



## Estimación espacial de la evapotranspiración usando imágenes de satélite Landsat y el modelo SEBAL en el humedal Paraíso, Huacho

### Spatial estimation of evapotranspiration by Landsat satellite images and the SEBAL model in the Paraíso wetland, Huacho

ERICK GARCIA GONZALES<sup>1,\*</sup> & MIGUEL ANGEL LLEELLISH JUSCAMAYTA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Autoridad Nacional del Agua (ANA), Lima, Perú.

<sup>2</sup> Ministerio del Ambiente (MINAM), Lima, Perú.

\*egarciag@ana.gob.pe.

#### RESUMEN

Los humedales están entre los ecosistemas más valiosos del planeta porque albergan una gran biodiversidad, además de cumplir muchas funciones y brindar servicios ambientales relacionados con los recursos hídricos, el conocimiento de su demanda de agua ecológica es de vital importancia para incluirlos en una gestión integrada del agua. En este estudio se presentan los resultados obtenidos en la estimación de la evapotranspiración en el humedal Paraíso de Huacho, aplicando el modelo de balance de energía superficial conocido como SEBAL a una subescena del satélite Landsat 7 ETM+ con fecha 8 de abril del 2000, la cual coincidió con el inicio de la época de afloramiento en el humedal. La estimación de la evapotranspiración actual ( $ET_a$ ) está en el rango de 0-6,3 mm.día<sup>-1</sup>, con valores más bajos en las zonas desérticas, en las parcelas en descanso y los valores más altos en los espejos de agua y en la vegetación del humedal. El humedal evapotranspira en altas tasas con una  $ET_a$  máxima de 4,9 mm.día<sup>-1</sup> y un valor medio de 4,6 mm.día<sup>-1</sup> para la fecha analizada. La evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) estimada usando el método FAO Penman-Monteith, para la fecha de paso del satélite, es de 3,9 mm.día<sup>-1</sup>, incluyendo el coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) con valores de 4,2 y 4,3 mm.día<sup>-1</sup> para la vegetación del humedal y para el cultivo de alfalfa, respectivamente. Estos dos valores están cerca a la  $ET_a$  de 4,6 y 3,9 mm.día<sup>-1</sup> estimados por SEBAL para la misma vegetación y que se encuentra en condiciones óptimas de crecimiento. Los resultados obtenidos demuestran que es factible estimar la  $ET_a$  usando imágenes de satélite con un error medio relativo menor al 10%.

**Palabras claves:** Sensoramiento remoto, evapotranspiración, humedales, SEBAL, Huacho.

#### ABSTRACT

Wetlands are among the most valuable ecosystems in the world because they are home to a great biodiversity, besides they fulfill many environmental functions and provide services related to water resources, therefore knowing the environmental water demands for wetlands is of vital importance to include these ecosystems in integrated water resources management. In this study, the results obtained from the estimation of the evapotranspiration in the Paraíso wetland are presented. The results were obtained by applying the surface energy balance model, known as SEBAL, to a sub-scene of Landsat ETM+ satellite on April 8, 2000, this coincides with the beginning of the upwelling season in the wetland. Actual evapotranspiration ( $ET_a$ ) estimates were in the range of 0-6.3 mm.day<sup>-1</sup>, the lowest values were registered in desert and fallow land areas and the highest values were registered in surface water bodies and wetland vegetations. The wetland evapotranspiration rate was high, with a maximum  $ET_a$  of 4.9 mm.day<sup>-1</sup> and average value of 4.6 mm.day<sup>-1</sup> on the analyzed date. The reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) estimated using the FAO Penman-Monteith method, on the satellite overpass date is 3.9 mm.day<sup>-1</sup> including the crop coefficient ( $K_c$ ) with values of 4.2 and 4.3 mm.day<sup>-1</sup> for wetland vegetation and the alfalfa crops, respectively. These two values are close to the  $ET_a$  4.6 y 3.9 mm.day<sup>-1</sup> estimated by SEBAL for the same vegetation in optimal growing conditions. The results obtained show that it is feasible to estimate the  $ET_a$  using satellite images with a relative mean error lower than 10%.

**Keywords:** Remote sensing, evapotranspiration, wetlands, SEBAL, Huacho.

## INTRODUCCIÓN

Los humedales que existen en la región costera del Perú son dependientes del aporte de las aguas subterráneas y en menor medida de los flujos de aguas superficiales. Ante la demanda creciente de la extracción del agua subterránea, principalmente con fines agrícolas y productivos, los ecosistemas se ven constantemente amenazados ante una posible disminución de este recurso. La principal dificultad para conservarlos desde un punto de vista ecohidrológico es la falta de información hidrometeorológica medida in situ, indispensable para estimar su consumo de agua. El uso de las imágenes de satélite en combinación con información meteorológica y los modelos de balance de energía en superficie son actualmente herramientas alternativas y complementarias a las técnicas tradicionales para estimar la evapotranspiración o consumo del agua de tal manera que esta información pueda contribuir a la conservación de estos ecosistemas.

La evapotranspiración ha sido observada por décadas, sin embargo, un mejor entendimiento de su distribución espacial y a diferentes escalas es posible por medio de las imágenes de satélite. Generalmente, los métodos para estimar la evapotranspiración han sido agrupados en cuatro categorías (Ahmad et al. 2005), por ejemplo, los métodos hidrológicos (balance de agua), mediciones directas (lisímetros), métodos micrometeorológicos (balance de energía) y métodos empíricos o métodos combinados basados en el balance de energía o factores climáticos (Thomthwaite & Mather 1955). La mayoría de estos métodos posibilitan estimaciones puntuales de la evapotranspiración, las que muchas veces no son suficientes para capturar la variación espacial en grandes áreas. Por otra parte, los modelos hidrológicos pueden hacer estimaciones de los patrones de la evapotranspiración, pero requieren una enorme cantidad de datos medidos en campo, lo cual a menudo no está disponible en países en desarrollo y menos en zonas de humedales por su difícil accesibilidad. Durante las últimas décadas, en varios estudios se han estimado los flujos de energía y los intercambios que ocurren en superficies con vegetación y sin vegetación, usando modelos basados en sensores remotos. Estos flujos de energía han sido estudiados en diversas cubiertas del suelo como en campos agrícolas (Kustas 1990, Bastiaanssen, 2000) y humedales (Mohamed et al. 2004 y Oberg & Melesse 2006).

Entre los métodos más empleados para estimar la evapotranspiración actual usando imágenes de satélite y la ecuación residual del balance de energía está el método SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land, Bastiaanssen et al. 1998a). SEBAL ha sido validado en diferentes escalas y climas como un método eficiente y rentable para cuantificar la evapotranspiración. Así, Allen et al. (2001) lo desarrolló a escala de cuenca y subcuenca. Bastiaanssen et al. (1998b, 2000) y Tasumi et al. (2000) obtuvieron resultados concordantes en regiones semiáridas. Hafeez et al. (2002) y Morse et al. (2000) lo aplicaron en regiones tropicales de sabanas y montañosas, respectivamente. Allen et al. (2001) encontraron calibraciones satisfactorias mediante el uso de lisímetros de campo.

En este trabajo se ha aplicado SEBAL con el objetivo de evaluar la factibilidad de estimar la evapotranspiración actual en el humedal Paraíso, considerando la fecha de adquisición de la imagen de satélite.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

### Área de estudio

El humedal Paraíso forma parte de los humedales de la costa central del Perú. Se encuentra ubicado en la provincia de Huaura, región Lima, entre los 77°36'W y 77°33'W, y los 11°9'S y los 11°13'S. Tiene una extensión aproximada de 638 ha, comprende dos espejos de aguas conocidas como laguna sur (186,5 ha) y laguna norte (34,7 ha), la primera con una mayor profundidad (1,5 m) a diferencia de la segunda (0,5 m). A su vez, el humedal comprende diferentes tipos de vegetación propias de estos ecosistemas hidromórficos (totorales, juncuales y gramadales). El clima, según la clasificación climática de Thornthwaite (SENAMHI PERÚ 1988), corresponde a un clima árido, con escasa precipitación en todas las estaciones, normalmente menos de 50 mm.año<sup>-1</sup>, con una ligera llovizna de junio a setiembre, semicálido con una temperatura media anual regularmente estable en torno a los 19 °C y con alta humedad, a excepción de los meses de verano.

Según la nueva delimitación oficial de unidades hidrográficas para el Perú se adoptó el método de Pfafstetter (ANA, 2008). El humedal Paraíso se encuentra ubicado en la unidad hidrográfica 137559 de tipo intercuenca. Limita por el norte con la cuenca del río Huaura, por el sur con la cuenca del río Chancay-Huaral y por el oeste con el océano Pacífico (Figura 1). La administración de los recursos hídricos le corresponde a la Administración Local de Agua Huaral-Huaura.

El humedal Paraíso debe su origen a la inundación sucedida en marzo de 1973, como consecuencia del rebose del excedente hídrico de la irrigación Santa Rosa. Estas aguas antes de seguir su curso natural hacia el mar y debido a la topografía de la zona, se depositaron en depresiones del terreno, dando origen a una albufera que por un par de meses fue una sola, hasta que los materiales de arrastre de un médano derruido cegaron la parte central, convirtiéndola en un extenso pantano y dividiéndola en dos albuferas, norte y sur, como es en la actualidad (Figura 1).

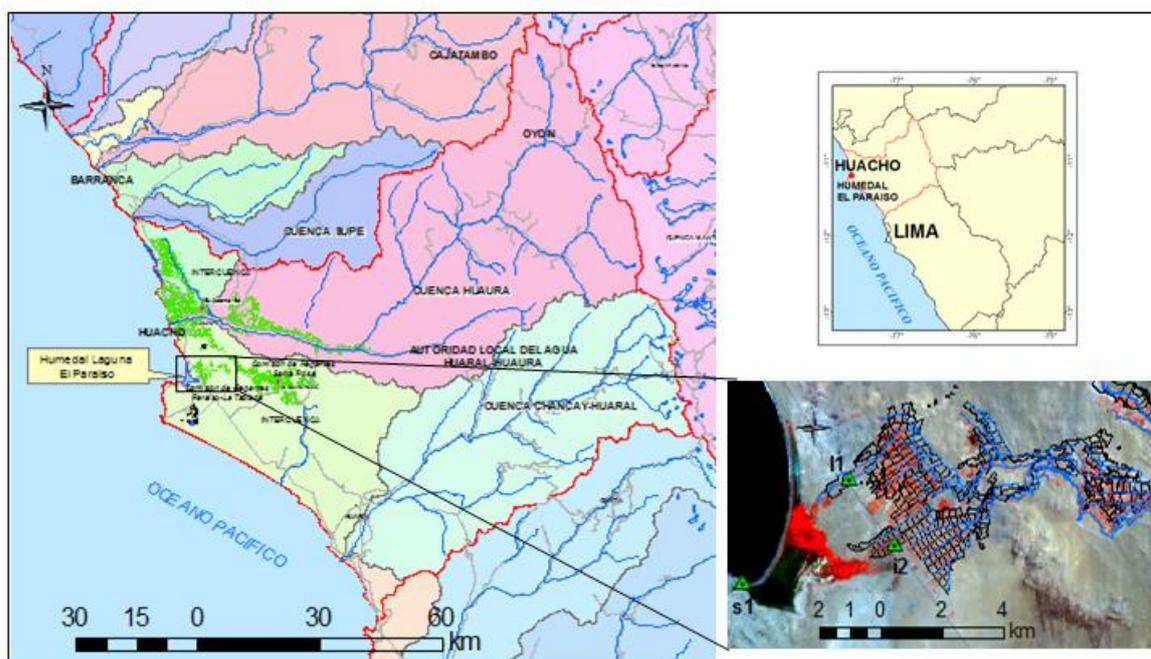


Fig. 1. Ubicación del humedal Paraíso, Huacho.

### Materiales

Se empleó una subescena del satélite Landsat 7 ETM+ (*Path* 006 y *Row* 068) de fecha 8 de abril de 2000, descargada gratuitamente de la Interface de Datos para las Ciencias de la Tierra (ESDI) de la Universidad de Maryland. En la Tabla 1 se presenta la información meteorológica usada. Todas las variables meteorológicas fueron tomadas de la estación Alcantarilla (11°3'1" S; 77°33'1" W), excepto el dato de la velocidad del viento, que al no contarse con medidas para la fecha de la imagen en dicha estación, se tomó de la estación Santa Rosa (11°13'1" S; 77°23'1" W). Ambas estaciones son del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Tabla 1. Información meteorológica necesaria para la aplicación de SEBAL.

Fecha	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín. (°C)	Horas de sol (h)	Velocidad del viento (m.s <sup>-1</sup> )*	Humedad relativa (%)
08/04/2000	26	17,4	8,3	3	80,3

\*La velocidad del viento fue tomada de la estación Santa Rosa.

### Modelo SEBAL

El modelo SEBAL calcula los componentes del balance de energía combinando parametrizaciones físicas y relaciones empíricas con una mínima cantidad de información de campo (Bastiaanssen

1995). La información clave para aplicar este modelo consiste en la radiancia espectral medida por los satélites en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético e información meteorológica de rutina como la velocidad del viento, temperatura del aire, radiación solar y humedad del aire. La ecuación del balance de energía viene dada por la siguiente expresión:

$$R_n = G + H + \lambda E \quad (1)$$

donde:  $R_n$  es la radiación neta ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $G$  el flujo de calor en el suelo ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $H$  el flujo de calor sensible ( $W \cdot m^{-2}$ ) y  $\lambda E$  es el flujo de calor latente ( $W \cdot m^{-2}$ ).

En SEBAL la radiación neta ( $R_n$ ) fue computada usando la información de la radiancia espectral en las diferentes longitudes del espectro captada por los satélites de observación terrestre. Solo puede usarse información de aquellos satélites que cuenten con una banda en la región del infrarrojo térmico, la cual sirve para estimar la temperatura de superficie. El Flujo de calor en el suelo ( $G$ ) fue estimado a través de la radiación neta, la temperatura de superficie y el cálculo de algunos índices de vegetación. El flujo de calor sensible ( $H$ ) se ajustó mediante la selección de dos píxeles anclas tomados de la imagen, que representan condiciones extremas, uno de aridez (flujo de calor latente cercano a cero) y el otro de humedad (flujo de calor sensible cercano a cero). Con estos tres componentes se calculó el flujo de calor latente ( $\lambda E$ ) como un residual del balance de energía, para el momento de paso del satélite. En la conversión de los valores instantáneos del  $\lambda E$  a valores diarios (24 horas) se usó la fracción evaporativa ( $\Lambda$ ) y la radiación neta diaria ( $R_{n24}$ ), (Ecuación 2 y 3). En la Figura 2 se puede ver un esquema de los componentes del balance de energía. Un mayor detalle de las ecuaciones usadas en SEBAL pueden encontrarse en (Waters et al. 2002).

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G} = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} \quad (2)$$

$$\lambda E_{24} = \Lambda \times R_{n24} \quad (3)$$

El cálculo de la evapotranspiración usando SEBAL fue realizado con el programa ERDAS IMAGINE, mediante la programación de las ecuaciones en el lenguaje de macros de ERDAS (EML). Para el análisis posterior de los mapas de evapotranspiración generados y su integración con otras capas de información se usó el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcGis. El mapa de evapotranspiración calculado por SEBAL se puede ver en la Figura 2.

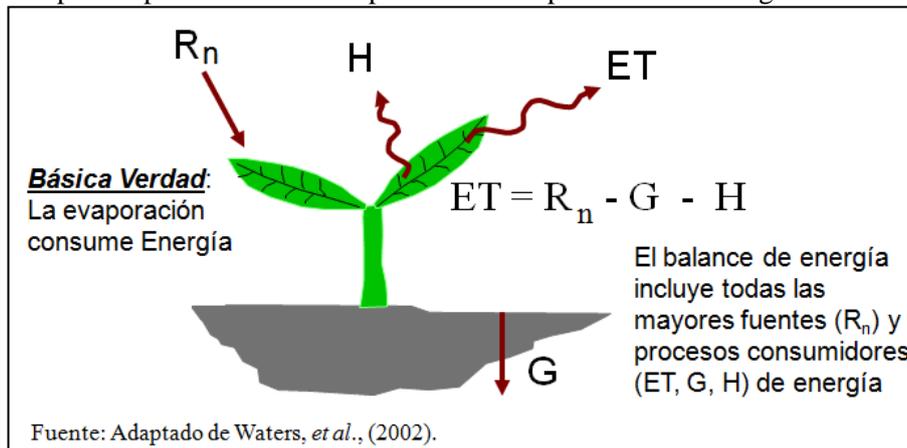


Fig. 2. Componentes del balance de energía en el modelo SEBAL.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Métodos de validación

Debido a que no existen datos de evapotranspiración medidos en el humedal se procedió a validar el mapa de evapotranspiración calculado por SEBAL con dos métodos alternativos. El primero asumiendo que la vegetación perenne y permanentemente húmeda del humedal debería de evapotranspirar valores cercanos a la evapotranspiración de referencia ( $ET_r$ ) (Jia et al. 2009). En el humedal Paraíso la superficie ideal podría ser la vega de ciperáceas, aunque las condiciones de

humedad en el humedal pueden variar con el tiempo, según los aportes de las aguas subterráneas y superficiales; en la vega de ciperáceas la vegetación y el suelo se mantienen permanentemente húmedos.

Para la selección de los píxeles que presentan una vegetación permanentemente húmeda, se usó el mapa de cobertura y usos del suelo, y las imágenes de temperatura de superficie y albedo estimados con SEBAL ya que los píxeles húmedos presentan un valor bajo de temperatura y albedo.

En la vega de ciperáceas se obtuvo una  $ET_a$  media de 4,6 mm.día<sup>-1</sup>. La  $ET_o$  estimada por el método FAO Penman-Monteith (Allen et al. 1998) para la fecha de toma de la imagen fue de 3,9 mm.día<sup>-1</sup>. Dado que la evapotranspiración estimada por el modelo SEBAL viene a ser la evapotranspiración actual, es necesario multiplicar el valor de la  $ET_o$  por el coeficiente del cultivo ( $K_c$ , Ecuación 4), el cual es dependiente del estado fenológico de la planta. En el estudio de la FAO (Allen et al. 1998) se consigna para el  $K_c$  un valor de 1,2, en climas templados para la vegetación de humedales (etapa media de crecimiento). Este valor fue corregido para las condiciones climáticas de la zona y se obtuvo un  $K_c$  de 1,08 y una evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) de 4,2 mm/día. Este valor calculado se acerca a la  $ET_a$  estimada por SEBAL, con una diferencia de 9,5 % entre ambas (Tabla 2).

En el segundo método se empleó la cédula de cultivo para el valle de Huaura, específicamente para la comisión de regantes La Tablada-Paraíso junto con la cartografía de parcelas del valle elaborada por el Proyecto Especial de Titulación de Tierras y Catastro Rural (PETT) a la escala 1/10 000, cuya base de datos cuenta con información de los cultivos que normalmente son sembrados por los agricultores. Con esta información se procedió a identificar las parcelas sembradas de alfalfa en el mapa de evapotranspiración calculado por SEBAL, y se obtuvo un valor medio de 3,9 mm.día<sup>-1</sup>. Para el caso de la alfalfa se tomó un  $K_c$  de 1,10, consignado para el mes de abril en el estudio hidrológico elaborado para el valle de Huaura (INRENA 2004). Con este valor se calculó la  $ET_c$  que fue de 4,3 mm.día<sup>-1</sup>. Este valor calculado se acerca a la  $ET_a$  estimada por SEBAL con una diferencia de 9,3% entre ambas (Tabla 2).

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (4)$$

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en las comparaciones efectuadas con los dos métodos alternativos de validación. Los resultados obtenidos muestran la efectividad del método SEBAL y se obtuvo una discrepancia del 9,5% para la vegetación de los humedales con respecto a la  $ET_c$  y de 9,3% para la alfalfa con respecto a la  $ET_c$ .

**Tabla 2.** Comparación de los valores de la evapotranspiración estimados por SEBAL y el método Penman-Monteith (FAO 56) con la inclusión del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ). Fecha de la imagen 08/04/2000.

Superficie	$ET_{aSEBAL}$ (mm.día <sup>-1</sup> )	$ET_{oFAO}$ (mm.día <sup>-1</sup> )	$K_c$	$ET_c$ (mm.día <sup>-1</sup> )	Error medio absoluto (mm.día <sup>-1</sup> )	Error medio relativo (%)
Vega de ciperáceas	4,6	3,9	1,08	4,2	0,3	9,5
Alfalfa	3,9	3,9	1,10	4,3	0,2	9,3

### Evaluación espacial de la $ET_a$ diaria

El mapa de evapotranspiración estimada en base a la imagen Landsat y el modelo SEBAL para el día 8 de abril de 2000 en el ámbito conformado por el humedal Paraíso y el bloque de riego Paraíso-La Tablada se muestra en la Figura 3. También (Tabla 3) se muestran los valores de la  $ET_a$  extraídos para las dos clases predominantes de cobertura del suelo en el humedal.

La  $ET_a$  mostró un rango entre 0 y 6,3 mm.día<sup>-1</sup>. Los valores de la  $ET_a$  para los espejos de agua del humedal variaron en el rango de 4,3 a 6,1 mm.día<sup>-1</sup>, con un valor medio de 5,2 mm.día<sup>-1</sup>. El valor total de la evaporación en los espejos de agua del humedal, los que en conjunto tienen una extensión de 221 ha, se estimó en 11 502 m<sup>3</sup>, valor que representa el volumen de agua perdido por evaporación para el día considerado. Debido a que los cuerpos de agua del humedal son de escasa profundidad, se consideró en el modelo SEBAL que sólo un valor de 3% de la radiación neta pasa

a formar parte de la reserva calorífica de los espejos de agua. En los espejos de agua de mayor profundidad la reserva calorífica es mayor, además esta energía almacenada en el agua no está disponible de manera inmediata para la evaporación.

Los valores de la  $ET_a$  para la vegetación del humedal están en el rango de 3,4 a 4,9  $\text{mm.día}^{-1}$ , con un valor medio de 4,6  $\text{mm.día}^{-1}$ . Este valor representa la  $ET_a$  en la vegetación conformada principalmente por junco, grama y algunos parches de totora, que con una extensión de 384 ha, evapotranspiran 17 669  $\text{m}^3$  de agua provenientes principalmente de las filtraciones del acuífero. La evapotranspiración en la vegetación del humedal es alta (4,6  $\text{mm.día}^{-1}$ ), debido a la vegetación herbácea perenne que crece en el humedal, y a que el agua siempre está disponible para satisfacer la demanda evaporativa de la atmósfera durante todo el año, especialmente en los meses de verano cuando la nubosidad es baja.

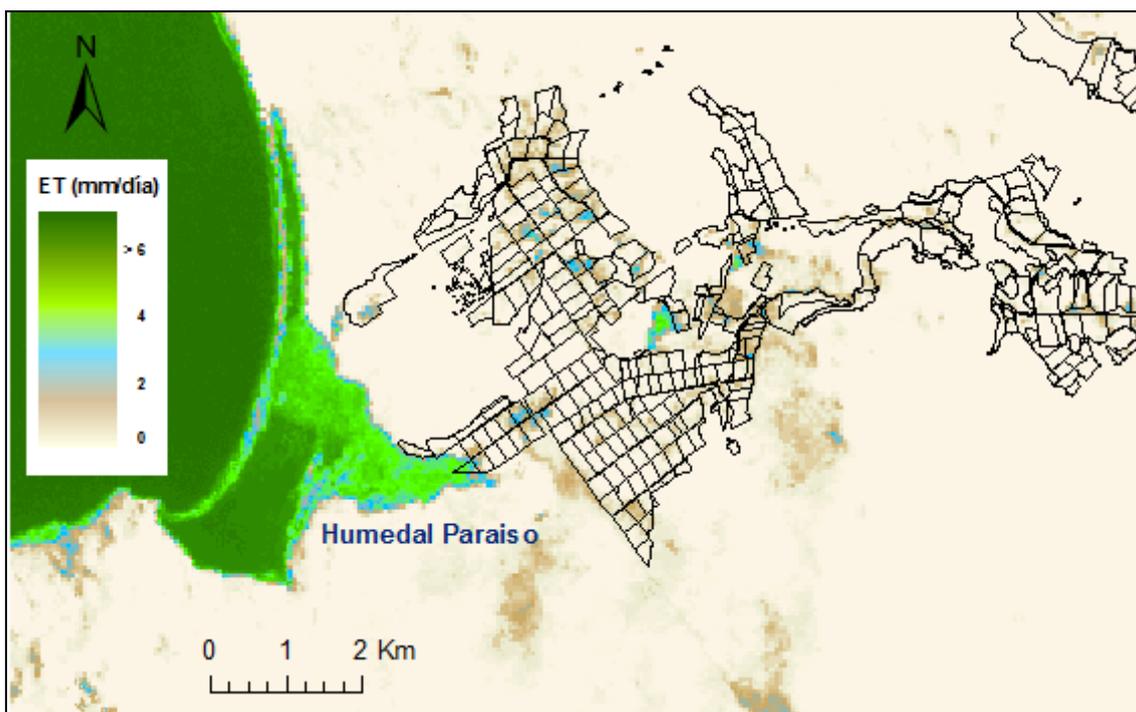
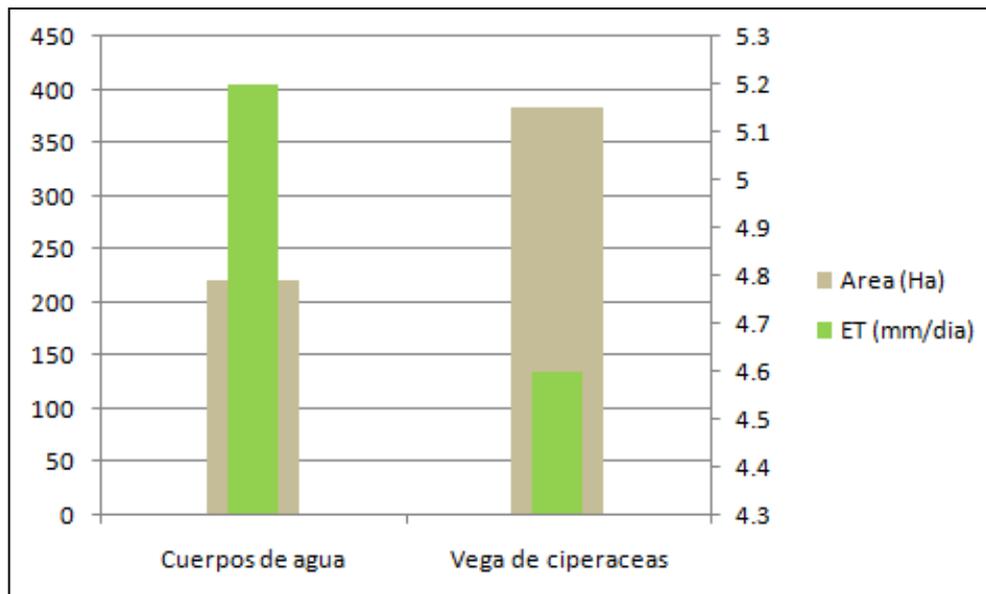


Fig. 3. Mapa de la  $ET_a$  estimada el día 08/04/2000 por SEBAL en el humedal Paraíso.

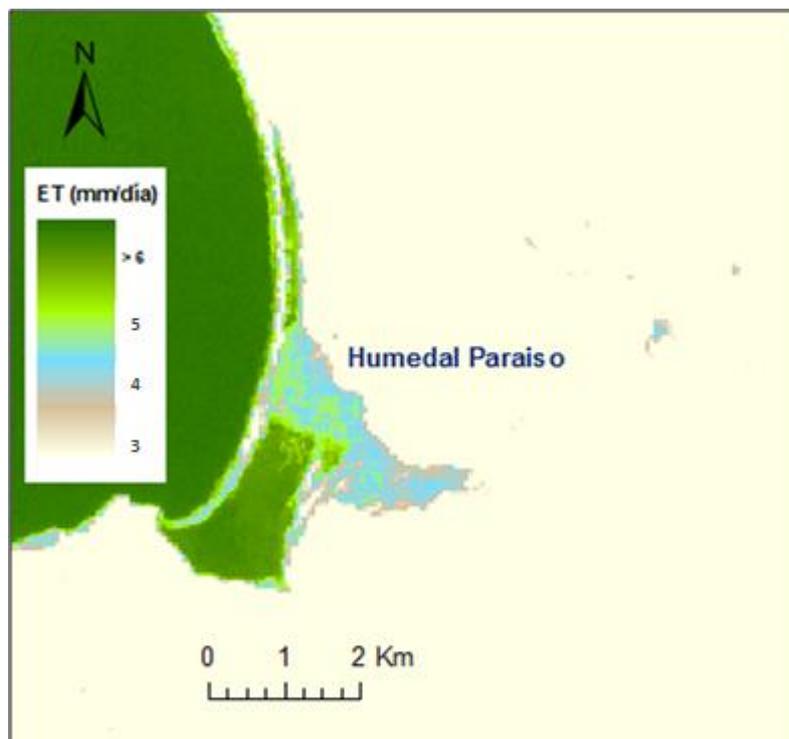
Los valores de  $ET_a$  estimados para las áreas agrícolas de la comisión de regantes La Tablada-Paraíso estuvieron en el rango de 0 (suelo en descanso) a 3,9  $\text{mm.día}^{-1}$  en las parcelas con cultivos que presentan un alto vigor vegetal al momento de paso del satélite, coincidiendo con la  $ET_o$  estimada con la información meteorológica. Aunque la campaña agrícola se inicia en el mes de agosto en el valle de Huaura, el cultivo de la alfalfa es permanente y ocupa la mayor extensión de los cultivos en la comisión de regantes “La Tablada-Paraíso” con cerca de 247 ha para la campaña agrícola 2001-2002 (INRENA 2004). Por otra parte, el mayor valor de la  $ET_a$  se encuentra en los espejos de agua (5,2  $\text{mm.día}^{-1}$ ) según se ve en la Tabla 3 y la Figura 4, pero el volumen de agua consumido es mayor en la vega de ciperáceas (17 669  $\text{m}^3$ ) que en los espejos de agua (11 502  $\text{m}^3$ ), dada la mayor extensión de la primera y a que no presenta estrés hídrico durante el año.

Tabla 3. Resultados de la  $ET_a$  estimados por SEBAL, para los usos y coberturas del suelo en el área de estudio.

Uso/cobertura actual del suelo	Área (ha)	Rango $ET_a$ ( $\text{mm.día}^{-1}$ )	$ET_a$ ( $\text{mm.día}^{-1}$ )	Desviación estándar	$ET_a$ Volumen ( $\text{m}^3$ )
Espejos de agua	221	4,3-6,1	5,2	0,16	11 502
Vegetación del humedal	384	3,4-4,9	4,6	0,23	17 669



**Fig. 4.** Evapotranspiración actual ( $ET_a$ ) en el humedal Paraíso. El eje Y de la izquierda es Área (ha) y eje Y de la derecha es evapotranspiración ( $mm \cdot día^{-1}$ ).



**Fig. 5.** Mapa de la  $ET_a$  para el humedal Paraíso para el día 8/4/2000.

En la Figura 5 se puede apreciar la variación espacial de la  $ET_a$  dentro del humedal. En ésta se observa claramente algunos patrones de la  $ET_a$  ya que los diferentes hábitats en el humedal se comportan de manera distinta ante los intercambios de energía con la atmósfera. En la parte central del humedal destaca la vega de ciperáceas con una diferencia en la evapotranspiración debido a los distintos tipos de vegetación que la conforman. En la orilla ubicada al este de la vegetación del humedal, la  $ET_a$  es menor debido a la presencia de gramadales, mientras que al lado opuesto la  $ET_a$  es mayor por la presencia de los juncuales. Las lagunas presentan algunas diferencias en la  $ET_a$  debido a las diferencias en turbidez y a la presencia de vegetación flotante y sumergida. También

se aprecian algunas zonas de baja  $ET_a$  dentro del humedal, las cuales corresponden a suelos salinos y suelos sin vegetación.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la conservación de los humedales costeros del Perú es básico el conocimiento de las condiciones ecohidrológicas de este tipo de ecosistema. Al ser el humedal Paraíso dependiente de los excedentes hídricos de la cuenca, un cambio en los aportes de agua en el humedal puede modificar las funciones y servicios ambientales que brinda este ecosistema. Por lo tanto, un conocimiento de su demanda hídrica es crítico para su conservación. En este trabajo se demuestra la factibilidad de aplicar el modelo SEBAL y las imágenes del satélite Landsat para estimar espacialmente la evapotranspiración actual del humedal en una fecha específica, con la ventaja de que solo se necesita información meteorológica de rutina y que las imágenes de satélite empleadas de libre acceso.

Los espejos de agua del humedal tienen una  $ET_a$  media de  $5,2 \text{ mm.día}^{-1}$  con un volumen evapotranspirado de  $11\,502 \text{ m}^3$ , la vegetación del humedal (vega de ciperáceas) tiene una  $ET_a$  de  $4,6 \text{ mm.día}^{-1}$  con un volumen evapotranspirado de  $17\,669 \text{ m}^3$ . Dada la mayor extensión de la vegetación del humedal, ésta consume mayor cantidad de agua que los cuerpos de aguas sur y norte juntos.

La comparación de los valores estimados por SEBAL con los obtenidos usando la fórmula FAO Penman-Monteith, incluyendo el empleo del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), aunque no son absolutos, muestran una buena concordancia en los valores de  $ET_a$  y la  $ET_c$  estimados en la vegetación del humedal y en las áreas agrícolas del valle, con un error medio menor de 10%. La aplicación de este modelo debe validarse con mediciones in situ, como el uso del tanque de evaporación o técnicas micrometeorológicas, la razón de Bowen o covarianza de remolinos, al igual que en otros países donde se ha aplicado SEBAL. Sin embargo, se puede decir en una primera aproximación que los resultados del modelo son aceptables en la estimación espacial de la  $ET_a$ .

El mapa final de evapotranspiración estimado por SEBAL se ve influenciado en gran medida por la resolución de la banda térmica. Por ejemplo, algunas parcelas agrícolas no fueron detectadas por su pequeña extensión, lo que modifica el valor de la temperatura estimada por el sensor y por ende los componentes del balance de energía. La resolución del pixel en la banda 6 es de 60 m en el Landsat 7 y de 120 m en el Landsat 5, ambos actualmente se encuentran operativos, pero existe una necesidad de mejorar esta resolución para obtener un mayor detalle en la estimación de la evapotranspiración a escalas mayores. La presencia de nubes es un factor que limita la aplicación de SEBAL. Las imágenes captadas por los satélites Landsat 5 y 7 son cada 16 días por lo que existe pocas oportunidades de conseguir imágenes libres de nubosidad. Las nubes se deben detectar y enmascarar al momento de aplicar el modelo, ya que por su baja temperatura ocasiona resultados erróneos en la estimación de la evapotranspiración debajo de ésta. Igualmente el tipo de suelo, rocas y las sombras producen algunos resultados erróneos, en las zonas desérticas, lo que puede ser evitado con un mapa de usos y coberturas del suelo. La presencia de corrientes advectivas también pueden influir en la estimación final de la evapotranspiración, sobre todo en horas de la tarde en que la velocidad del viento es mayor, lo que podría corregirse si se cuenta con datos meteorológicos horarios medidos en el humedal (Tasumi 2003). Así, es recomendable complementar las imágenes Landsat con imágenes de mayor resolución temporal como MODIS (imágenes diarias).

La falta de información meteorológica horaria limita un poco la obtención de valores más precisos de la evapotranspiración con SEBAL. Igualmente la falta de algunos datos diarios condicionan los resultados. Si bien, la estimación de la  $ET_a$  diaria en el humedal Paraíso es importante para fines de gestión del agua en el humedal, es necesario estimar la  $ET_a$  en periodos de tiempo mayores (anuales) lo que se puede lograr con el uso de escenas multitemporales.

Los resultados obtenidos en esta primera aplicación de SEBAL se consideran aceptables, ya que están dentro de los límites esperados para la estimación de la  $ET_a$  diaria por medio del modelo SEBAL, según Bastiaanssen et al. (2005), no menor de 85% a escala diaria. Se espera que con

mejores datos meteorológicos e información medida in situ en el humedal, el modelo SEBAL calcule con mayor precisión la  $ET_a$  en el humedal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, M. D., Magagula, T. F., Love, D., Kongo, V., Mul, M.L., & Kinoti, M. (2005). Estimating actual evapotranspiration through remote sensing techniques to improve agricultural water management: a case study in the transboundary Olifants catchment in the Limpopo basin, South Africa. 6th WaterNet/WARFSA/GWP Annual Symposium, 1-4 November 2005, Ezulwini, Suazilandia.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 300 pp., FAO, Rome, Italy.
- Allen, R.G. (1998). Predicting evapotranspiration demands for wetlands. ASCE Wetlands Engineering & River Restoration Conference, Denver Colorado March 20-29.
- Allen, R.G., Bastiaanssen, W.G.M., Tasumi, M. & Morse, A. (2001). Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model & Landsat Images. Paper # 01-2224, ASAE, Annual International Meeting; Sacramento, CA.
- ANA (2008). Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú. Resumen ejecutivo pp. 36. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.
- Bastiaanssen, W.G.M. (1995). Regionalization of surface flux densities & moisture indicators at composite terrain, (Ph.D. thesis), appeared also as Report 109 of DLO-Win & Staring Center, Wageningen, The Netherlands: 273pp.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A. & Holtslag, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212 (213): 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G.J. & Van der Wal, T. (1998b). The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL): Part 2 Validation. *Journal of Hydrology*, 212 (213): 213-229.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000) SEBAL-based sensible & latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 222: 87-100.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G., Thoreson B.P. & Allen, R.G. (2005). SEBAL model with remotely sensed data to improve water resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage, ASCE*, 131(1):85-93.
- Hafeez, M. M., Chemin, Y., Van De Giesen, N. & Bouman, B. (2002). Field Evapotranspiration estimation in central Luzon, Philippines using different sensors: Landsat 7 ETM+, Terra Modis and Aster. In: ISPRS/CIG Conference July 8-12, Canada.
- INRENA (2004). Propuesta de asignaciones de agua en bloque – volúmenes anuales y mensuales para la formalización de derechos de uso de agua en el valle Huaura. PROFODUA-IRH.
- Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y., & Liu, G. (2009). Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10):1775–1787.
- Kustas, W. P. (1990) Estimates of evapotranspiration with a one- & two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *Journal of Applied Meteorology*, 29: 704-715.
- Mohamed, Y.A., Bastiaanssen, W.G.M. & Savenije, H.H.G. (2004). Spatial variability of evaporation & moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. *Journal of Hydrology*, 289: 145-164.
- Morse, A., Tasumi, M., Allen, R. G. & Kramber, W. J. (2000). Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear river basin of Idaho through remote sensing. EOSDIS, Final Report. Idaho Department of Water Resources - University of Idaho, 107 pp.
- Oberg, J. M. & Melesse, A. M. (2006). Evapotranspiration Dynamics at an Ecohydrological Restoration Site: An Energy Balance & Remote Sensing Approach. *Journal of the American Water Resources Association*, 42 (3): 565-58.
- Tasumi, M., Bastiaanssen, W. G. M. & Allen, R. G. (2000). Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing, appendix C: a step by step running SEBAL, Final Report, The Raytheon Systems Company, EOSDIS Project, 28 pp.
- Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Ph.D. Dissertation, University of Idaho, Moscow, Idaho, pp. 357.
- Thomthwaite, C. W. & Mather, J. R. (1955). The water balance. *Publication in Climatology*, 8(1):1-104, Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology.
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. & Bastiaanssen, W. G. M. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for L&): Advanced Training and Users Manual, version 1.0, pp. 98. Idaho Department of Water Resources: Boise, Idaho, USA.