

FORMULACIÓN DEL ÍNDICE DE DEFICIENCIA EVAPOTRANSPIRATIVA. UNA HERRAMIENTA PARA LOS ESTUDIOS DE EVOLUCIÓN DE LA ARIDEZ

FORMULATION OF THE EVAPOTRANSPIRATIVE DEFICIENCY INDEX. A TOOL FOR THE STUDIES OF EVOLUTION OF THE ARIDITY

LIC. LORGE ACOSTA-BROCHE¹, LIC. ZOLTAN I. RIVERO-JASPE² Y LIC. RÓGER E. RIVERO-VEGA²

¹ Instituto de Investigaciones Agro-Forestales. UCTB Estación Experimental Agro-Forestal de Camagüey. Ave. Ignacio Agramonte No. 178, Los Coquitos, Camagüey, Cuba, camaguey@forestales.co.cu.

² Centro Meteorológico de Camagüey. Carretera de Nuevitas, Km 7 ½, Camagüey, Cuba, Apdo. 160, C.P. 70100, zoltan@met.cmw.inf.cu; roger@met.cmw.inf.cu

RESUMEN

La combinación del aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones se ha identificado como el principal impacto al que se enfrentarán las especies y formaciones forestales de distribución mediterránea en la provincia de Camagüey ante el cambio climático en progreso. No obstante a medirse de manera independiente, ambas variables actúan al unísono sobre los sistemas agrícolas y forestales, y dan lugar a distintas categorías de aridez. Basado en las ecuaciones del submodelo abiótico del modelo ForClim de Bugmann y Solomon (2000) y Bugmann y Cramer (1998), se formuló un índice edafoclimático (IDEt) que determina el grado de deficiencia evapotranspirativa anual y también en pasos mensuales de una unidad de suelo real, añadiéndoles a los parámetros climatológicos las variables capacidad de campo y profundidad efectiva del suelo.

Palabras claves: aridez, cambio climático, índice edafoclimático.

ABSTRACT

The combination of the increase in temperature and the decrease of the precipitations has been identified as the main impact of the climatic change on the forest species and formations of Mediterranean distribution in the province of Camagüey. Nevertheless to be measured in an independent way, both variables act to the unison on the agricultural and forest systems and they propitiate different categories of aridity. Based on the equations of the abiotic sub model of the model ForClim of Bugmann and Solomon (2000) and Bugmann and Cramer (1998) an edaphoclimatic index (IDEt) was formulated. The IDEt determines the rate of both annual and monthly evapotranspirative deficiency of a unit of real soil, adding to the climatological parameters, the variable field capacity and effective depth of the soil.

Key words: aridity, climatic change, edaphoclimatic index.

INTRODUCCIÓN

En los estudios de impacto del cambio climático sobre sistemas forestales, una vez determinados los valores de las variables climáticas principales, tanto para el clima base como para los escenarios futuros, es conveniente combinarlos para evaluar cómo actúan de conjunto, pues solo en contadas excepciones una sola variable determina las condiciones de vida de una especie. Con este fin se utilizan los índices bioclimáticos que tratan de definir o caracterizar

climas y paisajes usando un solo parámetro, y que puede estar relacionado con la productividad y otros aspectos relevantes de ecosistemas actuales o potenciales presentes en un área dada (Rivero, 2008).

Según Markesteijn (2010), la disponibilidad de agua en el suelo determina la composición, la estructura de la comunidad y el funcionamiento de los bosques tropicales. En el caso particular de la provincia de Camagüey, donde

las variaciones de temperatura entre los valores extremos no superan los 1,1 °C (Acosta *et al.*, inédito), la distribución y el crecimiento de las especies manejadas en plantaciones forestales los determinan el tipo de suelo y su contenido de humedad.

No obstante a la existencia y utilización de varios índices de aridez, índice radiactivo de sequía de Budyko, índice de aridez del PNUMA, índice de Riabchikov y el índice de aridez ecológica, Rivero (2008), ninguno de los que se utilizan en las ciencias forestales ha sido adaptado a las condiciones climáticas de Cuba. En este caso, y con el fin de hacer evaluaciones a escala local, es pertinente incluir en un solo índice la influencia de las variables climáticas principales y del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este índice tiene similitudes en sus preceptos teóricos con el índice de aridez ecológica (R) y el índice de aridez del PNUMA (K), según estos fueron discutidos por Rivero (2008); sin embargo, la inclusión de la influencia de variables del suelo lo convierte en un índice edafoclimático sin referencias conocidas en la literatura.

Para su formulación se utilizó la propuesta de Bugmann y Solomon (2000) en la versión 2.9 del modelo ForClim, complementada con las ecuaciones de la versión 2.6 (Bugmann y Cramer, 1998).

Las variables climáticas principales utilizadas fueron temperatura media (T), temperatura mínima media (Tn), temperatura máxima media (Tx) y acumulado de precipitaciones (P), todas en pasos mensuales.

El balance hídrico se calculó según el modelo de Budyko-Sellers (Rivero *et al.*, 2009; Sellers, 1970) y la Evapotranspiración potencial (E_0) según el método de Hargreaves (Allen *et al.*, 1998), calibrado según el método estándar de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción del índice

La formulación tiene en cuenta las variables climáticas principales y la capacidad específica de retención de agua propia de cada tipo de

suelo, determinada por su capacidad de campo en por ciento (cc) y profundidad efectiva en milímetros (pef).

De acuerdo a Bugmann y Solomon (2000), esta es la ecuación para especies perennifolias:

$$uDr = 1 - \sum_{Tm \geq k} \frac{Em}{Dm} \quad (\text{ec. 1})$$

$m = 1, 2 \dots 12$

donde:

Tm : Temperatura mensual media

k : Valor de la temperatura umbral.

En las especies forestales tropicales $k \approx 8$ °C (Bugmann, com. pers.) y Em es la evapotranspiración desde el suelo, que se asume que es el menor valor entre las funciones demanda (Dm) y suministro (Sm). La condición $Tm \geq k$ se basa en que las especies perennifolias pueden fijar CO_2 siempre que la temperatura media sea mayor que la temperatura umbral, cosa que ocurre siempre en las condiciones climáticas de Camagüey. Así:

$$IDE = 1 - \sum_{(ene-dic)} \frac{Em}{Dm} \quad (\text{ec. 2})$$

Por su parte, Em , según Bugmann y Cramer (1998), se calcula de esta forma:

$$Em = \min(Sm, Dm) \quad (\text{ec. 3})$$

A su vez, Sm se calcula relacionando la humedad media del suelo (Ωm) con la máxima capacidad retentiva del mismo (Ωmax), para lo cual se utiliza la ecuación:

$$Sm = cw \frac{\Omega m}{\Omega max} \quad (\text{ec. 4})$$

Debido a que la función Sm y la humedad media del suelo para un mes (wm) calculada por el método de Budyko-Sellers representan la capacidad máxima de agua disponible que puede perder el suelo por evapotranspiración, se propone sustituir en la ecuación 3 el término Sm por wm . Este último se determina según la ecuación:

$$wm = \frac{w1m + w2m}{2} \quad (\text{ec. 5})$$

A su vez:

$$w2m = Pm + w1m - E_1m - S_1m \quad (\text{ec. 6})$$

donde:

$w1m$ y $w2m$: Humedad del suelo a comienzos y finales del mes

Pm : Precipitación mensual

E_1m : Evapotranspiración real

S_1m : Exceso de agua o escurrimiento

Obsérvese que la $w2m$ de un mes cualquiera (m) resulta ser la $w1m$ del mes siguiente ($m + 1$).

Al modificar la ecuación 3 se obtiene:

$$Em = \min(wm, Dm) \quad (\text{ec. 7})$$

La función demanda (Dm) es igual al estimado de la evapotranspiración potencial (E_0) y se calcula mediante la ecuación:

$$E_{om} = 0.0022 \times Ra_m \times \sqrt{T_{x_m} - T_{n_m}} \times T_{m_m} + 17.8 \quad (\text{ec. 8})$$

Siendo Ram el equivalente de la radiación solar extraterrestre en milímetros de agua evaporada. Esta variable astronómica es función solo de la latitud geográfica y la época del año.

La influencia de las características específicas de cada unidad de suelo es captada cuando en la ecuación 6 se calcula la evapotranspiración real (E_1m) de esta forma:

$$\text{Si } wm > wk, \text{ entonces } E_1m = E_0m \quad (\text{ec. 9})$$

De lo contrario:

$$\text{Si } wm < wk, E_1m = (wm / wk) \times E_0m \quad (\text{ec. 10})$$

Por su parte, wk se calcula multiplicando el parámetro k por la máxima capacidad de agua contenida en una unidad de suelo ($wmax$), o sea:

$$wk = k \times wmax \quad (\text{ec. 11})$$

y

$$wmax = \frac{cc \times pef}{10_0} \quad (\text{ec. 12})$$

De esta forma la ecuación final del $IDEt$ sería:

$$IDEt = 1 - \sum_{(ene-dic)} \frac{\min(wm, E_0)}{E_0} \quad (\text{ec. 13})$$

Lo que implica que en el mes que $wm \geq E_0$ no existe déficit evapotranspirativo, y lo contrario cuando $wm < E_0$.

Debido a que el $IDEt$ cuantifica el porcentaje de déficit de agua en el suelo en función de la satisfacción de la demanda (E_0) y es análogo al índice de aridez del PNUMA (K), se propone clasificar los suelos en función de sus valores anuales de esta forma: $1 \geq IDEt \geq 0,7$ muy seco; $0,7 \geq IDEt \geq 0,5$ seco; $0,5 \geq IDEt \geq 0,35$ subhúmedo seco; $0,35 \geq IDEt \geq 0,05$ subhúmedo; $0,05 \geq IDEt \geq 0$ húmedo. Para ilustrar esta clasificación se muestra el mapa de deficiencia evapotranspirativa para el clima actual del municipio de Camagüey (*Fig. 1*).

Debido a que el $IDEt$ se calcula también en pasos mensuales, el análisis de su marcha anual puede utilizarse para relacionar las fases fenológicas con las condiciones de aridez propias de cada mes del año. En la *Fig. 2* se ejemplifica para las condiciones del municipio de Camagüey en el clima base y en los escenarios de cambio climático para 2050 y 2100.

La escala espacial en que operan los índices climáticos suele ser su principal limitante a la hora de evaluar su relación con los sistemas naturales a escala local. En tal sentido el índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI) y el índice de humedad de cultivos (CMI) asumen que las propiedades del suelo son uniformes en zonas que ocupan entre 7000 y 100 000 km². Sin embargo, en realidad los parámetros edáficos son muy variables a pequeñas escalas (Narasimhan y Srinivasan, 2005).

La teoría que soporta a los índices PDSI, K, R y CMI hace que en su comportamiento prevalezca la influencia de las variables climáticas. Así, en las condiciones de la provincia de Camagüey la escasa variabilidad espacial de las temperaturas determina que los valores del índice K estén condicionados por el acumulado de las precipitaciones, correspondiendo a los territorios más lluviosos los climas húmedos y subhúmedos, observándose un gradiente de humedad noreste-sudoeste (Rivero, 2008).

Como se muestra en las ecuaciones 9-12, los valores del $IDEt$ a pequeña escala (unidades de suelo) en condiciones iguales de clima (municipios) dependen de la capacidad que tenga

el suelo de retener agua (ec. 12). Por lo tanto, debido a la gran variedad de suelos que posee la provincia (IS, 1988), unido a su irregular distribución espacial y a la diversidad en cuanto a

la profundidad efectiva, no aparecen gradientes horizontales de aridez, y unidades de suelo adyacentes pueden ubicarse en los extremos opuestos de la clasificación.

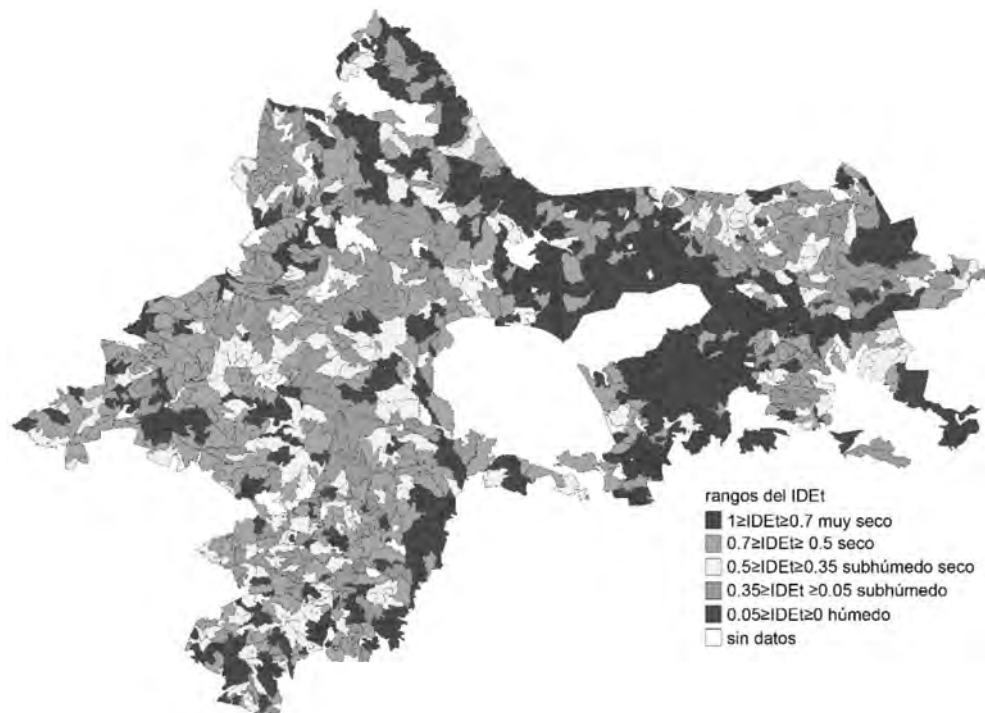


Figura 1. Distribución espacial del IDEt en el municipio de Camagüey en el período 1976-2005 (clima base).

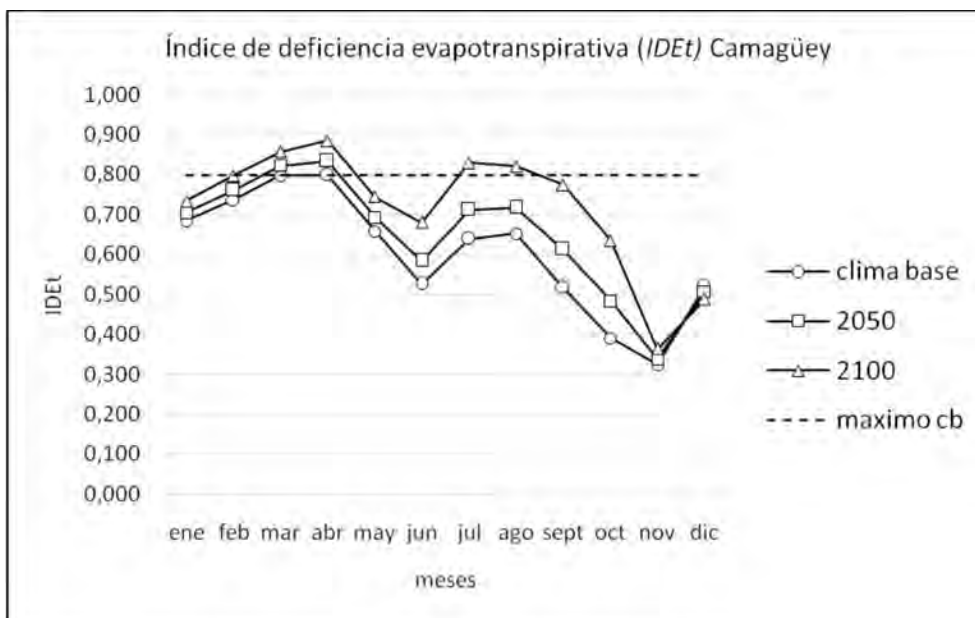


Figura 2. Marcha anual del IDEt en el municipio de Camagüey para el clima base y los años 2050 y 2100.

Como promedio, cada unidad de suelo de la provincia posee una extensión superficial de 1,3 km², teniendo en cuenta que el mapa de suelos contiene 12 176 unidades (IS, 1988) y que según ACC (1989), la provincia cuenta con una extensión superficial de 15 837 km². De esta forma el estudio de la evolución de la aridez en la provincia a través del *IDEt* posibilitará determinar de forma más realista y puntual la influencia de las variaciones climáticas en la distribución de las especies y formaciones forestales.

CONCLUSIONES

- El *IDEt* captura las diferencias entre unidades de suelo con diferentes capacidades de retención de agua bajo condiciones de clima semejantes (municipios) y en unidades de suelo semejantes en climas diferentes (escenarios futuros).
- La escala en que opera el *IDEt* permite determinar diferencias de aridez entre unidades de suelo adyacentes.
- El análisis de la marcha anual del *IDEt* posibilita relacionar las condiciones de humedad del suelo con las fases fenológicas de la vegetación.

RESEÑA CURRICULAR

Autor principal: Lorge Acosta Broche

Licenciado en Biología, especialista de la Estación Experimental Agro-Forestal de Camagüey, su labor investigativa ha estado dirigida en las temáticas de Ecología Vegetal y el Impacto del Cambio Climático, particularmente la evolución de la aridez en el sector forestal de la provincia de Camagüey. Ha participado activamente en eventos nacionales e internacionales con resultados satisfactorios.

BIBLIOGRAFÍA

- ACC. 1989. Atlas de Camagüey. Instituto de Geografía / Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. La Habana. Academia de Ciencias de Cuba. 114 p.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome. FAO. 300 p.
- Bugmann, H., Solomon, A. 2000. Explaining forest composition and biomass across multiple biogeographical regions. *Ecological Applications* (US) 10(1):95-114.
- Bugmann, H., Cramer, W. 1998. Improving the behaviour of forests gaps models along drought gradients. *Forest Ecology and Management* (NL) 103: 247-263.
- Instituto de Suelos (IS). 1988. Mapa de suelos de Camagüey. Segunda clasificación genética de los suelos de Cuba. Camagüey. UCTB Suelos Camagüey.
- Markesteijn, L. 2010. Drought tolerance of tropical tree species; functional traits, trade-offs and species distribution. PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen, NL. ISBN 978-90-8585-534-7: 204 p.
- Narasimhan B., Srinivasan, R. 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology* (NL) 133: 69-88.
- Rivero, R.E. 2008. Workbook on climate change impact assessment in agriculture. Basic knowledge, methodologies and tools. ISBN 978-976-95260-1-3. 142 p.
- Sellers, W.D. 1965. *Physical Climatology*. Chicago. University Press. 272 p.