

Aplicación de tres modelos de estimación de la evapotranspiración a partir de imágenes Landsat e información de terreno

Dora Ocampo ^{1,2}
Raúl Rivas ^{1,2}
Facundo Carmona ^{1,3}

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo Usunoff”, ² Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires. Código Postal 47- B7300- Tandil – Buenos Aires, Argentina
ocampo.dora@rec.unicen.edu.ar, rrivas@rec.unicen.edu.ar

³ Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica-ANPCyT
facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

Abstract. In this study we estimated evapotranspiration (ET) using three algorithms based data provided by the images of the TM y ETM+ sensors (Landsat 5 y 7 respectively) and field data for mid-season stage of soybean (January), moment where moisture conditions were optimal. Also, the heat flux soil is negligible. The study site is located on parcel in Tandil (Pampa - Argentina zone-IV). The objectives consisted of applying three algorithms for estimating ET: Model 1: ET Energy Balance; Model 2: ET Adapting Seguir and Itier, and Model 3: ET Priestley-Taylor, and evaluate their performance in relation to the ET obtained by the reference method Penman-Monteith FAO 56 and field data. Results indicate that the methodologies used quantifying with precision the water used by the crop. The methods showed similarities between them. We conclude that any method used allows the estimation of the evapotranspiration with good precision at plot. Algorithm Priestley-Taylor that only data required for application one instantaneous satellite data: net radiation, and one field data: air temperature. We concluded that any method used allows the estimation of evapotranspiration with good precision at plot.

Palabras-clave: evapotranspiración, Landsat, teledetección, información de terreno.

1. Introducción

La evapotranspiración (ET) comprende un proceso complejo de estimar debido a los diversos factores que en ella intervienen, como factores meteorológicos y otros relacionados a la cubierta vegetal y del suelo. La ET, ha sido estudiada y continúa estudiándose bajo diferentes disciplinas como la agronomía, hidrología, geología, meteorología y clima, así como también en trabajos ambientales y ecológicos, y de planificación y gestión de recursos hídricos, entre otros. De modo que su cuantificación se hace necesaria para una gran variedad de especialidades científicas (Domingo et al. 2003). Dichas especialidades deben encausarse bajo un motivo común, el de mejorar los métodos para su estimación y que ello contribuya a mejorar la manera de diagnosticar y gestionar los recursos hídricos en cualquier zona.

En relación a los modelos de estimación de la ET, de manera generalizada se aceptan dos grandes grupos, los clásicos o convencionales, que hacen uso de información de tipo climática o meteorológica (modelos locales) y los que utilizan información captada desde satélite (modelos regionales). Respecto a estos últimos, existen modelos basados en el balance de energía (MBE) y modelos basados en la aplicación de índices de vegetación (Gonzalez-Dugo et al. 2008). Los MBE consideran los aspectos físicos-energéticos que involucran al proceso de ET, representando mejor las condiciones reales de los sistemas, con errores de estimación entre el 5-15 % (Allen et al. 2011).

Considerando estas premisas, en este trabajo se propone analizar la aplicación de tres modelos regionales (2 basados en MBE y un tercero que es semiempírico y que corresponde a una adaptación de Rivas y Carmona, 2011 del método original de Seguin e Itier, 1983). Los resultados de dicha aplicación se contrastan con valores de ET obtenidos desde el método FAO 56 Penman Monteith, aceptado mundialmente como de referencia para el cálculo en climas áridos y húmedos (Allen et al. 1998).

Los objetivos de este trabajo son, a) estimar la evapotranspiración diaria para una zona de agricultura de secano del Partido de Tandil (Buenos Aires, Argentina), utilizando datos de los sensores TM y ETM+ (Landsat 5 y 7) e información de terreno, mediante la aplicación de los tres algoritmos mencionados, y b) contrastar los valores obtenidos con el método propuesto por Allen et al. (1998), FAO 56 Penman Monteith.

2. Materiales y metodología aplicada

2.1 Área de estudio y datos utilizados

Se utilizaron datos provistos por una estación de balance de energía (EBE) ubicada en una parcela agrícola en la región pampeana argentina, ubicada en la Región IV según el INTA (Estancia Laura leofú, 37° 13' Sur; 59° 34' Oeste, 238 m). En dicho establecimiento se desarrolla agricultura por ambientes por lo cual un mismo potrero puede estar sembrado con uno o más cultivos. La parcela se sembró a mediados de noviembre de 2009 con soja *Glycine max* (L.), leguminosa de ciclo anual que alcanza una altura máxima de aproximadamente 1, 2 m.

La EBE ubicada sobre el cultivo de soja registra medidas de diferentes variables. En este estudio se utilizaron medidas de temperatura y humedad del aire, velocidad de viento a 2 m, radiación solar y neta, y flujo de calor en el suelo. Detalles del instrumental de medición pueden consultarse en trabajos previos de Carmona et al. (2011) y Ocampo et al. (2011).

La zona de estudio pertenece a una región subúmida húmeda. Sus características climáticas y edáficas hacen que la misma sea propicia para el desarrollo de la agricultura de secano, particularmente en grandes extensiones sembradas con soja de primera y segunda durante la época estival de los cuales se obtienen excelentes rendimientos.

Se utilizaron dos imágenes provistas por los sensores Thematic Mapper, a bordo del satélite Landsat 5 y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a bordo de la plataforma Landsat 7. La hora en la cual el satélite pasa sobre el área de estudio corresponde a las 13:30 GMT. En la Tabla 1 se describen las imágenes utilizadas y las condiciones atmosféricas para cada día.

Tabla 1. Detalle de las imágenes utilizadas y condiciones ambientales

<i>Fecha</i>	<i>Sensor/Imagen</i>	<i>Condiciones atmosféricas diarias</i>
14/01/2010	Sensor TM Landsat 7 (Path/Row: 225/086)	Rn= 7,5 mm día ⁻¹ ; HR= 54 %; ΔT= 19,8 °C; CVW= 30 %
22/01/2010	Sensor ETM+ Landsat 5 (Path/Row: 225/086)	Rn= 7,1 mm día ⁻¹ ; HR= 62 % ΔT= 16,6 °C; CVW=25 %

ΔT=diferencia entre temperatura mínima y máxima

Durante las fechas indicadas, el cultivo de soja se encontraba en las etapas reproductivas que incluyen la floración, la formación de vainas y de semillas (Ferh et al. 1971). Es preciso indicar que para ambas fechas las condiciones atmosféricas fueron similares. En relación a la disponibilidad de agua en suelo, esta fue óptima (contenido volumétrico de agua, CVW de 30 %), de modo que en este estudio se consideró que el proceso de evapotranspiración real se desarrolló sin restricciones y fue prácticamente igual a la potencial (Tabla 1).

2.2 Algoritmos de estimación de la evapotranspiración

En este trabajo se utilizaron 3 algoritmos (Ecuaciones 1 a 3) de estimación de la ET. Éstos requieren para su aplicación de un conjunto de datos provistos por imágenes de satélite e información de terreno correspondiente al mismo día/ hora de paso del satélite.

El primero de los algoritmos consiste en la resolución de la ecuación de balance de energía, donde la evapotranspiración se obtiene como residuo del mismo (Ecuación 1).

El segundo, comprende una adaptación del método semiempírico de Seguir e Itier (1983) elaborada por Rivas y Carmona (2011) sobre cultivos de soja y pastura (Ecuación 2).

Y el tercero, resulta de aplicar el método de Priestley y Taylor (1972) sin considerar el flujo de calor en suelo a escala diaria (cobertura vegetal total).

Modelo 1: Algoritmo ET Balance Energía (ET_{BE})

$$ET_{BE} = \frac{Rn_d}{Rn_i} \cdot (Rn_i - G_i - H_i) \quad (1)$$

Modelo 2: Algoritmo ET Adaptación Seguir e Itier ($ET_{Adap-SI}$)

$$ET_{Adap-SI} = (Rn_d) + A + B(Ts_i - Ta_i) \quad (2)$$

Modelo 3: Algoritmo ET Priestley Taylor (ET_{PT})

$$ET_{PT} = 1,28 \cdot \left(\frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \right) \cdot Rn_d \quad (3)$$

✓ Ecuación de estimación de la Radiación neta diaria

$$Rn_d = Rni \cdot C - D \quad (4)$$

✓ Ecuación de estimación del flujo de calor en el suelo (Moran et al. 1989)

$$G_i = 0,583 \exp(-2,13 \cdot NDVI) \cdot Rn_i \quad (5)$$

✓ Ecuación de estimación del flujo de calor sensible (Rivas y Schirmbeck, 2010)

$$H_i = \frac{\rho C_p}{r_a} \cdot (Ts_i - Ta_i) \quad (6)$$

donde ET para los tres algoritmos se expresa en $W m^{-2}$ (los valores de ET se transforman a $mm día^{-1}$ aplicando el factor multiplicador $3,53 \times 10^{-2}$ propuesto en Allen et al. 1998), Rn_d es la radiación neta diaria obtenida desde la imagen ($W m^{-2}$), Rn_i es la radiación neta instantánea ($W m^{-2}$) G_i es el flujo de calor en el suelo instantáneo ($W m^{-2}$), H_i es el flujo de calor sensible instantáneo, Ts_i es la temperatura de superficie instantánea (K), A y B son coeficientes empíricos para el área de estudio determinados por Rivas y Carmona (2011) - 16,5 y 14,6 respectivamente, 1,28 es parámetro que integra efectos de advección regional para zonas húmedas (Carmona et al. 2010), C y D son coeficientes empíricos para el área de estudio (Rivas y Carmona 2011) 0,43 (adimensional) y -54 ($W m^{-2}$) respectivamente, NDVI es el Normalized Difference Vegetation Index (adimensional), ρ es la densidad media del aire a presión constante ($kg m^{-3}$), C_p el calor específico del aire ($J kg^{-1} °C^{-1}$), r_a es la resistencia aerodinámica ($s m^{-1}$) obtenida a partir de la velocidad del viento.

Datos de terreno: T_{ai} es la temperatura del aire a 2 m de altura a la hora de paso del satélite (K), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (KPa °C⁻¹).

2.3 Análisis de los datos

La ET fue calculada píxel a píxel a partir de la metodología propuesta. Luego fue promediada para todo el ambiente de la parcela cultivada con soja. Los valores obtenidos se compararon con valores de ET estimados mediante datos locales y el método propuesto por Allen et al. (1998) en el manual 56 de la organización mundial *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, (método *FAO 56 Penman-Monteith*). La Ecuación 7 permite su cálculo, y fue considerada en este estudio para evaluar los resultados obtenidos mediante información de satélite.

$$ET_{FAO56PM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn_d - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_a + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (7)$$

donde $ET_{FAO56PM}$ se expresa en mm día⁻¹. Rn_d es la radiación neta (MJ m⁻² día⁻¹), G es el flujo de calor en el suelo (MJ m⁻² día⁻¹), T_a es la temperatura media del aire a 2 m de altura (°C), u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), e_s es la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (KPa), $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor (KPa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (KPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (KPa °C⁻¹), 0,408 es un factor de conversión a mm día⁻¹, 273 es un factor de conversión para expresar la temperatura en K, 900 es un coeficiente para el cultivo de referencia (kJ⁻¹ Kg K día⁻¹), 0,34 es un coeficiente resultante de asumir una resistencia de cultivo de 70 s m⁻¹ y una resistencia aerodinámica de 208/ u_2 para el cultivo de referencia (s m⁻¹). Procedimientos y ecuaciones de cálculo pueden consultarse en los trabajos de Allen et al. (1998), y Ocampo y Rivas (2011).

3. Resultados y Discusión

Mediante los tres algoritmos regionales (Ecuaciones 1 a 3) se obtuvieron 6 mapas de evapotranspiración diaria correspondientes a dos días de verano 14/01/2012 (Figura 1) y 22/01/2010 (Figura 2).

En los mapas de ET se pueden observar zonas de color verde y azul claro que representan las parcelas de valores altos de la ET (> a 4 mm día⁻¹). Las zonas de color rojo y oscuro representan parcelas con valores bajos de ET (< a 2 mm día⁻¹).

A mediados de enero, el cultivo de soja se encuentra en estadios de mediados de temporada, etapa donde el cultivo alcanza la máxima altura y cobertura vegetal completa. Además, a partir de los registros de la EBE se detectó que el cultivo se encontraba en condiciones óptimas de humedad (Tabla 1) y ello queda demostrado en los mapas de ET, donde dicho proceso se desarrolla sin restricciones de humedad. Solo en algunas zonas la ET es casi nula (Figura 2 a y b), zonas que corresponden a parcelas sin cultivos (rastros), en las primeras etapas de desarrollo (como soja de segunda), entre otras opciones.

En la Tabla 2 se detallan los valores de ET obtenidos píxel a píxel, promediados para la parcela sembrada con soja, y los valores de ET obtenidos con el método de referencia $ET_{FAO56PM}$. Se observa que todos los algoritmos presentan una diferencia < a 0,7 mm día⁻¹ en relación al de referencia, destacándose el algoritmo $ET_{Adap-SI}$, que presenta las menores diferencias para ambos días. Sin embargo, el algoritmo ET_{PT} , requiere de menos datos de entrada al modelo logrando buenos resultados también.

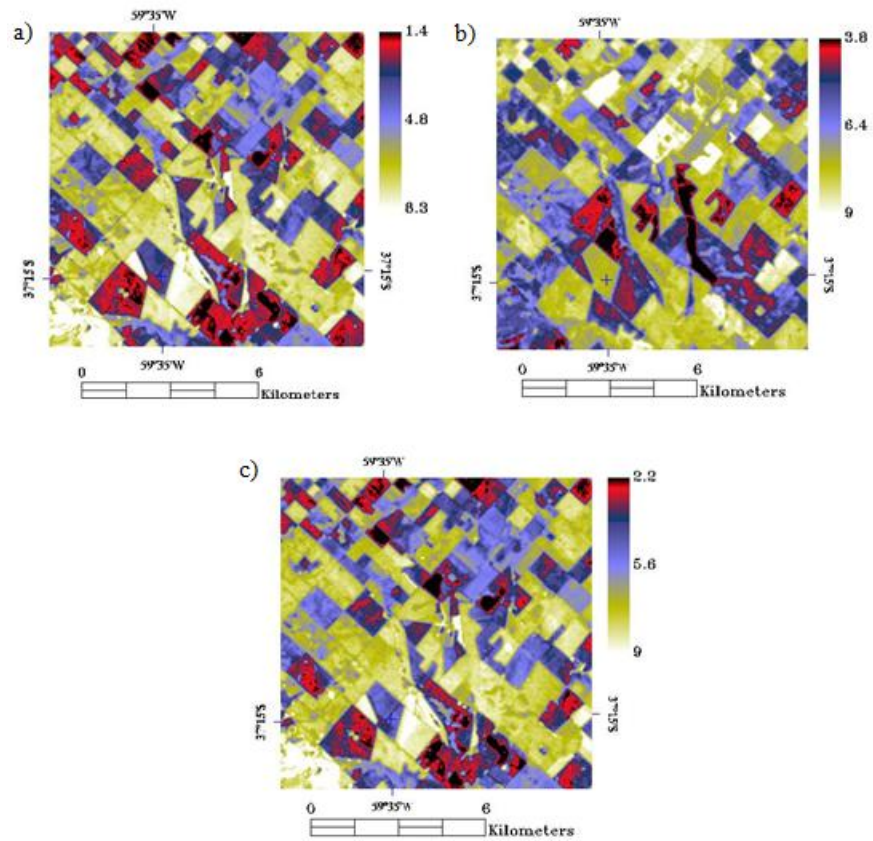


Figura 1. Evapotranspiración expresada en mm día^{-1} obtenida a partir de los tres algoritmos para el día 14/01/2010, a) ET_{BE} b) $ET_{Adap-SI}$ y c) ET_{PT} .

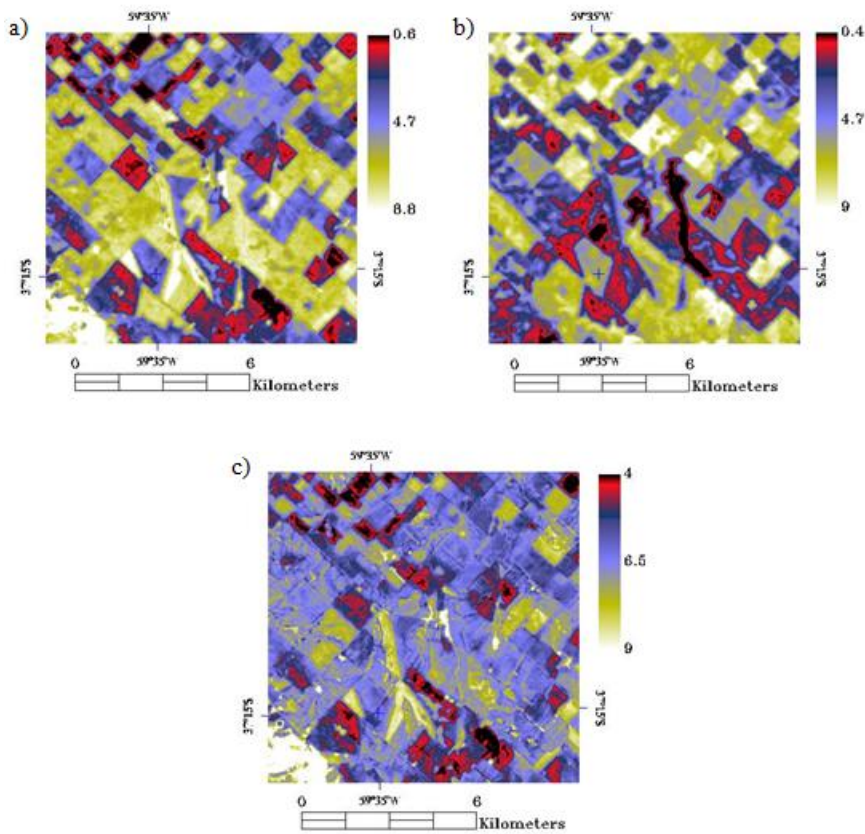


Figura 2. Evapotranspiración expresada en mm día^{-1} obtenida a partir de los algoritmos para el día 22/01/2010, a) ET_{BE} b) $ET_{Adap-SI}$, y c) ET_{PT} .

Tabla 2. Comparación de la evapotranspiración obtenida a partir de los algoritmos aplicados y el método $ET_{FAO\ 56\ PM}$.

<i>Modelo</i>	<i>ET mm día⁻¹ (día 14/01/10)</i>	<i>ET mm día⁻¹ (día 22/01/10)</i>
ET_{BE}	6,9	6,2
$ET_{Adap-SI}$	6,7	6,4
ET_{PT}	7,5	6,7
$ET_{FAO56PM}$	6,8	6,8

4. Conclusiones

El trabajo permitió detallar y evaluar tres modelos diferentes de estimación de la evapotranspiración. Los resultados muestran similitudes en las estimaciones de los métodos y una aproximación de los mismos al valor de la ET calculado para la parcela (Método FAO 56 Penman Monteith).

Se considera este estudio una aproximación en cuanto a la aplicación de tres metodologías que involucran un conjunto de variables diferentes. El algoritmo ET Balance de energía requiere para su cálculo de datos de radiación neta instantánea, flujo de calor en el suelo y sensible, temperatura de superficie y datos complementarios de terreno (temperatura del aire y velocidad de viento). El método ET Adaptación de Seguir e Itier, datos de satélite de radiación neta instantánea, temperatura de superficie y datos complementarios de terreno (temperatura del aire). Y el método ET Priestley-Taylor, datos de satélite de radiación neta instantánea y datos complementarios de terreno (temperatura del aire), siendo este último algoritmo el que menor cantidad de variables ingresa al modelo.

Se concluye que cualquiera de los métodos utilizados permite la estimación de la evapotranspiración con buen grado de precisión a escala de parcela.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff”, la Comisión de Investigaciones Científicas (*Beca de Perfeccionamiento, Res. 1360/12*) y la Agencia de Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por los fondos otorgados para este estudio.

Referencias bibliográficas

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T.A.; and Jensen, M.E. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Journal of Agricultural Water Management**, 98: 899-920.

Carmona F., Rivas R., Caselles V. 2010. Estimación del parámetro alfa de Priestley-Taylor en condiciones de secano. En: Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zona de llanura. Entraigas I., Varni M., Vives L. (editores). I: 259-264. CDROM. ISBN: 978-987-543-392-2.

Carmona, F.; Rivas, R.; Ocampo, D.; Schirmbeck, J. y Holzman, M. 2011. Sensores para la medición y validación de variables hidrológicas a escalas local y regional a partir del balance de energía. **Revista Aqua-LAC**, Vol 3 (1): 26-36.

Domingo, F; Villagarcía, L. y Were, A. 2003. ¿Como se puede medir y estimar la evapotranspiración? Estado actual y evolución. **Revista Ecosistemas**, 12 (1):1-15.

Fehr W; C Caviness; D Burmood y J. Pennington, 1971. Stage of development descriptions for soybeans, glycine max (L.) Merrill. **Crop Science**, Vol 11 (6): 929-931.

González-Dugo, M. P.; Lorite, I. J.; Gavilán, P.; Berengena, J.; Santos, C. y Serrano, A. 2008. Estimación de la Evapotranspiración en zonas regables combinando datos de teledetección y estaciones meteorológicas. Resumen de los Trabajos desarrollado por el Grupo de Riegos del IFAPA. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/sar/contents/es/info/infoSAR/publicaciones/16.pdf>. Acceso en: 31 de julio de 2012.

Moran, M. S., Jackson, R. D., Raymond, L. H., Gay, L. W., & Slater, P. N. 1989. Mapping surface energy balance components by combining landsat thematic mapper and ground-based meteorological data. **Remote Sensing of Environment**, 30: 77-87.

Ocampo, D.; Rivas, R. y Carmona, F. 2011. Aplicación del Método Relación de Bowen para estimar la evapotranspiración sobre un cultivo de soja. En: Actas de Trabajos completos del 7mo. Encuentro Internacional del Internacional Center for Earth Sciences (ICES), 2011. José Ruzzante...[et.al.]; compilado por María Armeite y Emilia Molina. 1a ed. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica - CNEA, 2012. 229-234, CD-ROM, ON-line. ISBN 978-987-1323-27-2. Disponible en: <http://www.imd.uncu.edu.ar/upload/actas-trabajos-completos-eices-7.pdf>. Acceso en: 25 de septiembre de 2012.

Ocampo, D. y 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.

Rivas, R. y Schirmbeck, J. 2010. Estimación del Flujo de Calor Latente a Partir de Imágenes EOS MODIS. **Ciencia**, 5 (18): 35-50.

Rivas, R. y Carmona, F. 2011. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. **Physics and Chemistry of the Earth**, Elsevier, Special Issue: Remote Sensing – Hafeez. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2010.12.002>. Acceso en: 24 de octubre de 2012.

Seguin, B. and Itier, B. 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. **International Journal of Remote Sensing**, 4(2): 371-383.