

ESTIMACIÓN DE LA RELACIÓN ADIMENSIONAL DE BUDYKO EN COLOMBIA

por

Paola Andrea Arias Gómez¹ & Germán Poveda Jaramillo²

Resumen

Arias Gómez, P. A. & G. Poveda Jaramillo: Estimación de la relación adimensional de Budyko en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **31** (118): 69-78. 2007. ISSN 0370-3908.

Los balances de agua y energía en cuencas hidrográficas condicionan la formación del terreno, la distribución y productividad de la vegetación. Se define el número adimensional de Budyko, B , como la relación entre la precipitación media anual (\bar{P}) y la evapotranspiración potencial media anual (\overline{PET}), $B = \bar{P}/\overline{PET}$, en cuencas hidrográficas. Este número B resume el balance entre la disponibilidad hídrica (\bar{P}) y la disponibilidad energética (\overline{PET}) y ha sido empleado para caracterizar la disponibilidad hídrica de las plantas y la aridez y la productividad primaria neta de los ecosistemas. Estudios clásicos han encontrado que para $B = 1$, que denominamos número de Budyko crítico, B_c , se presentan condiciones climatológicas, geomorfológicas y de biodiversidad únicas que hacen que esta relación adimensional sea de especial interés en hidroclimatología y ecología. En este trabajo se presentan los mapas de la estimación del número de Budyko para Colombia a escala de 5 minutos, y para el departamento de Antioquia a escala de 30 segundos de arco, implementando diversos métodos para la estimación de la evaporación potencial anual. Se concluye que en Colombia predomina la vegetación limitada por energía.

¹ Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín. Correo electrónico: paola.arias@eas.gatech.edu

² Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Correo electrónico: gpoveda@unalmed.edu.co

Palabras clave: Balance de agua, balance de energía, precipitación, evapotranspiración, biodiversidad, relación de Budyko.

Abstract

Water and energy budgets in river basins are a condition for terrain forms growing and spatial distribution and productivity of vegetation. The Budyko non-dimensional number is defined as the relationship between mean annual precipitation (\bar{P}) and mean annual evapotranspiration (\overline{PET}), $B = \bar{P}/\overline{PET}$, in river basins. This non-dimensional number is defined as the ratio between available water (\bar{P}) and available energy (\overline{PET}), and has been employed for identifying water storage at vegetation, dryness, and net primary production in ecosystems. Literature reports have found that at $B = 1$ condition, denominated Budyko critical condition, B_c , there exist particular climate, geomorphologic and biodiversity conditions which make that this number becomes from particular interest on hydroclimatology and ecology fields. Budyko number maps with a spatial resolution of 5 arcmin cellsize for Colombia extent, and other with 30 seconds cellsize for Antioquia extent are presented. Many non-direct methods for potential evapotranspiration estimation have been employed. It concludes that Colombia is characterized by energy limited vegetation.

Key words: Water availability, energy availability, precipitation, potential evapotranspiration, biodiversity, Budyko relationship.

1. Introducción

En un artículo clásico, Melton (1958) presenta una relación empírica entre la densidad de drenaje de las cuencas hidrográficas, D_d , un índice de la geometría de la red de drenaje que refleja la erosión del terreno por el agua, y el denominado índice de Thornwaite (“P-E index”), para 80 cuencas en el suroeste árido de Estados Unidos. Más adelante, Madduma-Bandara (1974) extendió este hallazgo al clima tropical de Sri Lanka al demostrar que D_d exhibe una relación directa con el índice P-E para 24 cuencas (Abrahams, 1984). El “índice P-E” se define como diez veces la suma de los 12 valores mensuales de la relación entre la precipitación (P_i) y la evaporación potencial (PET_i), $i=1,2,\dots,12$, así $P - E = 10 \sum_{i=1}^{12} \frac{P_i}{PET_i}$, (Thornthwaite, 1933). El entendimiento de esta relación no lineal sigue siendo un tema de investigación sobre las relaciones entre el terreno, la vegetación, el agua y la energía (Milne et al., 2002). Para superar las limitaciones de la variabilidad estacional, se propone un índice climático adimensional como la relación entre la precipitación promedio anual (\bar{P}), y la evaporación promedio anual (\overline{PET}), ambas con dimensiones [L/T], (Milne et al., 2002),

$$B = \bar{P}/\overline{PET} = \bar{P}l/\bar{R}$$

en donde \overline{PET} se asume como el equivalente en agua de la radiación neta, \bar{R} para una superficie húmeda, $\overline{PET} = \bar{R}/l$, y donde l es el calor latente de vaporización.

Al parámetro adimensional B lo denominaremos como *número de Budyko* (Milne et al., 2002) en honor de M. Budyko quien hizo contribuciones fundamentales al entendimiento de las relaciones entre el clima y la vida (Budyko, 1974). El “índice P-E” y B están relacionados por un factor del orden de 100. Por tanto, cuando se quieren inferir relaciones entre D_d y B , el eje x de la relación original entre D_d y el índice P-E se debe reescalar adecuadamente por tal factor. De cualquier forma, la relación no cambiará cualitativamente por esta transformación.

El número de Budyko constituye una componente fundamental de los balances de agua y energía en cuencas hidrográficas, y tiene aplicaciones fundamentales en la definición del “Índice de Aridez” (UNESCO, 1979), en la predicción de productividad primaria neta de ecosistemas, en la descomposición y del contenido de carbono en el suelo (Ojima et al., 1996), en el efecto del cambio climático en los procesos de la hidrología superficial (Koster et al., 2001), en la definición de vegetación limitada por agua, por energía o por ambas (Nemani et al., 2003), y en la regulación natural de la biodiversidad (Olf et al., 2002). Hay una “transición de fase” de vegetación limitada por agua a vegetación limitada por energía en el número crítico de Budyko, $B_c = 1,0$.

En este trabajo se estima el número adimensional de Budyko para Colombia, y se discuten distintas aplicaciones alrededor de su estimación.

2. Información empleada

Para la realización de este trabajo se emplearon mapas de diferentes variables hidroclimatológicas obtenidos durante los proyectos Balances Hidrológicos de Colombia (UNALMED-UPME, 1999), Atlas Hidrológico de Colombia (UNALMED-UPME, 2000) y Balance Hidrológico y Atlas Digital de Antioquia (UNALMED-CTA, 2001), realizados por el grupo de investigación del Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Ver Vélez et al., 2000 y Poveda et al., 2006).

Los mapas obtenidos en el proyecto Balances Hidrológicos de Colombia (UNALMED-UPME, 1999) corresponden a todo el territorio colombiano y tienen una resolución espacial de 5 minutos de arco. Por su parte, los mapas obtenidos en el proyecto Balance Hidrológico y Atlas Digital de Antioquia (UNALMED-CTA, 2001) corresponden a todo el departamento de Antioquia y tienen una resolución espacial de 30 segundos de arco. En ambos casos, los mapas corresponden a promedios multianuales.

3. Marco teórico

La vegetación es una componente determinante en el comportamiento climático y energético de los ecosistemas terrestres. Es uno de los factores más representativos del ciclo global del carbono, ya que define las tasas de almacenamiento y de liberación del CO₂. Su presencia modifica por completo las características de los balances hídrico y energético, por lo que es necesario considerar su interacción con los factores climáticos, de manera que el entendimiento de las dinámicas y de los procesos físicos relacionados con la productividad primaria neta sea completo. Esto constituye un gran aporte para un mejor entendimiento del calentamiento global.

3.1. Evapotranspiración. La evapotranspiración es una componente fundamental en el balance hidrológico, aunque es, a su vez, la variable con mayores incertidumbres en su medición y estimación. Está compuesta por la evaporación desde la superficie, por la intercepción de la lluvia y por la transpiración de las plantas. La dinámica de la evapotranspiración está condicionada por tres factores fundamentales: disponibilidad de agua, disponibilidad de energía para cambio de estado del agua y condiciones aerodinámicas propicias para asimilación y transporte de vapor de agua. En síntesis, la evapotranspiración resume la interacción entre la disponibilidad

hídrica y la disponibilidad energética, interacción que se ve afectada por las condiciones ambientales existentes, siendo la vegetación uno de los factores determinantes en su comportamiento.

A pesar de la existencia de una gran variedad de propuestas para la estimación de la evapotranspiración (Brutsaert, 1982), no es claro cuál es la más adecuada, más aún si se considera que el conocimiento que se tiene acerca de esta variable es reducido, además de las claras dificultades que existen para su medición y estimación. De esta variedad de metodologías, algunas de las cuales han sido ampliamente empleadas para la estimación de la evapotranspiración (tanto potencial como real), muchas son basadas en regresiones obtenidas de registros empíricos correspondientes a regiones con características climáticas, energéticas y de vegetación particulares, lo que limita la validez de los resultados obtenidos al aplicarlas en regiones con características diferentes. Otras de estas metodologías parten de suposiciones y de desarrollos teóricos que no siempre consideran todas las variables implicadas o que no dan cuenta adecuadamente de los procesos físicos inherentes a este fenómeno.

Aunque el objetivo central de este trabajo no es ahondar en el tema de la evapotranspiración, se ha hecho un esfuerzo para la estimación de la evapotranspiración real considerando la vegetación como variable (Zhang et al., 2001). A continuación se describe brevemente su fundamentación. En la Sección 4.1 se evalúan los resultados de su aplicación en las regiones estudiadas en este trabajo (Colombia y Antioquia).

3.1.1. Método de Zhang et al. (2001) para la estimación de la evapotranspiración real. Una manera de aproximarse a esta variable es asumir que la evapotranspiración desde superficie está controlada por la disponibilidad de agua y por la demanda de la atmósfera.

La disponibilidad de agua puede ser aproximadamente igual a la precipitación; la demanda atmosférica representa la máxima evapotranspiración posible (evapotranspiración potencial).

Bajo condiciones muy secas, la evapotranspiración potencial excede la precipitación, y la evapotranspiración real es igual a la precipitación. Bajo condiciones muy húmedas, la disponibilidad de agua excede la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real se aproximará asintóticamente a la evapotranspiración potencial. Basándose en estas consideraciones, **Budyko**

(1958) postuló las siguientes relaciones bajo condiciones secas

$$\overline{ET}/\overline{P} \rightarrow 1 \quad , \quad R_n/\overline{P} \rightarrow \infty \quad (1)$$

donde \overline{P} es la precipitación promedia anual, \overline{ET} es la evapotranspiración real promedia anual y R_n es la radiación neta. Para condiciones muy húmedas se tiene

$$\overline{ET} \rightarrow R_n \quad , \quad R_n/\overline{P} \rightarrow 0 \quad (2)$$

Zhang et al. (2001) encontraron que las condiciones (1) y (2) se satisfacen con

$$\frac{\overline{ET}}{\overline{P}} = \frac{1 + w \frac{\overline{PET}}{\overline{P}}}{1 + w \frac{\overline{PET}}{\overline{P}} + \left(\frac{\overline{PET}}{\overline{P}}\right)^{-1}} \quad (3)$$

donde w es el coeficiente de disponibilidad de agua en las plantas. En las expresiones (1) y (2) planteadas por Budyko, la radiación neta R_n es un subrogado de la evapotranspiración potencial. Sin embargo, Zhang et al. (2001) introdujeron el término \overline{PET} (evapotranspiración potencial) en lugar de R_n . Por esto aparece la variable \overline{PET} en la expresión (3).

El efecto de w en la evapotranspiración es mínimo bajo condiciones muy secas o muy húmedas. La máxima diferencia en la relación entre evapotranspiración real y precipitación entre árboles y plantas herbáceas ocurre cuando la precipitación anual es igual a la demanda atmosférica ($\overline{PET}/\overline{P} = 0$). Bajo esta condición, la habilidad de los árboles de extraer agua de zonas más profundas les permite que usen el agua que ha sido almacenada en los períodos de inactividad, mientras que las plantas herbáceas con raíces más profundas pueden permitir que el agua se escape de su zona de raíces.

De manera que la expresión (3) sea válida para regiones con proporciones variables de bosques y cultivos, Zhang et al. (2001) propusieron un modelo generalizado. Siguiendo el trabajo de Eagleson (1982), estos autores asumen que la evapotranspiración anual de la vegetación herbácea de la región en estudio (incluyendo la evaporación desde el suelo) y la de los bosques está ponderada linealmente de acuerdo con sus áreas. De esta manera

$$\overline{ET} = fET_f + (1 - f)ET_h \quad (4)$$

donde \overline{ET} es la evapotranspiración real total anual en mm, f es la fracción de cobertura vegetal, ET_f es la evapotranspiración real anual en los bosques (mm) y ET_h es la evapotranspiración real anual de las plantas herbáceas (en mm).

Zhang et al. (2001) consideran que la evapotranspiración potencial \overline{PET} puede ser asumida como constante para las zonas boscosas y para las zonas de plantas herbáceas, donde la constante depende del tipo de vegetación. Así mismo, asumen que la disponibilidad de agua en la planta es una constante que depende del tipo de vegetación. De esta manera, los valores encontrados por Zhang et al. (2001) fueron $\overline{PET} = 1410 \text{ mm}$ y $w = 2,0$, para bosques y $\overline{PET} = 1100 \text{ mm}$ y $w = 0,5$, para zonas herbáceas. De esta manera, la expresión (4) puede ser expresada como

$$\overline{ET} = \left(f \frac{1 + 2 \times \frac{1410}{\overline{P}}}{1 + 2 \times \frac{1410}{\overline{P}} + \frac{\overline{P}}{1410}} + (1 - f) \frac{1 + 0,5 \times \frac{1100}{\overline{P}}}{1 + 0,5 \times \frac{1100}{\overline{P}} + \overline{P}} \right) \overline{P} \quad (5)$$

Como puede observarse de la expresión (5), el planteamiento generalizado propuesto por Zhang et al. (2001) para la estimación de la evapotranspiración real incluye tres factores fundamentales en el comportamiento de esta variable: la disponibilidad de agua, representada por \overline{P} ; la disponibilidad de energía, representada por \overline{PET} ; y las condiciones vegetales representadas por w y f , aunque no considera el efecto del viento, el cual es también importante en el comportamiento de esta variable. Esta expresión es de fácil aplicación, aunque parte del supuesto de que para regiones con igual tipo de cobertura, la evapotranspiración potencial es constante, así como la disponibilidad de agua en las plantas. Es necesario ser cuidadosos con estas suposiciones, ya que en algunos casos pueden no ser válidas, por tanto, la aplicación de esta metodología requiere su previa verificación.

3.1.2. La radiación neta como un estimativo de la evapotranspiración potencial. Como se puede ver de las expresiones (1) y (2), Budyko (1958) emplea la radiación neta, R_n , como una aproximación a la evapotranspiración potencial \overline{PET} . Esta aproximación es tal que $\overline{PET} \approx R_n/l$ donde l es el calor latente de vaporización del agua.

Budyko (1974) argumentó que para el caso de promedios anuales, el límite superior de la evapotranspiración es igual a la radiación neta ya que la sumas anuales del flujo de calor latente no proporcionan una entrada significativa de energía a la superficie terrestre. Ppor esta razón, el flujo de calor latente puede estar determinado por la radiación neta.

3.2. La relación adimensional de Budyko. Una manera muy aceptada de resumir la hidroclimatología

de largo plazo en una región es graficando la relación entre la evapotranspiración real media y la precipitación media ($\overline{ET}/\overline{P}$) vs la relación entre la evapotranspiración potencial media y la precipitación media ($\overline{PET}/\overline{P}$) (Sankarasubramanian y Vogel, 2002). Los índices $\overline{ET}/\overline{P}$ y $\overline{PET}/\overline{P}$ son denominados relaciones de evapotranspiración y de aridez, respectivamente.

Budyko (1974) observó que cuando la precipitación decrece, la escorrentía superficial también decrece, pero cuando la precipitación aumenta, el caudal tiende a algún valor límite. Schreiber (1904) propone una ecuación de interpolación para la escorrentía anual en

cuencas de Europa central, dada por

$$R = \overline{P} \exp\left(-\frac{a}{\overline{P}}\right) \quad (6)$$

donde a es una constante para una cuenca dada. Una forma para la evapotranspiración anual es

$$\overline{ET} = \overline{P} \left[1 - \exp\left(-\frac{a}{\overline{P}}\right)\right] \quad (7)$$

En 1911, Ol'dekop propone la ecuación

$$\overline{ET} = \overline{PET} \tanh\left(\frac{\overline{P}}{\overline{PET}}\right) \quad (8)$$

Budyko interpola las ecuaciones (7) y (8), proponiendo la media geométrica

$$\overline{ET} = \left[\overline{PET} \cdot \overline{P} \cdot \tanh\left(\frac{\overline{P}}{\overline{PET}}\right) \left(1 - \cosh\left(\frac{\overline{P}}{\overline{PET}}\right) + \sinh\left(\frac{\overline{P}}{\overline{PET}}\right)\right)\right]^{1/2} \quad (9)$$

donde \overline{ET} es la evaporación real, \overline{P} es la precipitación, \overline{PET} es la evaporación potencial en mm por el período considerado (Budyko, 1974).

La expresión (9) es una herramienta acertada para la estimación de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración potencial y que ha sido ampliamente empleada en la literatura.

4. Resultados y conclusiones

4.1. Aplicación del método de Zhang et al (2001) en Colombia. Para verificar la validez del modelo propuesto por Zhang et al. (2001) para la estimación de la evapotranspiración real, éste fue aplicado en las regiones de estudio: Colombia y Antioquia. Para ello se emplearon los mapas promedio multianual de precipitación obtenidos en los trabajos Balances Hidrológicos de Colombia (UNALMED-UPME, 1999) para Colombia (con una resolución espacial de 5 minutos de arco) y Balance Hidrológico y Atlas Digital de Antioquia (UNALMED-CTA, 2001) para Antioquia (con una resolución espacial de 30 segundos de arco). Estos mapas fueron obtenidos por interpolación mediante Kriging con deriva externa, donde la deriva empleada fue el mapa de precipitación del Estudio Nacional del Agua (ENA), para el caso de Colombia, y por interpolación con triangulación con deriva externa por subregiones, donde la deriva fue el mapa de precipitación del ENA rescalado, para Antioquia.

Con respecto a la fracción de cobertura vegetal, ésta fue estimada empleando el mapa de cobertura vegetal obtenido en el trabajo Atlas Hidrológico de Colombia (UNALMED-UPME, 2000). Así, se consideró que f corresponde al porcentaje de pixeles en los cuales se tiene cobertura vegetal boscosa con respecto al número total de pixeles del mapa de cobertura en consideración. El valor obtenido es de 0,49 para Colombia y de 0,29 para Antioquia.

De esta manera se estimó la evapotranspiración real en Colombia mediante la expresión (5). Como ya se comentó, la expresión (5) tiene implícito que la evapotranspiración potencial y la disponibilidad de agua en las plantas son constantes para cada tipo de cobertura, y cuyos valores fueron obtenidos con información de 68 cuencas de Estados Unidos de Norteamérica. Por esta razón, se consideró evapotranspiración potencial constante para cada tipo de cobertura, pero los valores se obtuvieron a partir de diferentes mapas promedio multianual de evapotranspiración potencial elaborados en los trabajos Balances Hidrológicos de Colombia para Colombia (con una resolución espacial de 5 minutos de arco) y Balance Hidrológico y Atlas Digital de Antioquia para Antioquia (con una resolución espacial de 30 segundos de arco). Los mapas de evapotranspiración potencial considerados fueron los obtenidos por las metodologías de Cenicafé, Morton, Penman, Thornwaite, Turc y Turc Modificado (Poveda et al., 2006).

A excepción de la metodología de Cenicafé, las anteriores técnicas han sido ampliamente empleadas para la estimación de la evapotranspiración. La ecuación de Cenicafé fue obtenida por el Centro Nacional de Investigaciones del Café (CENICAFÉ) mediante regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman a los datos de sus estaciones climáticas en Colombia para la obtención de evaporación potencial. Su cálculo es sencillo, ya que sólo depende de la altura sobre el nivel del mar, así

$$\overline{PET} = 4,658 \exp(-0,0002 h) \quad (10)$$

donde \overline{PET} es la evaporación potencial en mm/día y h es la cota sobre el nivel del mar en m.

Con respecto a la disponibilidad de agua en las plantas, ya que en nuestro medio no se cuenta con información significativa de esta variable, se consideraron los valores propuestos por estos autores: 2,0 para bosques y 0,5 para plantas herbáceas. De esta manera, se obtuvieron seis mapas de evapotranspiración real mediante el modelo de **Zhang et al. (2001)**, sustituyendo los valores de evapotranspiración potencial (1410 mm y 1100 mm) por los encontrados a partir de cada uno de los mapas anteriores.

Para validar los resultados obtenidos, se estimaron los caudales medios de largo plazo (promedio multianual) en diferentes cuencas instrumentadas de la región en estudio (108 cuencas en Colombia y 56 cuencas en Antioquia) vía el balance hídrico de largo plazo ($\overline{P} - \overline{ET} = R$), donde R es la escorrentía superficial) y se compararon con los caudales reales en las cuencas. Para la extracción de las cuencas se empleó un MDT (Modelo Digital de Terreno) de 5 minutos de arco para Colombia y otro de 30 segundos de arco para Antioquia, ambos suministrados por el USGS (U. S. Geological Survey).

La metodología de **Zhang et al. (2001)** presenta errores bastante altos para Colombia (del orden del 80%). Estos errores pueden deberse, en gran medida, a la calidad del MDT empleado para la extracción de las cuencas, ya que en muchos casos, éstas no coinciden con las cuencas reales, por lo que los resultados se ven distorsionados. Vale la pena aclarar que en un principio se contaba con 303 cuencas para Colombia, pero se debió reducir a 108 cuencas debido a la mala calidad del MDT para dichas cuencas.

Con respecto a la aplicación del modelo de **Zhang et al. (2001)** en Antioquia, los errores obtenidos son mucho menores que los obtenidos para Colombia (del orden del 20%). Estos errores en el cierre del balance hídrico

de largo plazo son bastante satisfactorios. La disminución sustancial en el error se debe a la mejor calidad del MDT empleado y a la mejor resolución de los mapas de las variables empleadas.

En general, los menores errores en la estimación de los caudales medios anuales, tanto para Colombia como para Antioquia, se presentan al usar los métodos para estimación de la evapotranspiración potencial de Cenicafé y de Morton, que son dos de las metodologías que han mostrado mejores estimativos de la evapotranspiración real en Colombia (**UNALMED-UPME (1999)**, **UNALMED-UPME (2000)**), **UNALMED-CTA (2001)**). Por su parte, los mayores errores se presentan al estimar la evapotranspiración potencial con los métodos de Penman y Turc Modificado. Tanto para Colombia como para Antioquia, se encuentra que al emplear los valores de \overline{PET} dados por **Zhang et al. (2001)** se obtienen errores intermedios a los obtenidos por las seis metodologías consideradas para estimar \overline{PET} .

De esta manera, se encuentra que la metodología de **Zhang et al. (2001)** entrega resultados aceptables. Debe avanzarse en el estudio del parámetro w , que resume la disponibilidad de agua en las plantas, con el propósito de obtener mejores resultados.

4.2. Verificación de la aproximación $\overline{PET} \approx R_n/l$ en Colombia. Para verificar la validez de la aproximación $\overline{PET} \approx R_n/l$ para las condiciones hídricas, energéticas y de vegetación en Colombia, se estimó el error de R_n/l con respecto a \overline{PET} , tanto para todas las regiones en estudio, como para las cuencas seleccionadas y usando los seis métodos de evapotranspiración potencial considerados. Los mapas de radiación neta empleados corresponden a los promedios multianuales obtenidos en los trabajos Balances Hidrológicos de Colombia (**UNALMED-UPME, 1999**) y Balance Hidrológico y Atlas Digital de Antioquia (**UNALMED-CTA, 2001**). Estos mapas se estimaron mediante la metodología propuesta por **Morton (1982)** y están a una resolución de 5 minutos y 30 segundos de arco, respectivamente.

Los resultados obtenidos (no mostrados aquí) indican que en promedio el error en esta aproximación es del 40% para Colombia y del 20% para Antioquia. La aproximación considerada presenta menores diferencias con las metodologías de Cenicafé y de Morton, para ambas resoluciones.

Algo que debe considerarse en este análisis, es que la radiación neta empleada no corresponde a mediciones

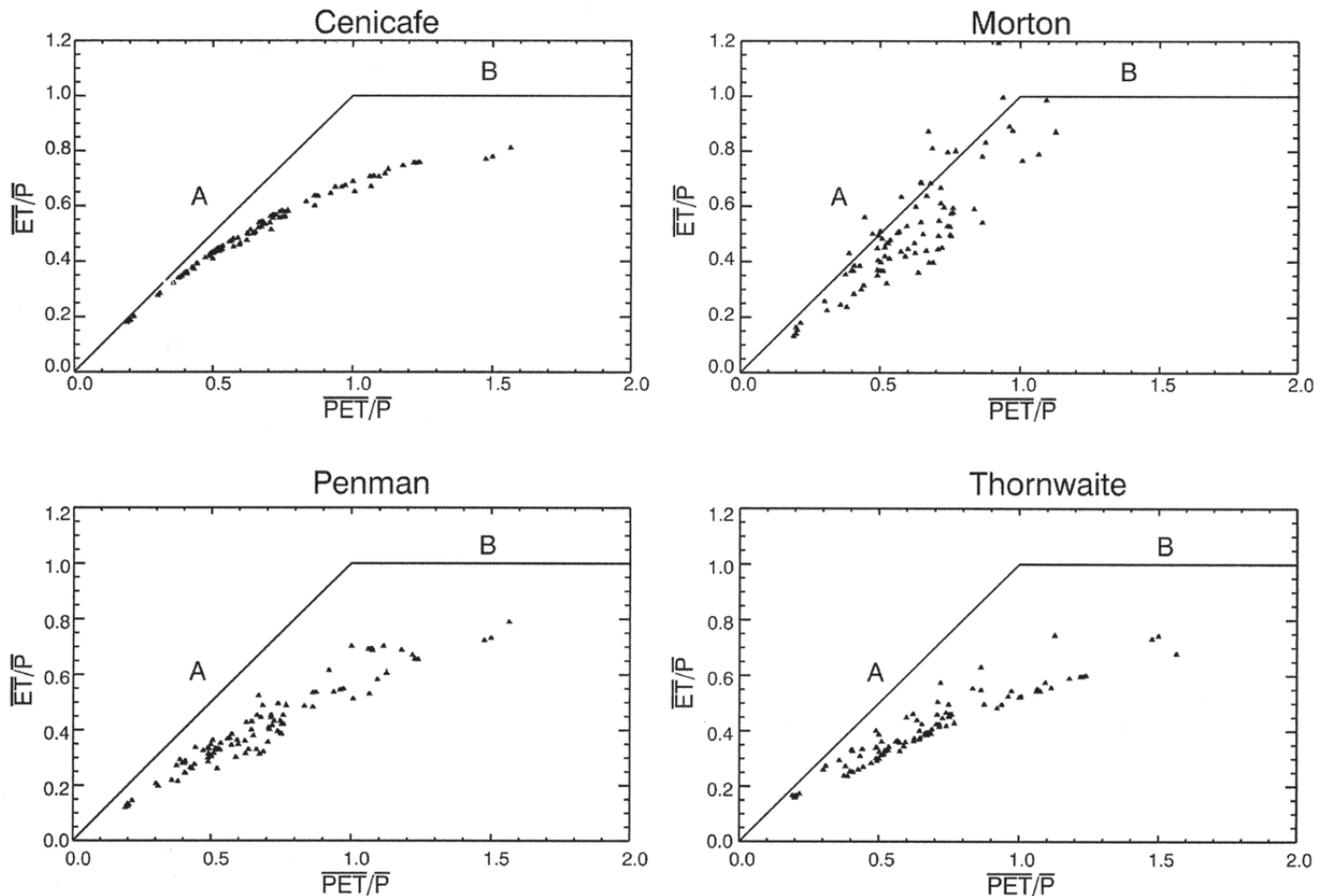


Figura 1. Relación $\overline{ET}/\overline{P}$ vs. $\overline{PET}/\overline{P}$ para las 108 cuencas hidrográficas en Colombia. \overline{PET} es estimada mediante la metodología de Cenicafé. \overline{ET} es estimada por los métodos de Cenicafé, Morton, Penman y Thornwaite. La precipitación es interpolada por Kriging con deriva externa (UNALMED-UPME, 1999).

sino que es estimada mediante una metodología iterativa. Existe incertidumbre no sólo en los mapas de evapotranspiración potencial sino también en el mapa de radiación neta.

En general, es posible afirmar que la aproximación propuesta por Budyko (1958), $\overline{PET} \approx R_n/l$, se cumple aceptablemente en la región de estudio, por lo que se puede convertir en un estimativo de la evapotranspiración potencial en regiones en las que no se tenga información de ésta.

4.3. Estimación de la relación adimensional de Budyko en Colombia. Considerando la relación adimensional de Budyko dada por la expresión (7), se analizó la hidroclimatología de largo plazo para las cuencas en consideración (108 para Colombia y 56 para Antioquia). Para ello se emplearon los mapas de precipitación media anual ya mencionados y los mapas

de evapotranspiración real y potencial obtenidos por las metodologías de Cenicafé, Morton, Penman, Thornwaite, Turc y Turc Modificado (UNALMED-UPME, 1999; UNALMED-CTA, 2001). En la Figura 1 se observan los resultados de $\overline{ET}/\overline{P}$ vs. $\overline{PET}/\overline{P}$ obtenidos para las cuencas en Colombia con la evapotranspiración potencial de Cenicafé y la evapotranspiración real estimada por cuatro de las seis metodologías consideradas. Los resultados para el departamento de Antioquia no se muestran aquí. Las asíntotas A y B en la Figura 1 corresponden a los límites superiores en la relación de evaporación o a los límites inferiores en la escorrentía. Para regiones con abastecimiento de humedad ilimitado, la evapotranspiración real se acerca a la evapotranspiración potencial, lo que está ilustrado por la línea A. Similarmente, cuando la evapotranspiración potencial excede la precipitación, la evapotranspiración real se acerca a la precipitación, que se muestra por la línea B.

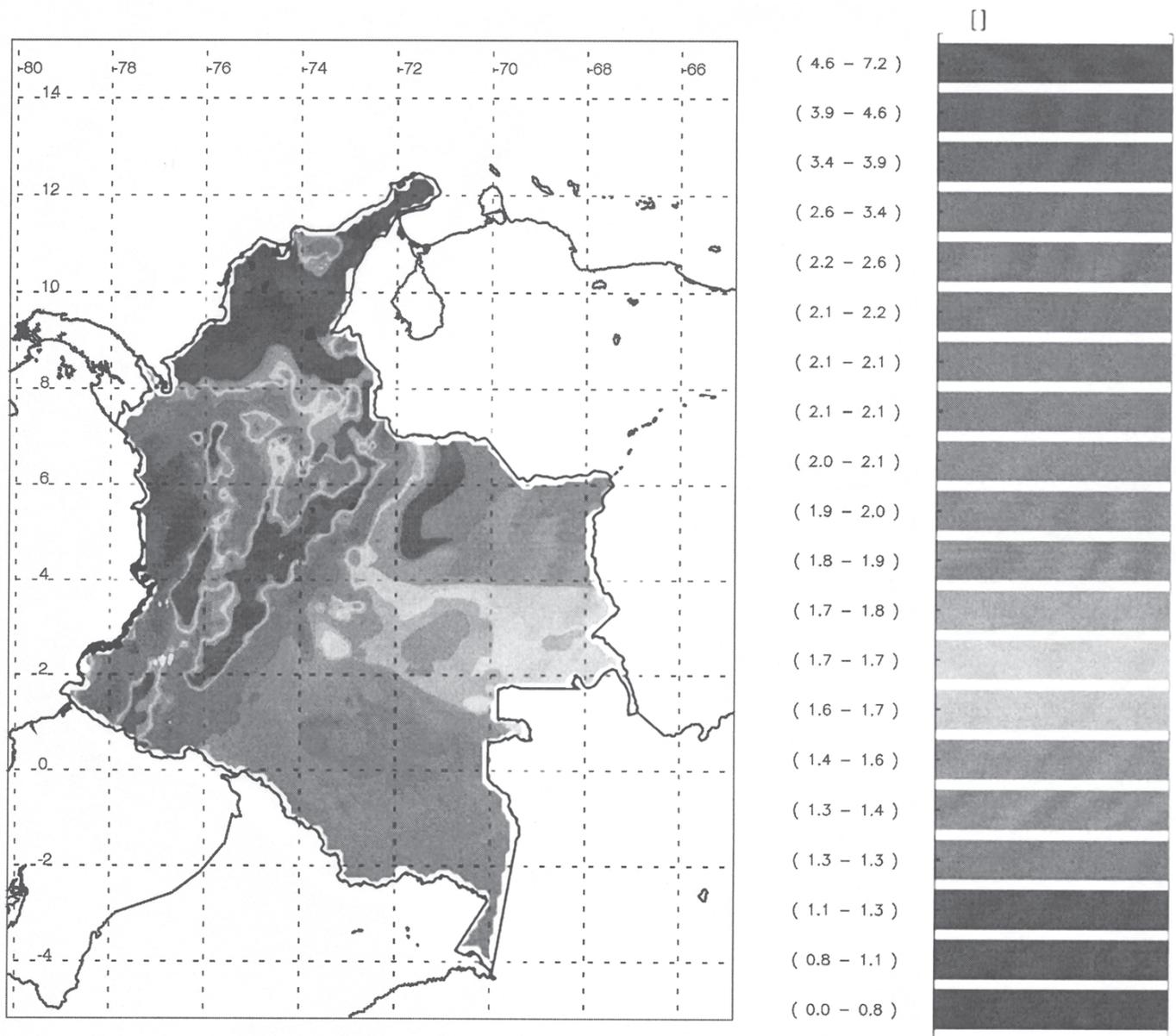


Figura 2. Número climático de Budyko ($B = \overline{P}/\overline{PET}$) estimado con la evapotranspiración potencial de Cenicafé y la precipitación de Kriging con Deriva ENA (UNALMED-UPME, 1999). La resolución del mapa es de 5 minutos de arco.

Los resultados obtenidos tanto para Colombia como para Antioquia son similares. Se observan valores del índice de aridez $\overline{PET}/\overline{P}$ inferiores a 2,0, lo que no permite observar el comportamiento asintótico con la línea B, esto es, regiones en las que la evapotranspiración potencial excede la precipitación. Así, los resultados muestran que la mayoría de nuestras cuencas están en ambientes limitados por energía, esto es, existe una gran cantidad de agua para disponible, pero ésta no es evaporada debido a limitaciones energéticas.

En algunas de las metodologías se observan grandes dispersiones en los resultados de las diferentes cuencas, sin embargo, la metodología de Cenicafé, tanto para estimar ET como PET , es la que muestra un comportamiento más uniforme para las distintas cuencas.

Al inverso del índice de aridez $\overline{PET}/\overline{P}$ es $B = \overline{P}/\overline{PET}$ (número climático de Budyko). Este número B resume el balance entre la disponibilidad hídrica (\overline{P}) y la disponibilidad energética (\overline{PET}) y ha sido empleado para caracterizar la disponibilidad hídrica de las plantas

y la aridez y la productividad primaria neta de los ecosistemas. De estudios realizados por diversos autores se ha encontrado que para $B = 1$ (que denominaremos B_c : número crítico de Budyko) se presentan condiciones climatológicas, geomorfológicas y de biodiversidad únicas que hacen que esta relación adimensional sea de especial interés en la hidroclimatología y otras ramas de la ciencia. Conociendo el gran interés que despierta esta relación climática, ésta es estimada tanto para las diferentes cuencas como para Colombia y Antioquia. En la 4.4 se observa el mapa del número climático de Budyko para Colombia estimado con el mapa de \overline{PET} de Cenicafé y el mapa de \overline{P} interpolado por Kriging con deriva ENA (UNALMED-UPME, 1999).

Se observa que las regiones con menores valores de B corresponden a la costa Caribe (con excepción de la Sierra Nevada de Santa Marta) y algunas regiones ubicadas en las partes altas de las cordilleras. Los mayores valores de B se observan en el litoral Pacífico, donde la precipitación es alta en comparación con \overline{PET} , y en la cuenca Amazónica, donde también se registran valores altos de pluviosidad. En general predominan los valores

de B superiores a 1 (B_c), indicando que Colombia en su mayoría tiene zonas limitadas por energía.

En general, son muy pocas las regiones con valores de B cercano al crítico (esto se obtuvo para la mayoría de las metodologías de estimación de \overline{PET}). Las regiones en las que se presentan valores de B (estimado con \overline{PET} de Cenicafé y \overline{P} de Kriging con deriva ENA) cercanos al crítico (entre 0.8 y 1.2) se encuentran concentradas en la costa Atlántica en cercanía a las estribaciones de las cordilleras occidental y central. Se observan algunas zonas de poca extensión en las partes altas de la cordillera central. Para las metodologías de Penman y Morton (no se muestra aquí) se encuentra una región de gran extensión en la Orinoquia con valores de B cercanos a 1.

Un estudio bien interesante sobre este tema consistiría en analizar las zonas de vida de estas regiones y definir su estructura y características (flora, fauna, geomorfología, etc.) para encontrar relaciones con B , que, como ya se ha dicho, ofrece una síntesis del balance hídrico y energético. Desafortunadamente, en Colombia no se cuenta con información suficiente, detallada y de calidad al respecto, por lo que en este trabajo no se pudo ahondar en la identificación de tales relaciones.

4.4. Conclusiones. Se estimó la evapotranspiración real mediante la metodología de **Zhang et al. (2001)**. Los resultados en la estimación de los caudales medios anuales muestran que es una metodología aceptable para la estimación de \overline{ET} . Esta metodología es interesante ya que involucra el papel de la vegetación en el proceso de

la evapotranspiración. Sin embargo, es necesario corroborar mejor las hipótesis de esta metodología para las condiciones colombianas.

Se verificó la aproximación $\overline{PET} \approx R_n/l$ para las condiciones climáticas colombianas. Se encontraron errores entre el 20 % y el 40 %, lo que indica que esta aproximación puede ser empleada aceptablemente en regiones en las que no se conozca la evapotranspiración potencial. Se estimó la relación adimensional de Budyko. Se observa que en Colombia predomina la vegetación limitada por energía (valores de B superiores a 1).

Referencias

- [1] (1984) **Abrahams, A. D.** *Channel networks: a geomorphological perspective*. *Water Resources Research* **20**:161–188.
- [2] **Brutsaert, W.** (1982). *Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [3] **Budyko, M.** (1958). *The heat balance of the earth's surface*. Translated from the Russian by N. A. Stepanova. U.S. Department of Commerce, Washington D.C., 259 pp.
- [4] **Budyko, M.** (1974). *Climate and life*. Translated from the Russian by D. H. Miller. Academic. San Diego, California.
- [5] **Eagleson, P.** (1982). *Ecological optimality in water-limited natural soil vegetation systems: theory and hypothesis*. *Water Resources and Research*, **18**: 325–340.
- [6] **Koster, R. D., P. A. Dirmeyer, P. C. D. Milly & G. L. Russell** (2001). *Comparing GCM-generated land surface water budgets using a simple common framework*. In *Land Surface Hydrology, Meteorology, and Climate: Observations and Modeling*, Water Sciences and Application, **3**: 95–105.
- [7] **Madduna-Bandara, C. M.** (1974). *Drainage density and effective precipitation*. *Journal of Hydrology*, **21**: 187–190.
- [8] **Melton, M. A.** (1958). *Correlation structure of morphometric properties of drainage systems and their controlling agents*. *Journal of Geology*, **66**: 442–460.
- [9] **Milne, B. T., V. K. Gupta & C. Restrepo** (2002). *A Scale Invariant Coupling of Plants, Water, Energy and Terrain*. *Ecoscience*, **9**: 191–199.
- [10] **Morton, F.** (1982). *Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology*. En N. H. R. Institute (Ed.), *Journal of Hydrology*, chapter 3, Ottawa: Environmental Canada, 1st edition, 237–263.
- [11] **Nemani, R., C. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, & C. J. TUCKER** (2003). *Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999*. *Science*, **300**: 1560–1563.
- [12] **Ojima, D. S., W. J. Parton, M. B. Coughenour & J. M. Scurlock** (1996). *Impact of climate and atmospheric carbon dioxide changes on grasslands of the world*. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE). Chichester. NY. USA. Wiley. 271–309.
- [13] **Ol'dekop, E. M.** (1911). *On evaporation from the surface of river basins*. *Transactions on Meteorological Observations*, Lur-evskogo, University of Tartu, Tartu, Estonia.

- [14] Olf, H., M. E. Ritchie, & H. H. T. Prins (2002). *Global environmental controls of diversity in large herbivores*. *Nature*, **415**: 901–904.
- [15] Poveda, G., J. I. Vélez, O. J. Mesa, L. A. Cuartas, O. J. Barco, R. I. Mantilla, J. F. Mejía, C. D. Hoyos, J. M. Ramírez, B. A. Botero, M. I. Mejía, L. I. Ceballos, M. D. Zuluaga, P. A. Arias, J. D. Giraldo & D. I. Quevedo. (2006). *Linking Long-term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia*. *Journal of Hydrologic Engineering*. Accepted.
- [16] Sankarasubramanian, A. & R. Vogel. (2002). *Annual climatology of the United States*. *Water Resources and Research*, **38**: 19.1-19.12.
- [17] Schreiber, P. (1904). *Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa*. *Z. Meteorol*, **21** (10): 441–452.
- [18] Thornwaite, C. W. (1993), *The climates of the Earth*. *Geogr. Rev.*, **23**: 433–440.
- [19] UNALMED–CTA (2001). *Balance Hidrológico y Atlas digital de Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín–Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua. Informe final.
- [20] UNALMED–UPME (1999). *Balances Hidrológicos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín–Unidad de Planeación Minero Energética. Informe final.
- [21] UNALMED–UPME (2000). *Atlas Hidrológico de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín–Unidad de Planeación Minero–Energética. Informe final.
- [22] UNESCO (1979). *Mapa Mundial de Zonas Áridas*. UNESCO.
- [23] Vélez, J. I., G. Poveda & O. Mesa. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín–Unidad de Planeación Minero Energética.
- [24] Zhang, L., W. Dawes & G. Walker. (2001). *Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale*. *Water Resources and Research*, **37**: 701-708.

Recibido el 3 de agosto de 2005

Aceptado para publicación el 12 de enero de 2007