañín de 6.1%. Las localidades que mostraron menor diferencia porcentual son La Quiaca y Orán Aero con 1.7 y 3.3 respectivamente (Cuadro 4 y figuras 3 a, b, c, d, e, f y g).

Cuadro 4: Diferencia porcentual anual de H-S $_{(mod PM)}$ respecto a PM-FAO 56 para las estaciones estudiadas.

Estaciones	Diferencia porcentual anual de H-S $_{(mod PM)}$ respecto a PM-FAO 56
Romañín	6.1
La Quiaca	1.7
Jujuy Aero	15.8
Orán Aero	3.3
Tartagal Aero	9.3
Tucumán Aero	8.1
Salta Aero	4.2



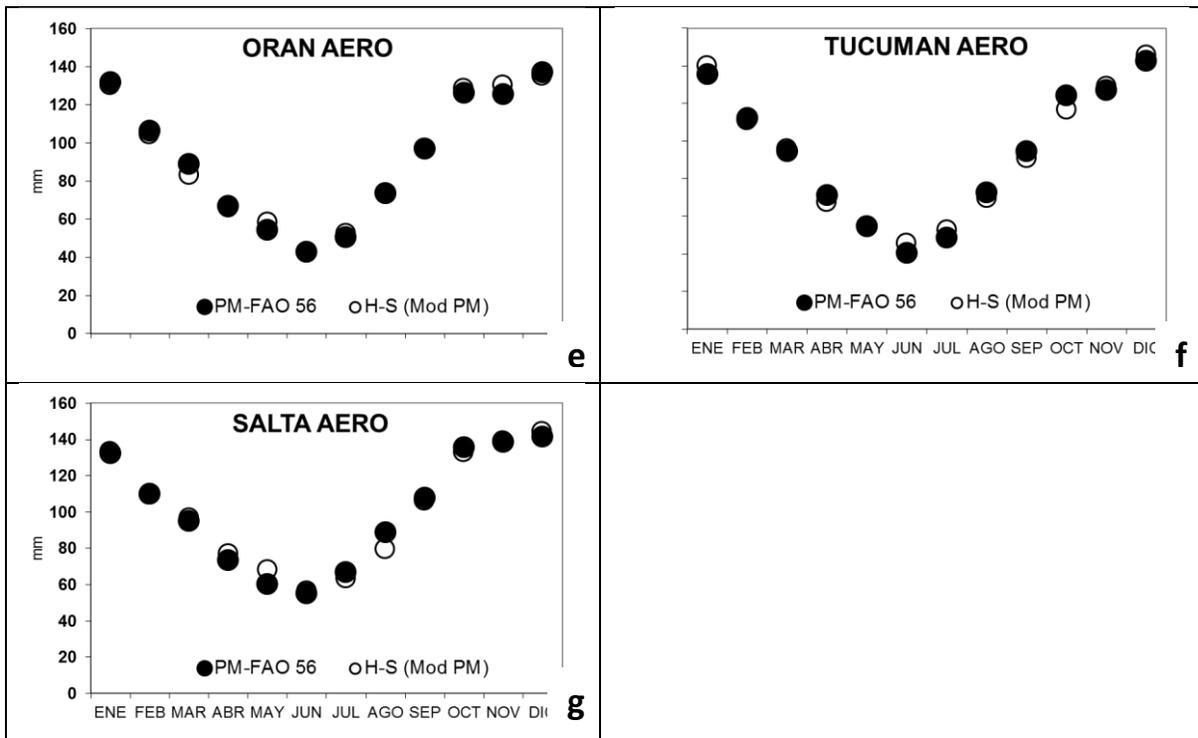


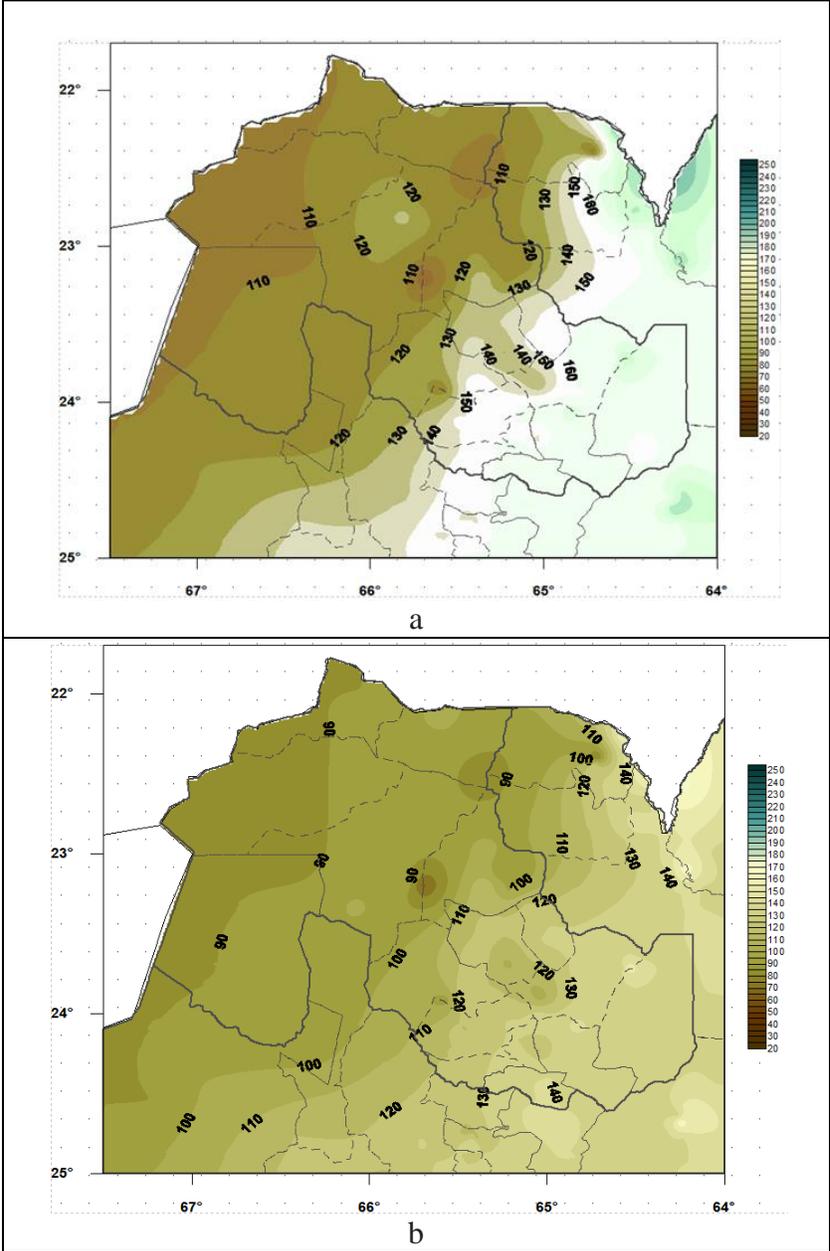
Figura 3 a, b, c, d, e, f y g: Comparación de ETP obtenidos por H-S (mod PM) y PM-FAO 56 en las estaciones Romain (a), La Quiaca (b), Jujuy Aero (c), Tartagal Aero (d), Orán Aero (e), Tucumán Aero (f) y Salta Aero (g).

Con los valores modificados por la ecuación alternativa de H-S (mod PM), aplicados a las 355 estaciones, se representó la ETP en mapas de isolíneas por mes y anual. En las figuras 4 a, b, c, d, e y f; se observan las ETP para los meses de enero a marzo, y de julio a septiembre, respectivamente. En la figura 4 g, se muestra la variación espacial de la evapotranspiración media anual.

En la figura 4 a, correspondiente al mes de enero, la ETP H-S (mod PM) aumenta de oeste a este, de 110 a 160 mm desde la región de la Puna hacia los Valles. En la Prepuna y Puna (departamentos de Rinconada, Suques, Santa Catalina, Cochinoca, Yavi, parte norte de Humahuaca y Tilcara), la ETP fluctúa entre 110-120 mm. En la Quebrada (Tumbaya, Humahuaca y Tilcara) varía entre 120 a 150 mm; en tanto en la región de los Valles templados (departamentos de Dr. Manuel Belgrano, El Carmen, San Pedro, San Antonio, Pálpala) y Selva de transición (departamentos de Santa Bárbara, Ledesma y Valle Grande.) la fluctuación es de 150 a 160 mm (Bianchi y Bravo, 2008).

En el mes de febrero (figura 4 b), la ETP aumenta de 90 mm a 140 mm en el mismo sentido que el mes de enero (oeste – este), manteniéndose la misma amplitud (50 mm). Se observa que los valores mínimos suceden en la región puneña, mientras que en la zona de los Valles y Selva son superiores a 130 mm.

La figura 4 c, correspondiente al mes de marzo, la ETP media varía de noroeste a noreste de la provincia, con registros de 90 mm en la Puna hasta 130 mm en el departamento Santa Bárbara.



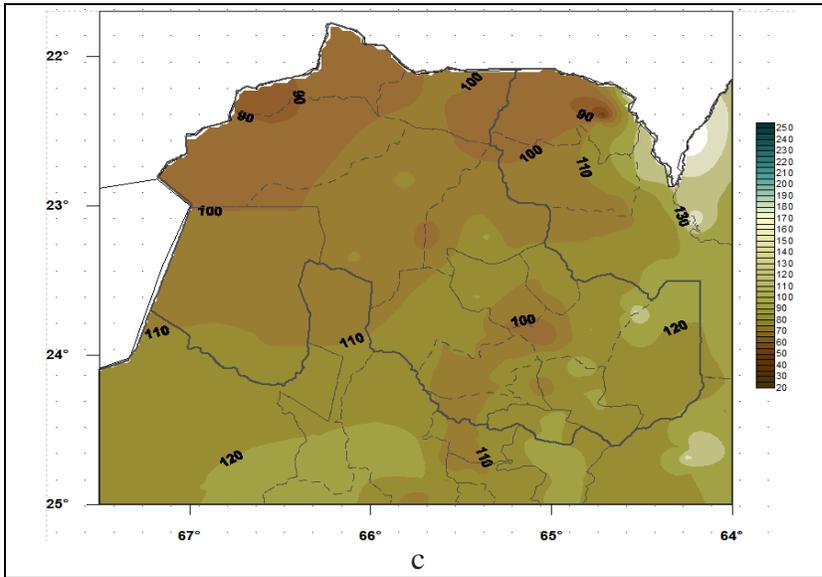
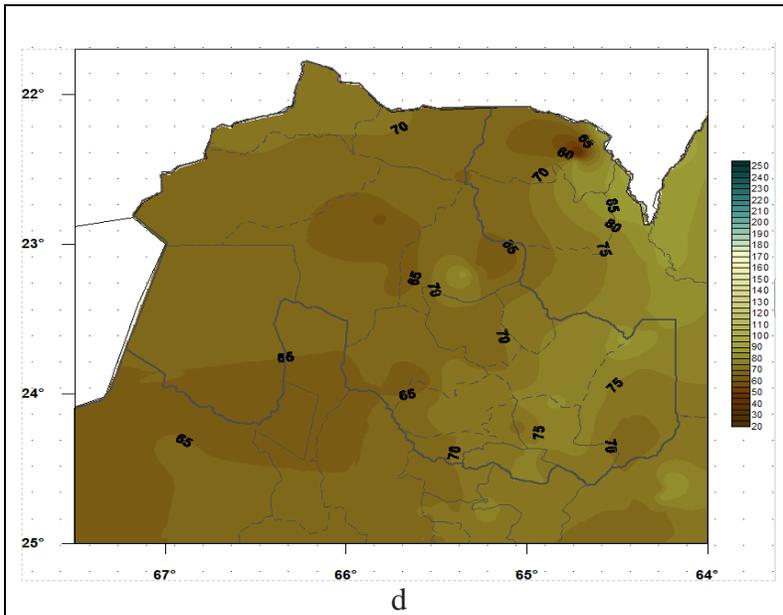


Figura 4 a, b y c: ETP media de los meses de enero (a), febrero (b) y marzo (c), para la provincia de Jujuy.



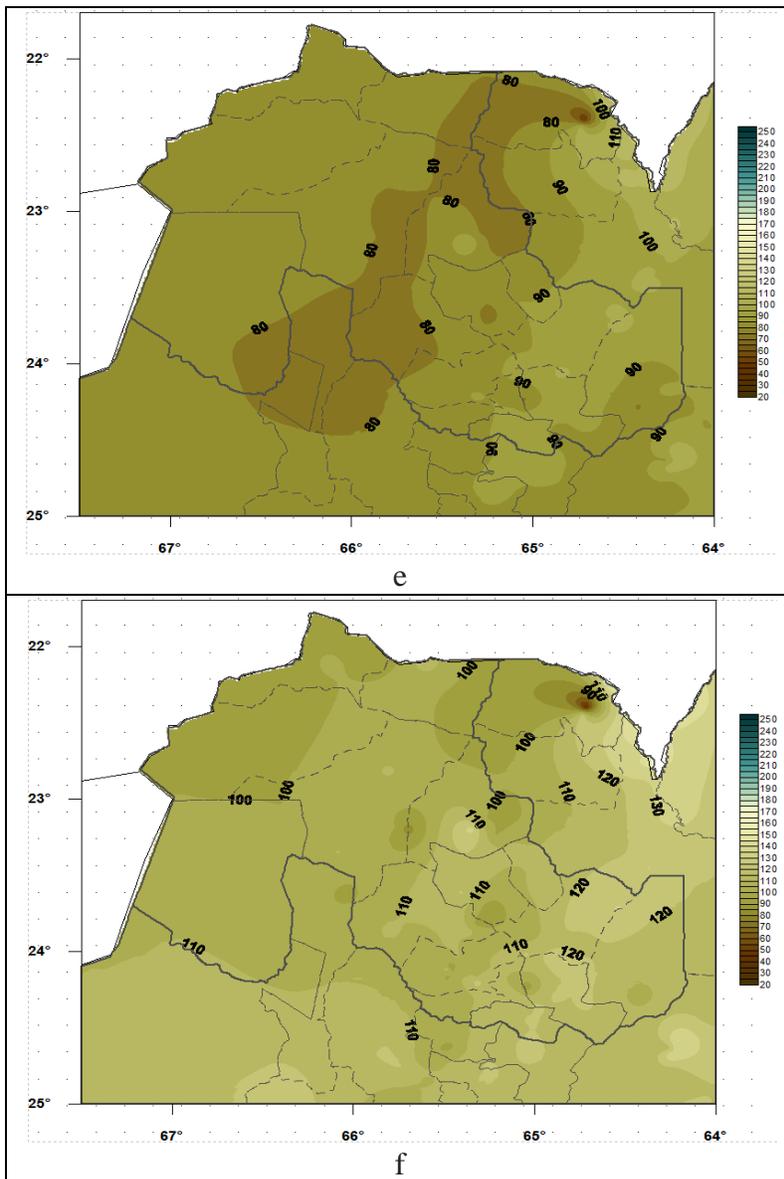
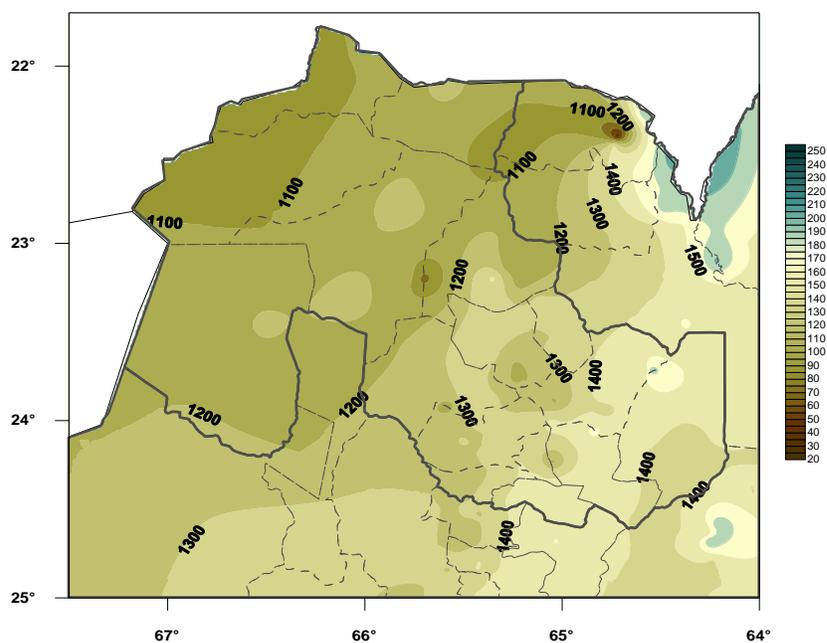


Figura 4 d, e y f: ETP media de los meses de julio (d), agosto (e) y septiembre (f), para la provincia de Jujuy.

Durante los meses de julio y agosto se observa uniformidad en los valores de EPT media (figuras 4 d, e) mientras que en setiembre (figura 4 f) el incremento de EPT se mantiene en el sentido noroeste - sudeste de la provincia (100 a 130mm) como en los meses de enero a marzo aunque de menor magnitud.



8

Figura 4 g: ETP media anual para la provincia de Jujuy.

La ETP media anual de la provincia de Jujuy (Fig. 4 g), oscila entre los 1100 y 1500 mm, incrementándose desde la Puna hacia los Valles.

Conclusiones

Hargreaves- Samani resultó el método más satisfactorio para estimar la demanda atmosférica en aquellas localidades que no poseen los datos suficientes para utilizar el método de Penman-Montieth PM- FAO56.

Para cada estación estudiada, la asociación entre ambos métodos fue altamente significativa ($R=0,98$ La Quiaca Aero y Salta Aero, y $R=0,99$ Tucumán Aero).

La función general para determinar el ajuste que debe aplicarse a la expresión de Hargreaves y Samani, surge de la relación lineal del análisis de todas las estaciones que poseían información para estimar ETP por la metodología de Penman-Montieth PM-FAO56; esta relación ($R^2 = 0,8806$), la cual queda expresada por la ecuación 1, cuyos coeficientes de ajuste promueven que los valores estimados por este algoritmo sean superiores a los originales.

Las isolíneas de ETP ajustadas por H-S, reflejan un incremento de noroeste a sudeste, durante todos los meses, inclusive en el valor medio anual. El mes de enero es el que presenta la mayor variación, y julio la menor.

Este trabajo será ajustado con la incorporación de nuevas estaciones, que perfeccionen la distribución espacial de la demanda atmosférica. Con la información obtenida, se espera estimar la variación temporal del agua en el suelo, mediante un modelo de balance hídrico.

Bibliografía

Allen, R.G; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. *FAO*. Roma. ISBN 92-5-304219-2.

Baier, W. & Robertson, G.W. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Can. J. Plant Sci* 45: 276-284.

Bautista, F.; Bautista, D. & Delgado-Carranza, C. 2009. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera* 22, 4: 333-348.

Bianchi, A. & Bravo, G. 2008. Ecorregion Norandina. Descripción, Subregiones, Agroecosistemas, Sistemas productivos y Cartografía regional. *Ediciones INTA*. En: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-ecorregion_norandina.pdf

Bianchi, A.R.; Nieva, I.J. & Yáñez, C.E. 1994. Un modelo simple de regresión lineal para la estimación de temperaturas medias mensuales regionales. *RIA. INTA*. Argentina 25, 3: 35-54.

Blaney, H. & Criddle, W. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil conservation service technical paper 96, Soil conservation service. *US Department of Agriculture*, Washington.

Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review* 27: 779–787.

Brutsaert, W.H. 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. Deidel Publishing Company. *Springer Netherlands*. 299.

Camargo, A. P. 1971. Balanço hídrico no estado de São Paulo. Campinas: IAC. *Boletim* 11. 624.

Camargo, A. P.; Marin, F.R.; Sentelhas, P. C. & Picini, A. G. 1999. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria 7, 2, 252-257.

Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Food and Agriculture. *Organização of the Nações Unidas*. Rome. 154.

Douglas, E. M.; Jacobs, J. M.; Sumner D. M. & Ray, R. L. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types. *Journal of Hydrolog* 373: 366–376.

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

- Fernández Long, M. E.; Cañas, S.; Ocampo, D. & Rivas, R. 2014. Estimación de la evapotranspiración potencial en la Argentina: comparación de metodologías. *Libro de acta de la I Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología*. UniRio. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Córdoba. Argentina. 45-46. ISBN: 978-987-688-082-4.
- García, M.; Raes, D.; Allen, R. & Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agric. For. Meteorol* 125:67-82.
- Gay, L.W. 1981. Potential evapotranspiration for deserts in: Water in deserts ecosystems. D. D. Evans and J.L. Thames. Editors. *School of Renewable Natural resources*. University Arizona. Tucson. Arizona. USA. 172-194.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transaction of American Society of Civil Engineers* 1, 2: 96-99.
- Hatfield, J.L. & Allen, R.G. 1996. Evapotranspiration Estimates Under Deficient Water Supplies. Journal irrigation and drainage engineering. *American Society of Civil Engineers* 122, 5:301–308.
- Jensen, M. E. & Haise, H. R. 1963. Estimation of Evapotranspiration from Solar Radiation. Journal of Irrigation and Drainage Division. *American Society of Civil Engineers* 89, 15–41.
- Ocampo, D. & Rivas, R. 2011. Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en argentina: aplicación en zonas húmedas y áridas. *Cuadernos del Curiham* 17: 33-41.
- Papadakis, J. 1961. Climatic Tables for the World. Buenos Aires. 175.
- Pascale, A. J.; Damario, E. A. & Hurtado, R. H. 2001. Frío invernal disponible para especies criófilas en el noroeste de la Argentina. *Revista Argentina de Agrometeorología* 1,2:13-20.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Londres* 193, 120-146.
- Priestley C. H. & Taylor, R. J. 1972. On the Assessment of Surface HeatFlux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review* 100, 2: 81-92.
- Rosenberg, N. J. 1974. Microclimate. Air temperature and Sensible heat transfer. The biological environment. John Wiley. *New York*. USA. 94-117.
- Thornthwaite, C. W. & Mather, J. R. 1955. The water budget and its use in irrigation. *Agriculture department*. 346-358.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review* 38: 55-94.

Thornthwaite, C. & Wilm, H. 1944. Report of the Committee on transpiration and evaporation. *Transactions American Geophysical Union* 25: 683-693.

Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar? *Revista Bioagronomía* 20,2:89-95.

Turc, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Annales Agronomique* 12, 1: 13-49.

Van Bavel, C. H. & Ehler, W.L. 1968. Water loss from a sorghum field and stomatal control. *Journal Agronomy* 60: 84-86.

Vega, E. J. & Jara, J. C. 2009. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador. *Engenharia Agrícola* 9, 3: 390-403.

Xu, C. Y. & Singh, V. P. 2001. Evaluation and Generalization of Radiation-based Methods for Calculating Evaporation, *Hydrolog. Processes* 15, 305–319.

Xu, C.Y. & Singh, V. P. 2000. Evaluation and Generalization of Radiation-based Methods for Calculating Evaporation', *Hydrolog. Processes* 14, 339–349.

ANEXO

Cuadro 1: Georreferenciación y altura sobre el nivel del mar de las estaciones en estudio.

Estaciones	Latitud	Longitud	a. s n m
1. Romañ	-24,20	-65,32	1259
2. La Quiaca	-22,10	-65,60	3458
3. Jujuy Aero	-24,38	-65,12	936
4. Orán Aero	-23,13	-64,33	362
5. Tartagal Aero	-22,53	-63,82	502
6. Tucumán Aero	-26,80	-65,20	426
7. Salta Aero	-24,78	-65,40	1187

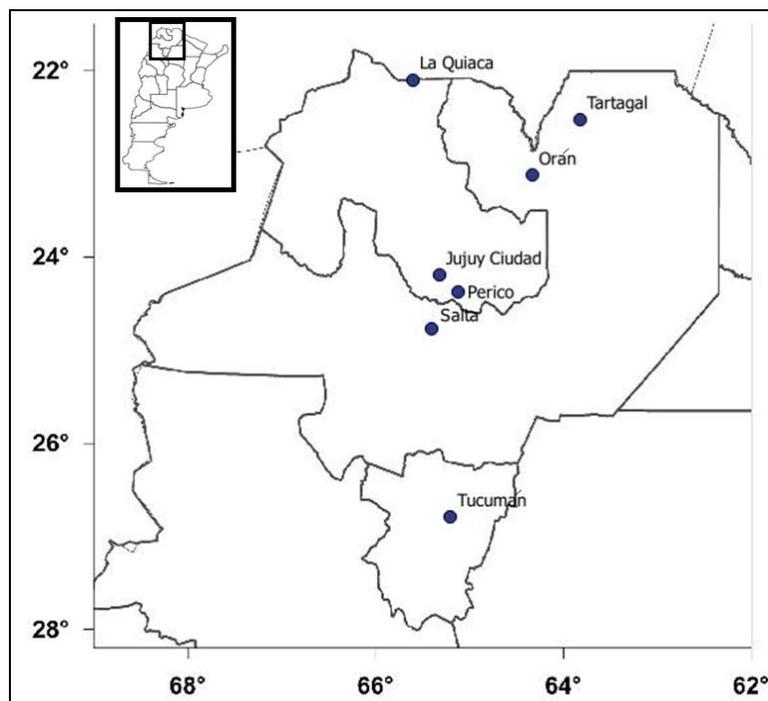


Figura 1: Ubicación de las estaciones utilizadas para estimar la ETP-PM.

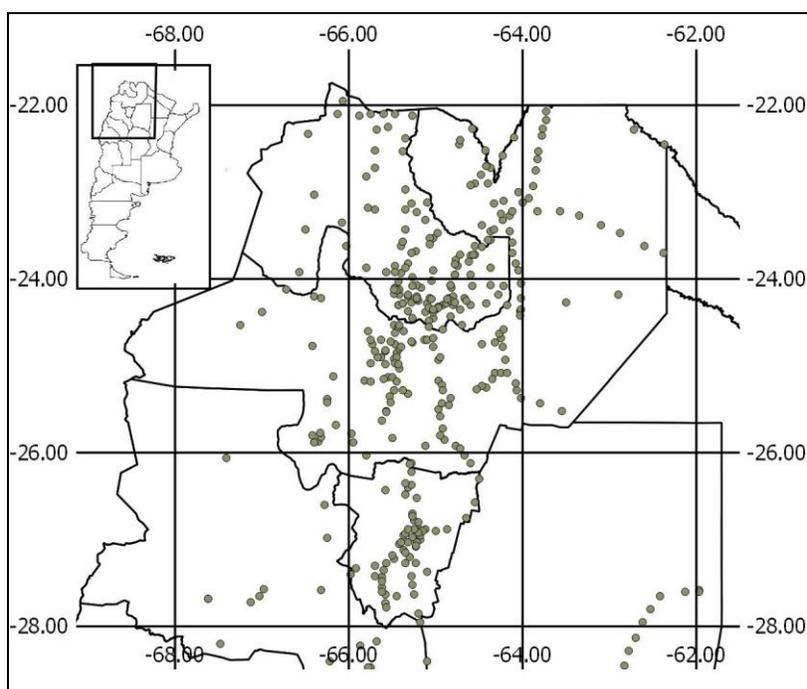


Figura 2: Ubicación de las estaciones con información de temperatura máxima, mínima y media estimadas por Bianchi y Yañes, (1994); y Pascales y otros, (2001).

Cuadro 2: Variables utilizadas en cada modelo para cálculo de la EPT.

Ecuaciones	Lat.	T med	T max	T min	HR	Vv	He	Ra	e
PM-FAO 56	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TH	x	x							
T-C	x	x	x	x					
H-S	x	x	x	x				x	

Cuadro 3: Coeficientes de correlación (R) entre Penman-Monteith (PM-FAO 56) y Thornthwaite (TH), Thornthwaite – Camargo (TH-C) y Hargreaves-Samani (H-S), para las distintas estaciones del NOA y significancia estadística (SE) al 99 % (**).

Estaciones		TH	SE	TH-C	SE	H - S	SE
Romain	Penman-Monteith FAO 56	0,90	**	0,92	**	0,97	**
La Quiaca		0,77	**	0,77	**	0,98	**
Jujuy Aero		0,70	**	0,92	**	0,93	**
Orán Aero		0,87	**	0,98	**	0,99	**
Tartagal Aero		0,78	**	0,96	**	0,97	**
Tucumán Aero		0,86	**	0,97	**	0,99	**
Salta Aero		0,79	**	0,96	**	0,98	**

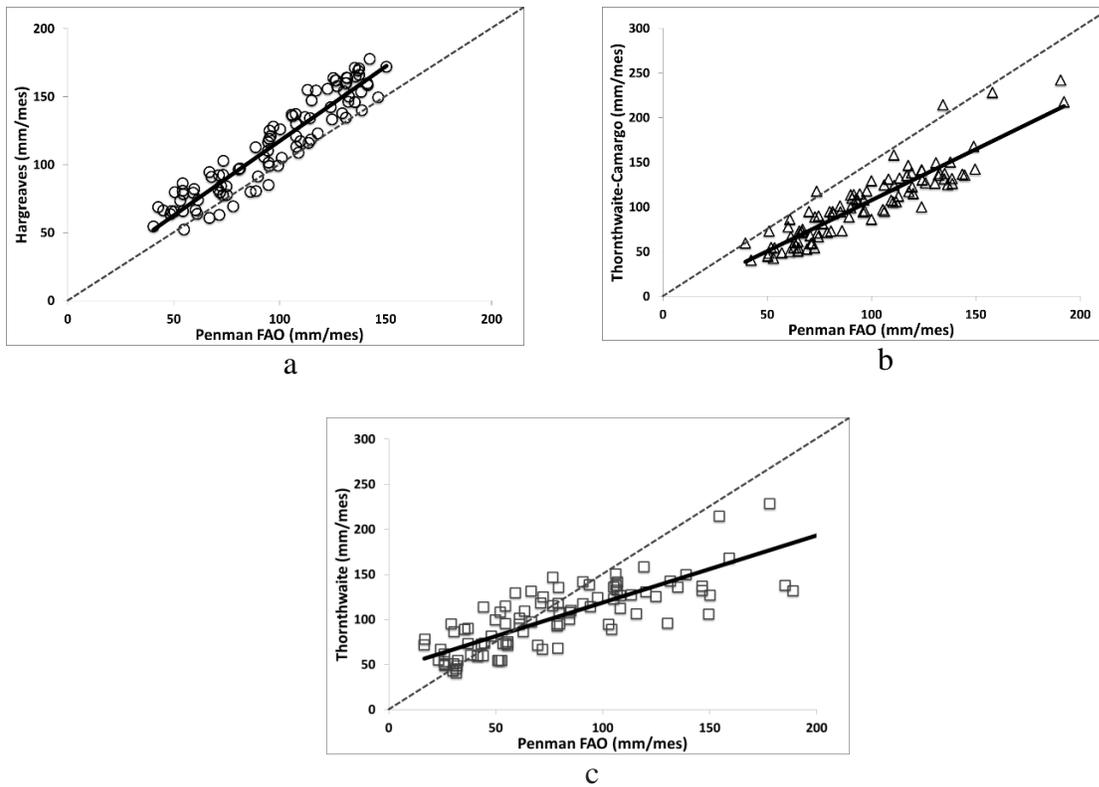


Figura 2 a, b y c: Dispersión entre los métodos de H-S (a), T-C (b), TH (c) con el de PM-FAO 56, para las siete estaciones en estudio.

Cuadro 4: Diferencia porcentual anual de H-S _(mod PM) respecto a PM-FAO 56 para las estaciones estudiadas.

Estaciones	Diferencia porcentual anual de H-S _(mod PM) respecto a PM-FAO 56
Romaín	6.1
La Quiaca	1.7
Jujuy Aero	15.8
Orán Aero	3.3
Tartagal Aero	9.3
Tucumán Aero	8.1
Salta Aero	4.2

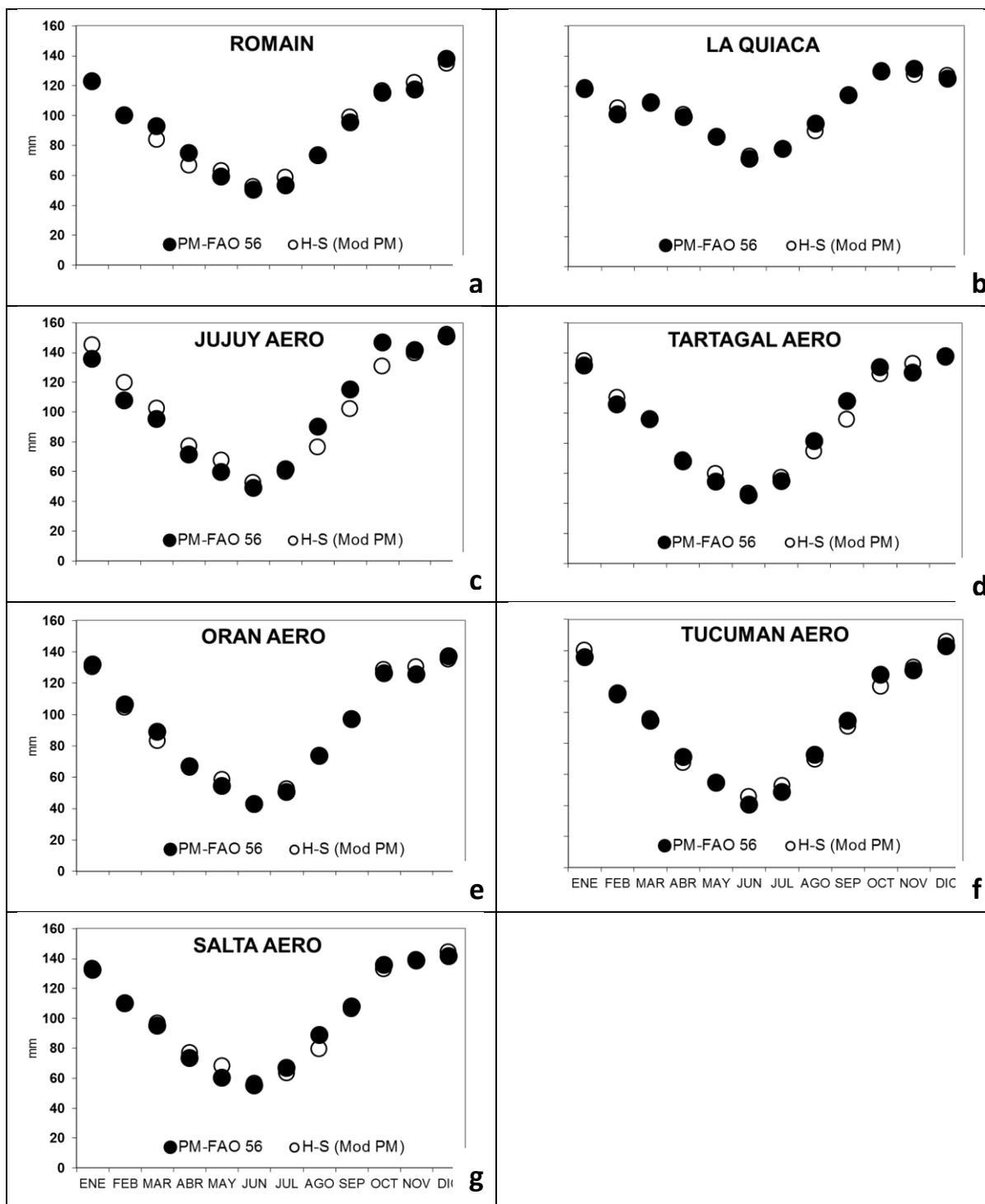


Figura 3 a, b, c, d, e, f y g: Comparación de ETP obtenidos por H-S (mod PM) y PM-FAO 56 en las estaciones Romain (a), La Quiaca (b), Jujuy Aero (c), Tartagal Aero (d), Orán Aero (e), Tucumán Aero (f) y Salta Aero (g).

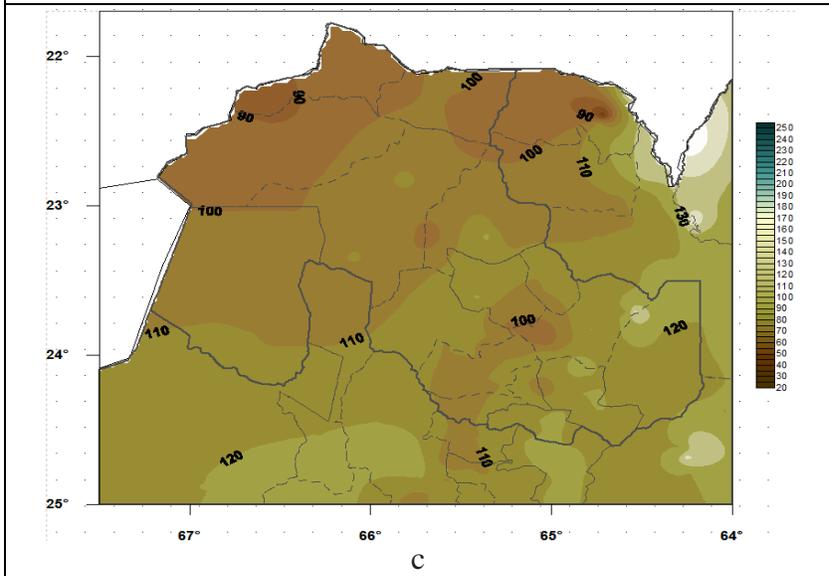
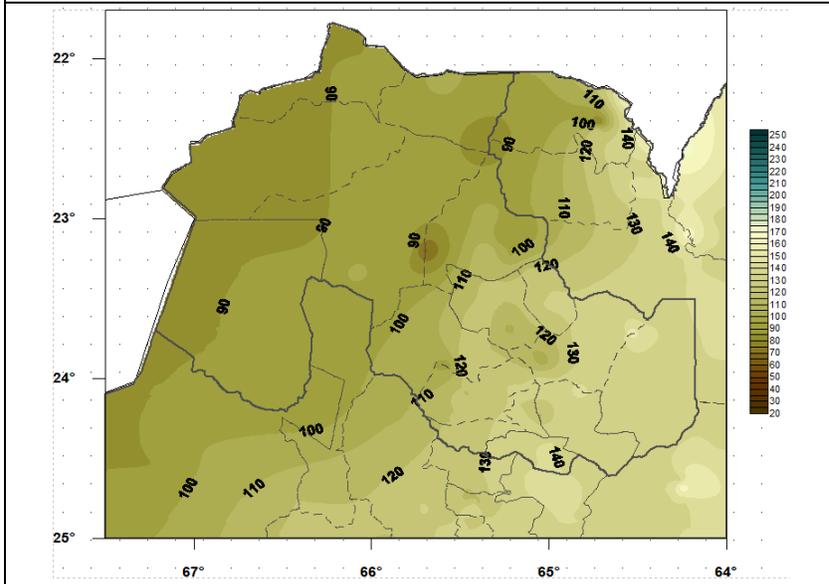
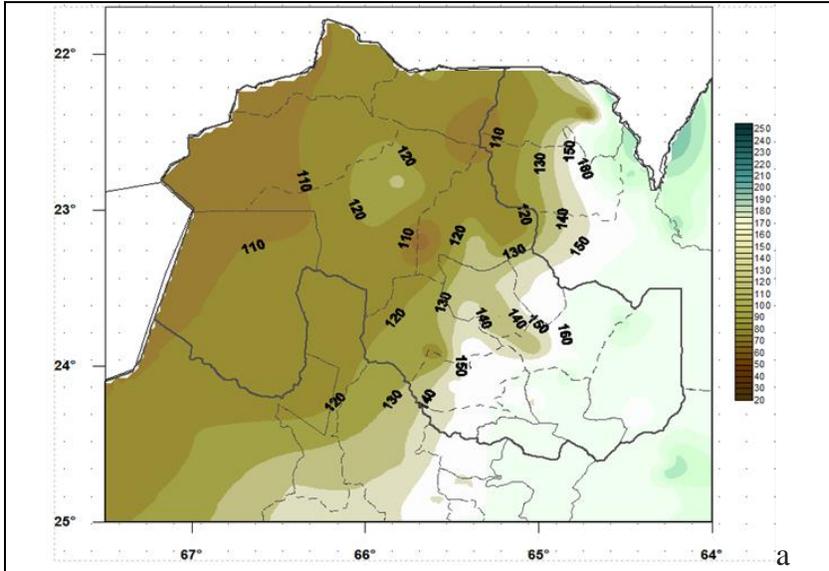


Figura 4 a, b y c: ETP media de los meses de enero (a), febrero (b) y marzo (c), para la provincia de Jujuy.

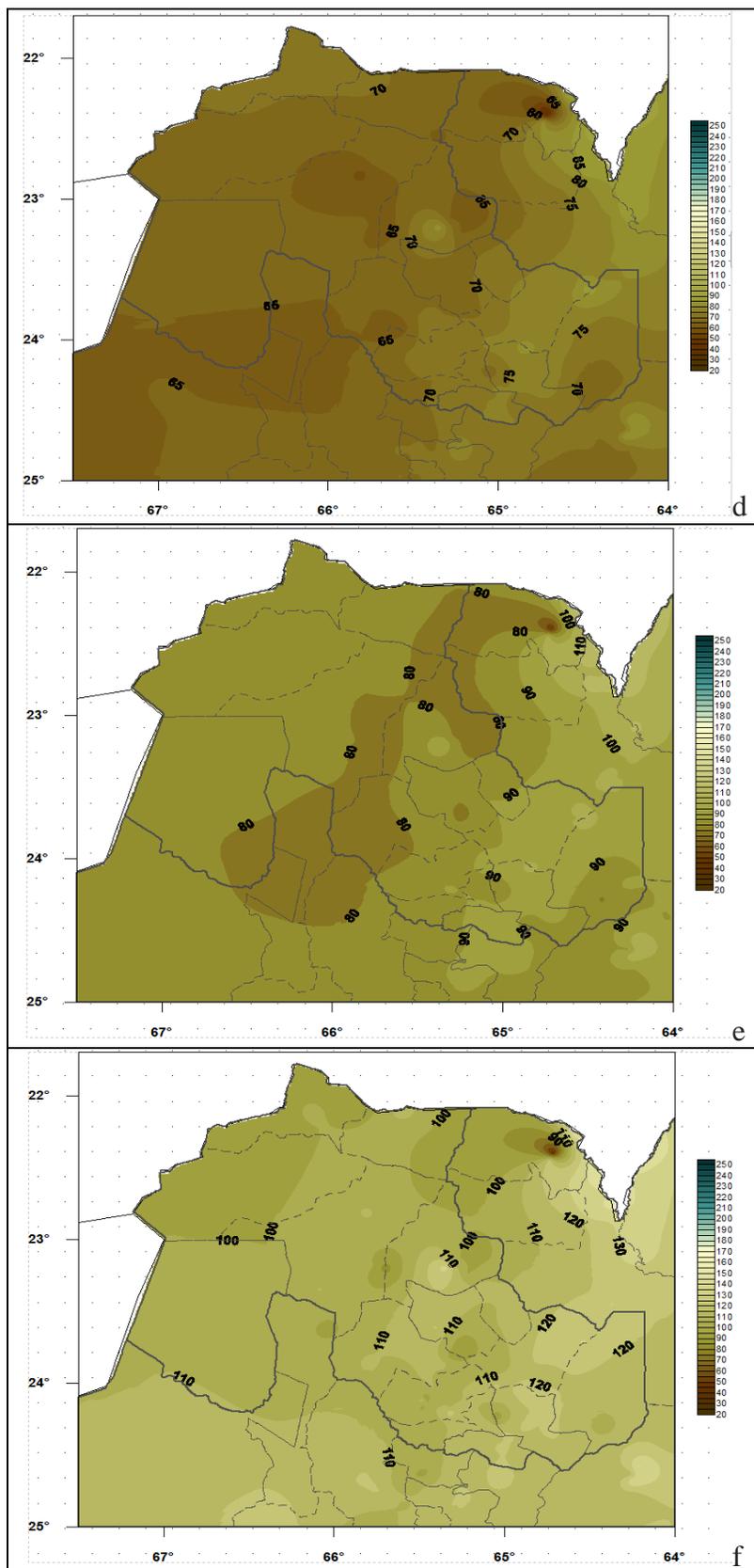


Figura 4 d, e y f: ETP media de los meses de julio (d), agosto (e) y septiembre (f), para la provincia de Jujuy.

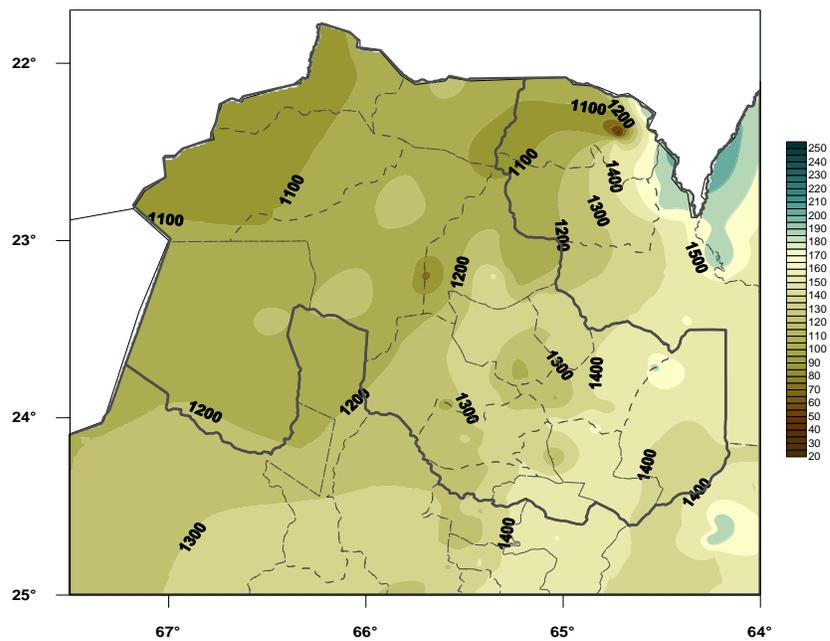


Figura 4 g: ETP media anual para la provincia de Jujuy.