

Tecnologías experimentales para el cálculo de evapotranspiración - Caso del Valle Central de Catamarca, Argentina

Analía Isabel Argerich¹, Cristina Isabel Rivero², Flavio Sergio Fama³

(1) Laboratorio de Tecnologías de Información Geográfica (LatinGEO), Universidad Nacional de Catamarca.
anargerich@tecno.unca.edu.ar

(2) Departamento de Agrimensura, Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca.
crisisarivero@yahoo.com.ar

(3) Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas, Universidad Nacional de Catamarca.
ffama@unca.edu.ar

Fecha de recepción del trabajo: 13/10/2015
Fecha de aceptación del trabajo: 26/02/2016

RESUMEN: La evapotranspiración (ET) consiste en un intercambio de energía suelo-atmósfera, y para estimarla se aplican determinaciones instrumentales, métodos empíricos o fórmulas semiteóricas. Entre los métodos más utilizados en Argentina, se destaca la fórmula de Thornthwaite (1948), la fórmula de Turc (1961) y la de Penman (1948), que fue modificada en 1963 (método de Penman-Monteith). El procedimiento de Penman-Monteith ha sido actualizado por FAO en 1990 y permite calcular ET de referencia por combinación de datos meteorológicos y de imágenes satelitales.

En la Provincia de Catamarca (Argentina), el agua constituye un recurso escaso. Sin embargo, las estimaciones de ET se reducen a localidades puntuales, generalmente resueltas por la fórmula de Thornthwaite.

Desde el enfoque de un estudio de caso, se analiza la factibilidad de aplicar nuevas tecnologías experimentales para estimaciones de ET -por el método de Penman-Monteith- en el Valle Central de Catamarca (Argentina).

PALABRAS CLAVES: evapotranspiración; datos meteorológicos; imágenes satelitales; Catamarca; Valle Central

EXPERIMENTAL TECHNOLOGIES FOR THE CALCULATION OF EVAPOTRANSPIRATION – THE CASE OF THE CENTRAL VALLEY OF CATAMARCA (ARGENTINE)

ABSTRACT: Evapotranspiration (ET) consists of a soil-atmosphere energy exchange, and in order to estimate it, instrumental determinations, empirical methods or semi theoretical equations are applied. Among the most used methods in Argentina, the Thornthwaite's formula (1948), the Turc's formula (1961) and the Penman's formula (1948), which was modified in 1963 (Penman-Monteith's method) are highlighted. The Penman-Monteith's procedure has been updated by FAO in 1990 and allows calculating reference ET by combining meteorological information and satellite imagery.

In the Province of Catamarca (Argentina), water constitutes a scanty resource. Nevertheless, ET's estimations are reduced to punctual localities generally solved by Thornthwaite's formula.

Following a case-study approach, feasibility for applying new experimental technologies for ET's estimations -using Penman-Monteith's method- in the Central Valley of the province of Catamarca (Argentina) is analyzed.

KEYWORDS: evapotranspiration; meteorological information; satellite imagery; Catamarca; Central Valley

1 INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración (ET) engloba dos procesos de pérdida de agua de la superficie terrestre: la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Como la evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente, resulta dificultoso todo análisis por separado de cada uno de estos procesos. Debe tenerse en cuenta que la evaporación está dada fundamentalmente por la fracción de radiación solar que incide en el suelo y luego por la humedad

disponible en las capas superficiales de dicho suelo. Así, cuando las cubiertas vegetales no son completas, el agua se pierde fundamentalmente por evaporación, pero a medida que las plantas se desarrollan y alcanzan a cubrir el suelo, la transpiración pasa a ser el fenómeno más importante de pérdida de agua.

Entre los factores que inciden en la intensidad de la ET, se distinguen los elementos meteorológicos –radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, humedad atmosférica–, las características físico-químicas del suelo y el tipo de cubierta vegetal.

La evapotranspiración (ET) consiste en un intercambio de energía suelo-atmósfera, y para estimarla se aplican ya sea determinaciones instrumentales –lisímetros, parcelas o cuencas experimentales, evapotranspirómetros-, métodos empíricos o fórmulas semiteóricas. Las determinaciones instrumentales se reconocen costosas y de difícil aplicación en la práctica. En consecuencia, los métodos empíricos o semiempíricos para calcular ET, han resultado más difundidos.

En la Provincia de Catamarca (Argentina), el agua constituye un recurso escaso. Sin embargo, las determinaciones de evapotranspiración (ET) potencial o real, se reducen a unas pocas localidades puntuales de la provincia, y en general han sido resueltas por métodos empíricos, como la fórmula de Thornthwaite -desarrollada en el año 1948-. Justamente Thornthwaite es quien ha introducido la diferenciación conceptual entre ET potencial y ET real, para hacer referencia en el primer caso, de las pérdidas de agua por ET que pueden presentarse cuando la cubierta vegetal es óptima y el contenido de humedad del suelo corresponde a la máxima capacidad de campo, cuyo ejemplo más típico está dado por los campos de alfalfa de la llanura pampeana de Argentina, inmediatamente después de una abundante precipitación.

La ET real, en cambio, es siempre menor o igual a ET potencial, dado que responde a las condiciones circunstanciales de vegetación y humedad que en la práctica pueden observarse.

Los avances en el estudio y la valoración más precisa del uso de agua de los cultivos, han revelado algunas debilidades en las metodologías propuestas para la estimación de la ET. Distintos investigadores analizaron el funcionamiento de diferentes métodos para diversas localidades y aunque los resultados de tales análisis podrían haber sido influenciados por el sitio, las condiciones de medida o por el sesgo en la recopilación de los datos climáticos, se ha hecho evidente que los métodos no se comportan de la misma manera en diversas zonas del mundo (Allen, 2007).

Para obtener valores de ET de los últimos diez años, correspondientes al Valle Central de la Provincia de Catamarca (Argentina), en función de la metodología que mejor se adapte a las condiciones geográficas y climáticas del área de estudio, se requiere, como primera fase, identificar claramente cuáles son los procedimientos aplicables y las dificultades prácticas que deben tenerse en cuenta para obtener resultados que luego puedan ser comparados en escalas temporales y espaciales.

Del conjunto de procedimientos que pueden aplicarse para estimar ET en el Valle Central, se considera especialmente la factibilidad de utilizar el método de Penman-Monteith con datos que pueden extraerse de imágenes satelitales.

2 CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

2.1 Métodos tradicionales

Entre los métodos empíricos más utilizados en Argentina, se destaca la fórmula de Thornthwaite de 1948 (Thornthwaite et al, 1955), cuya expresión sobre evapotranspiración potencial (EP) puede observarse en la ecuación (1), en la que utiliza como variable primaria para el cálculo, la media mensual de las temperaturas medias diarias del aire, aunque no incluye la consideración del tipo de superficie.

En el cálculo de ET potencial, también interviene la duración real del mes (cantidad de días), el número máximo de horas de sol en función de la latitud de la zona considerada, y el índice calórico mensual, cuyos valores han sido tabulados en función de la temperatura media para resolver la ecuaciones (2) y (3).

Los datos de temperatura media pueden obtenerse de todas las estaciones meteorológicas, por elementales que ellas fueran. Luego, sobre la base de ET potencial, es posible determinar ET real con los datos de precipitación mensual y capacidad de almacenaje del suelo, correspondientes a la zona de estudio.

$$EP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (1)$$

Donde:

t = temperatura media mensual,

a = función compleja de índice calórico anual (I)

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad ; \text{ para } i = \text{índice calórico mensual} \quad (2)$$

Con:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (3)$$

Obteniéndose el exponente a para el cálculo de EP, de la siguiente expresión:

$$a = 0,00000063 I^3 - 0,000077 I^2 + 0,01792 I + 0,49239 \quad (4)$$

La fórmula de Penman (5), constituye por su parte, otro de los métodos semiempíricos más difundidos, y se basa en la radiación solar y el transporte de vapor de agua a partir de una superficie homogénea (Penman, 1948). Así, en la determinación de ET intervienen variables como la latitud, horas de insolación, temperatura media diaria, humedad relativa y velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie evaporante. En consecuencia, los datos necesarios para la aplicación de la fórmula de Penman, se obtienen sólo en las estaciones meteorológicas completas.

$$ET = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (5)$$

Donde:

Δ = pendiente de la curva de tensión de saturación para la temperatura del aire,

R_n = radiación neta,

$E_a = 0,35 (0,5 + 0,54 V_2) (e_a - e_d)$

V_2 = velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie evaporante,

e_a = tensión de vapor saturante a la temperatura del aire,

e_d = tensión de vapor en el aire;

γ = constante psicrométrica.

La fórmula de Turc -de 1961- que se observa en (6), asimismo, calcula ET potencial (mm/mes) para cada mes en función de la radiación solar media diaria de ese mes sobre una superficie horizontal, la temperatura media mensual y una corrección basada en la humedad relativa media mensual, por lo que tales datos también deben obtenerse de estaciones meteorológicas completas (Aparicio, 2004).

$$ET = f_i \frac{t}{t+15} (R_i + 50) c_i \quad (6)$$

Donde:

f_i = factor de corrección mensual,

t = temperatura media mensual,

R_i = radiación solar global media en el suelo,

c_i = factor de corrección para zonas áridas, en función de la humedad relativa.

Siempre que se disponga de los datos requeridos, la determinación de ET por la fórmula de Penman o de Turc, puede resolverse con herramientas informáticas de muy bajo costo, como el software REF-ET (Universidad de Idaho, EEUU) que estandariza el cálculo para quince de los métodos más usados en Estados Unidos.

2.2 Método de Penman-Monteith

La fórmula de Penman fue modificada en 1963 (método de Penman-Monteith) para incluir la consideración de un coeficiente de cultivo.

Expertos e investigadores convocados por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial (1990) definieron el concepto de cultivo hipotético de referencia, que resultó aplicable desde la fórmula de Penman-Monteith (7), recomendando su adopción como nuevo método estandarizado para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia (ET_0) y aconsejando sobre los procedimientos para el cálculo de los distintos parámetros que la fórmula incluye.

El procedimiento había sido presentado por primera vez en la publicación N° 24 de la Serie de Riego y Drenaje

de la FAO «Las Necesidades de Agua de los Cultivos» en 1977, y permitía estimar la cantidad de agua que un cultivo utiliza teniendo en cuenta el efecto del clima y las características del cultivo. Con posterioridad al encuentro de expertos de 1990 organizado por la FAO, se han incorporado avances en investigación y un procedimiento más preciso para determinar el uso de agua de los cultivos.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + 900 \gamma u_2 (e_s - e_a) / (T + 273)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (7)$$

Donde:

ET_0 – Evapotranspiración de referencia,

R_n – Radiación neta,

G – Densidad del flujo de calor del suelo,

T – Temperatura media diaria a 2 m de altura,

u_2 – Velocidad del viento a 2 m de altura,

e_s - Saturación de presión del vapor,

e_a – Presión real del vapor,

$e_s - e_a$ – Déficit de saturación de presión de vapor,

Δ – Pendiente de la curva de presión del vapor,

γ – Constante psicrométrica.

El documento publicado por la FAO en 2006 (Estudio Riego y Drenaje N° 56), constituye una actualización del procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo a partir de datos meteorológicos y coeficientes de cultivo.

El método FAO Penman-Monteith se ha desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como “un cultivo hipotético con una altura asumida de 0,12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado” (FAO Irrigation and Drainage: Evapotranspiración del cultivo, 2006).

Se considera que este método produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos, aunque se ha señalado la imposibilidad de determinar exactamente la evapotranspiración a través de cualquier ecuación basada sólo en datos meteorológicos, bajo diferentes situaciones climáticas específicas, debido principalmente a la simplificación en la formulación y a los errores que se propagan en la recopilación de los datos climáticos.

No obstante lo expuesto, el panel de expertos acordó utilizar la definición hipotética del cultivo de referencia sobre el que se basa la ecuación FAO-56 Penman-Monteith, como un valor de comparación homogeneizado, de tal manera que los datos de

diferentes zonas del mundo resulten comparables entre sí.

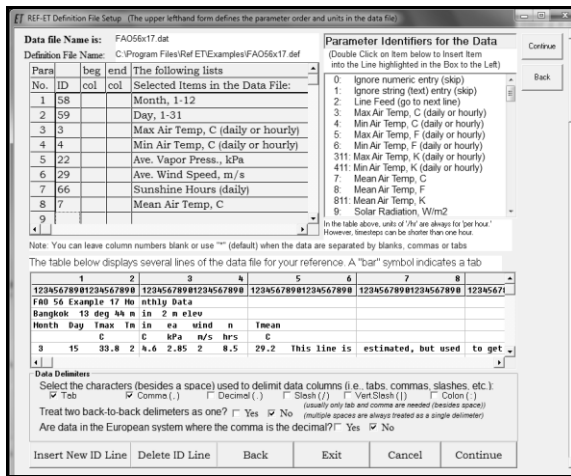


Figura 1. Recuadro de diálogo de REF-ET versión 2012

La determinación de ET de referencia también puede resolverse con herramientas informáticas de muy bajo costo, como el mencionado software REF-ET (Universidad de Idaho, EEUU) que estandariza el cálculo para distintas variantes que se han propuesto para este método.

Debe tenerse en cuenta que la primera versión de REF-ET había sido desarrollada en la Universidad de Utah (EEUU), por R.G. Allen (1990), y más tarde fue adaptada al entorno Windows (1999) con colaboración de la Universidad de Idaho (EEUU), incorporando la ecuación FAO-56 de Penman-Monteith.

Versiones actualizadas de REF-ET se publicaron en los años 2000, 2004, 2008 y 2012 (Fig. 1).

2.3 Tecnologías experimentales

La ET también puede estimarse a partir del balance de energía, considerando principalmente el flujo de calor sensible, el flujo de calor latente, el flujo de calor del suelo y la radiación neta, elementos que se relacionan con la radiación entrante y saliente de la atmósfera, de la superficie del suelo y de la zona de raíces de las plantas, y pueden calcularse con la combinación de datos meteorológicos y datos que proporcionan las imágenes obtenidas por teledetección espacial. En tal sentido, el Algoritmo de Balance de Energía Superficial del Suelo (Bastiaanssen, 1998), conocido por sus siglas en inglés como SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) constituye un modelo de procesamiento de imágenes satelitales para calcular la evapotranspiración con apoyo de datos meteorológicos. El balance de energía resulta aplicable a todas las escalas, que van desde lo global para estudios de cambio climático, a las cuencas hidrográficas de una región para el planeamiento del desarrollo, hasta el

nivel de campo o parcela para definir requerimientos hídricos específicos de determinados cultivos. Como las imágenes satelitales pueden seleccionarse a partir de una amplia variedad de resoluciones espaciales y temporales, las determinaciones de ET por medio de SEBAL, responderán a escalas que dependen del propósito de trabajo. Así, desde las imágenes satelitales es posible obtener el albedo superficial, el índice de área foliar, el índice de vegetación y la temperatura del suelo, datos éstos que se complementan con la velocidad del viento, la temperatura del aire, humedad y radiación solar en el momento de captación de la imagen (Preeyaphorn Kosa, 2011).

Las imágenes satelitales utilizadas más frecuentemente en SEBAL, han sido LANDSAT, NOAA-AVHRR, MODIS, y ASTER. Se señala que las ventajas de SEBAL están dadas por la facilidad de aplicación al requerir datos complementarios mínimos, que se adapta a variados climas en función de los conceptos físicos involucrados y que no requiere de datos hidrológicos (Timmermans, 2001). Las desventajas, en cambio, parecen estar centradas en las dificultades de su aplicación en relieves accidentados.

La determinación de ET para el Valle Central de Catamarca, por medio de SEBAL, significaría contar con valores de ET de referencia para cada píxel de las imágenes satelitales a utilizar. En tal sentido, se destaca que el convenio celebrado entre la Universidad Nacional de Catamarca y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, permite disponer sin costo alguno, de las imágenes Landsat necesarias. En consecuencia, será posible obtener valores de ET real y ET potencial para píxeles de 30 m por 30 m, siempre que se disponga de los datos complementarios sobre la velocidad del viento, precipitación (en periodos previos a la captación de imágenes Landsat), humedad, radiación solar y temperatura del aire. Por otra parte, debe señalarse que SEBAL ha sido desarrollado para usarse con el software ERDAS IMAGINE, cuyo costo no es menor para Argentina. Sin embargo, pueden hacerse implementaciones de versiones simplificadas de SEBAL en otro tipo de software de tratamiento digital de imágenes, cuyos costos son sensiblemente menores y aún en algún software de libre disponibilidad.

Distintos procedimientos para determinar ET con datos obtenidos de imágenes satelitales se han desarrollado sobre la base de SEBAL. Entre otros, se destaca el modelo METRIC, cuyo nombre deriva de sus siglas en inglés "Mapping EvapoTranspiration at high Resolution using Internalized Calibration" (Mapeo de ET en alta resolución y con calibración internalizada). Hasta el presente, sólo resultados del método empírico de Thornthwaite (1948) han sido publicados para Catamarca.

3 ESPACIO GEOGRÁFICO DE APLICACIÓN

A los fines de analizar la factibilidad de aplicar nuevas tecnologías experimentales para estimaciones de ET - por el método de Penman-Monteith- en el Valle Central de Catamarca (Argentina), es necesario considerar sus características geográficas y agrometeorológicas más sobresalientes.

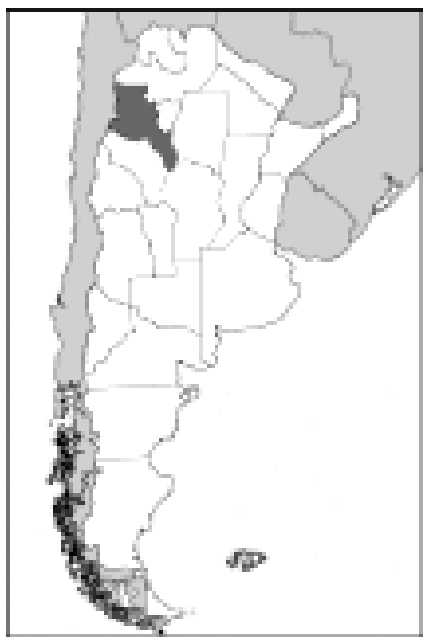


Figura 2. Ubicación de la Provincia de Catamarca (Argentina).

La Provincia de Catamarca está ubicada en el Noroeste de la República Argentina (Fig. 2) y comprende 102.602 km².

Desde un enfoque agrogeográfico, la Administración General de Catastro de Catamarca ha dividido el territorio provincial en tres zonas diferenciadas: Zona Este, Zona Oeste y Valle Central.

En su totalidad, el Valle Central (Fig. 3) corresponde al ámbito de Sierras Pampeanas, y está ubicado a una altura media de 500 msnm entre cordones montañosos longitudinales (Sierras de Ambato al Oeste y Sierras de Ancasti al Este) orientados con dirección Norte-Sur, rumbo que incide en el tipo y distribución de las precipitaciones. La altura sobre el nivel del mar, desciende suavemente en el valle, de Norte a Sur (Fig. 4).

Bajo la influencia del dominio climático semiárido, el espacio geográfico de referencia forma parte de la Diagonal Árida Sudamericana, sub-dominio árido de Sierras y Bolsones, con precipitaciones de régimen torrencial que se presentan sólo en el período estival, caracterizadas por su corta duración y poder erosivo en el periodo de ocurrencia, comprendido entre diciembre y abril (Eller, 2013).

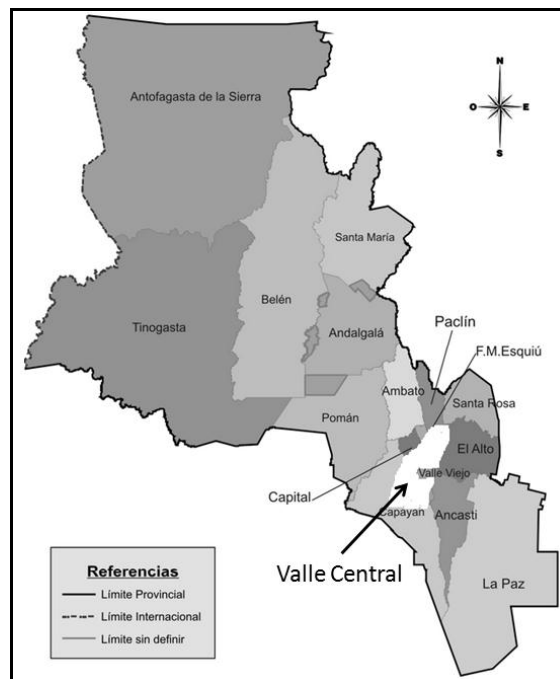


Figura 3. Ubicación del Valle Central en la Provincia de Catamarca (Argentina). Fuente: ETISIG Catamarca.

En función de la latitud (28° 36' Sur), la luminosidad promedio del Valle Central es de 16 horas diarias y se estima un promedio anual de temperatura media que oscila entre los 22° y 22,5° C. La evaporación excede a la precipitación media anual que alcanza los 450 mm y se observan importantes amplitudes térmicas que, según el año, con temperaturas mínimas de -5° C y máximas en el orden de los 45° C, pueden llegar a los 50° C.

Las altas temperaturas y los fuertes vientos que predominan del Norte en todo el Valle Central, sumado a las escasas precipitaciones anuales que están concentradas en una sola estación del año, ocasionan muy altos valores de evaporación del suelo y transpiración de las plantas.

En síntesis, puede señalarse que el Valle Central se caracteriza por un clima árido y semiárido, donde el agua es el recurso más escaso. Los balances hídricos que se disponen, han sido calculados por el método de Thornthwaite en base a los valores de temperaturas medias proporcionadas por la Estación Meteorológica Catamarca que depende del Servicio Meteorológico Nacional, instalada desde el año 1973 en el Aeropuerto Felipe Varela de Catamarca, que está ubicado en la localidad de Las Tejas del Departamento Valle Viejo ((Latitud 28.5° Sur, Longitud 65.8° Oeste, Altura 519 msnm), a 15 km hacia el sur del centro de San Fernando del Valle de Catamarca. Debe señalarse que sus registros no están disponibles para el público, habiendo definido un perfil estrictamente orientado al apoyo de la aeronavegación, en desmedro del apoyo a las actividades académicas y de investigación.



Figura 4. Carta imagen del Valle Central de la Provincia de Catamarca. Fuente: IGN-CONAE (Atlas Argentina 500K, 2011).

El Valle Central cuenta con otras dos estaciones meteorológicas, una en la Universidad Nacional de Catamarca (Servicio Meteorológico Urbano) que registra datos desde el 14 de marzo de 1994, y la otra en la Estación Experimental INTA Catamarca, ubicada en Sumalao, Departamento Valle Viejo (Latitud 28.5° Sur, Longitud 65.7 Oeste, Altura 527 msnm) con registros que se iniciaron el 9 de noviembre de 2012. Se trata esta última, de una estación meteorológica automática NIMBUS THP (termohigropluviométrica) que forma parte del SIGA (Sistema de Información y Gestión Agro-meteorológica) que depende del Instituto de Clima y Agua del INTA Castelar y se suma a las casi cien estaciones de este tipo que están distribuidas en todo el país, en las cuales se registran la temperatura del aire a 1,5 m de altura, la temperatura del suelo a 10 cm de profundidad, humedad relativa y precipitación, mediante sensores de alta precisión y con frecuencia de diez minutos.

El sitio mediante el cual se puede acceder a la información registrada en las estaciones, es <http://siga2.inta.gov.ar>, donde se encuentran disponibles datos de todas las estaciones automáticas de diferentes lugares del país del SIGA, que se pueden consultar y descargar sin costo. El Servicio Meteorológico Urbano de la UNCa, por su parte, también proporciona datos meteorológicos sin restricción alguna.

A los fines de aplicar métodos empíricos (como el de Thornthwaite) o semiempíricos (como el de Penman) para estimar ET y observar sus variaciones temporales y espaciales en el Valle Central de Catamarca, se advierte que los datos corresponderán a localidades puntuales, centradas en Sumalao (Departamento Valle Viejo) y en la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca. En este último caso, debe tenerse en cuenta que sus registros responden a las condiciones del microclima urbano, que se identifican como “islas de calor”, caracterizadas por valores de temperatura superiores a la de su entorno (registros de 3° C a 11° C de diferencia) por efecto de la escasez de vegetación y la concentración de actividades humanas, como las industrias, el crecimiento del parque automotor y las edificaciones.

4 CONCLUSIONES

Del análisis de las características climáticas del Valle Central de Catamarca, se desprende que el agua constituye un recurso escaso. No se dispone de balances hídricos con suficientes estimaciones de evapotranspiración para precisar aspectos tan básicos como las dotaciones de riego que requieren los cultivos. A partir de la investigación exploratoria del estudio de caso del Valle Central de Catamarca (Argentina), es posible señalar en relación con las estimaciones de evapotranspiración para esta zona de estudio:

- Se reducen a localidades puntuales, resueltas por la fórmula de Thornthwaite que está basada en valores de temperatura media.
- Se necesita obtener valores de ET en distintas localizaciones del Valle Central, a los fines de alimentar una base de datos con información suficiente que permita analizar variaciones espaciales y temporales.
- Los datos climáticos que requieren otros métodos empíricos (como el de Turc) o semiempíricos (como el de Penman) para estimar ET, sólo pueden obtenerse para Sumalao (Departamento Valle Viejo), ya que dicha localidad es la única que cuenta con una estación meteorológica completa (perteneciente a la red SIGA), dispuesta a brindar los datos necesarios.
- El cálculo de evapotranspiración por medio de métodos empíricos o semiempíricos, se simplifica notablemente con aplicación de software REF-ET de bajo costo.
- La estación meteorológica de Sumalao (red SIGA) sólo registra datos desde 2012, por lo que los estudios temporales en base a estimaciones por métodos empíricos o semiempíricos no podrán efectuarse para periodos anteriores y únicamente deberá considerarse dicho año como punto de partida.
- Es posible calcular ET a partir del balance de energía mediante la aplicación de SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), ya que constituye un

modelo de procesamiento de imágenes satelitales con requerimiento de datos meteorológicos complementarios mínimos para calcular la evapotranspiración, señalándose que no ofrece dificultades en relieves llanos o de valle.

- No puede asegurarse la disponibilidad de los datos meteorológicos complementarios mínimos que se necesitan para aplicación de SEBAL, en periodos anteriores al año 2012, es decir, la velocidad del viento, la temperatura del aire, la humedad y la radiación solar, en el momento de captación de las imágenes satelitales.

- La Universidad Nacional de Catamarca tiene acceso a imágenes satelitales que proporciona CONAE, particularmente imágenes Landsat que ya han sido probadas exitosamente en SEBAL.

- La Universidad Nacional de Catamarca no dispone del software específico sobre el cual se ha implementado SEBAL, por lo que aún deben probarse versiones simplificadas de SEBAL en otro tipo de software de tratamiento digital de imágenes, cuyos costos sean sensiblemente menores y particularmente en algún software de libre disponibilidad.

- SEBAL considera la definición hipotética del cultivo de referencia sobre el que se basa la ecuación FAO-56 Penman-Monteith, de manera que proporciona un valor de comparación homogeneizado, por lo que su aplicación en el Valle Central de Catamarca hará posible que los resultados de evapotranspiración que puedan obtenerse sean comparables con los valores publicados de diferentes zonas del mundo.

- La determinación de ET a partir del balance de energía resulta aplicable a todas las escalas de investigación, que van desde lo global para estudios de cambio climático, a las cuencas hidrográficas de una región para el planeamiento del desarrollo, hasta el nivel de campo o parcela para definir requerimientos hídricos específicos de determinados cultivos.

Finalmente, se destaca que las estimaciones de evapotranspiración resultan imprescindibles para analizar las variaciones climáticas que presenta el Valle Central de Catamarca (Argentina), y los procedimientos

y metodologías que se ensayen podrán ser extrapolados a zonas geográficas similares de la provincia y de la región.

5 FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., M. Tasumi and R. Trezza, Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) -Model. *Journal Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (4), 380-394. 2007.
- Aparicio, M. F., Fundamentos de la hidrología de superficie. Editorial Limusa, 303 pp. México. 2004.
- Bastiaanssen, W.G.M., M. Menenti, R.A Feddes, A.A.M. Holtslag, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212-213, pp. 198-212. 1998.
- Eller de Ferreyra, A.B., Importancia del Servicio Meteorológico Urbano (UNCa) en el Conocimiento del Clima de San Fernando del Valle de Catamarca. *Cátedra Climatología Agraria – Fac. Cs. Agrarias – UNCa*. Catamarca. 2013.
- FAO Irrigation and Drainage: Review the FAO methodologies on crop water requirements, Evapotranspiración del cultivo. Roma, 2006. FAO Estudio y Drenaje N° Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm> (accedido en junio 2015).
- Penman, H.L., Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 193, pp. 120-146, London, England. (1948).
- Preeyaphorn Kosa The Effect of Temperature on Actual Evapotranspiration based on Landsat 5 TM Satellite Imagery, Evapotranspiration, Prof. Leszek Labeledzki (Ed.), ISBN: 978-953-307-251-7, InTech, disponible en la siguiente dirección (accedida en abril 2015): <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration/the-effect-of-temperature-on-actualevapotranspiration-based-on-landsat-5-tm-satellite-imagery> 2011.
- Timmermans, W. J., A. M. J. Meijerink and M. W. Lubczynski. Satellite derived actual evapotranspiration and groundwater modeling, Botswana, *Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA*, April 2000. IAHS Publ, No. 267. 2001.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R., "The water balance", *Climatology*, 8:1-104, USA. 1955.