

ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN COLOMBIA

Janet Barco, Adriana Cuartas, Oscar Mesa, Germán Poveda, Jaime I. Vélez, Ricardo Mantilla, Carlos Hoyos, John F. Mejía, Blanca Botero y María Montoya.

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín

RESUMEN Este trabajo hace parte de un estudio de Balances Hidrológicos para Colombia, en el cual se han investigado y evaluado las componentes del ciclo hidrológico, a nivel de promedios de largo plazo y a una escala espacial definida por retículas de 5 minutos de arco (aproximadamente 9 km de lado). Se presentan los resultados de los métodos de Turc (1945), Morton (1982), Penman (1948) y Holdridge (1978) para estimar la evaporación multianual en Colombia. Los datos usados se han extractado de múltiples fuentes nacionales e internacionales. La evaluación de los diversos estimadores se ha hecho mediante balances hídricos en cuencas con datos existentes de caudal y precipitación media multianual. El método de Turc es el más sencillo de implementar puesto que sólo tiene como variables independientes la temperatura y la precipitación. Morton y Penman son métodos difíciles de implementar debido a la información requerida, pero por su desarrollo teórico, es una metodología muy interesante. El método de Holdridge esta basado en zonas de vida, que dependen de las condiciones climáticas de las diferentes regiones, muestra gran variabilidad, pero fue uno de los que arrojó mayores errores y tiende a la subestimación. A pesar de las limitaciones en calidad y cantidad de información, la implementación y análisis de estos métodos dan las pautas para mejorar las estimaciones de la evaporación (potencial y real) a largo plazo y para el desarrollo de posibles métodos de cálculo aplicables a las condiciones climáticas de Colombia.

ABSTRACT This study makes part of a broader project to estimate hydrological balances all over the country, at a spatial scale of 5 minute-arc. Several methods are implemented to estimate long-term evaporation over Colombia, such as those by Turc (1945), Morton (1982), Penman (1948), and Holdridge (1978). Point estimations are interpolated to obtain regional averages. Results are tested against observed long term average precipitation and runoff for a wide range of catchment sizes. Turc's methods turned out to give small error despite being dependant only on precipitation and temperature. Morton's method is based upon the energy balance for which radiation data are needed at a high spatial resolution (not available yet), and therefore results exhibited large errors. Penman's method turns out to be an approximation of the Priestley - Taylor method, based on aerodynamical and energy balance equations. This method exhibited small estimation errors. Holdridge's method is based on the concept of life zones produced results with large spatial variability and large errors. Morton and Penman's methods exhibited larger evaporation estimated values than those obtained with Turc or Holdridge's, throughout the country. Despite the quality and lack of existence of long-term hydro-climatological data sets, these methods provide a better understanding of both potential and actual evaporation in Colombia.

1 INTRODUCCIÓN

La evaporación es el proceso físico, por el cual el agua pasa del estado líquido en que se encuentra en almacenamientos, conducciones, en el suelo, en las capas cercanas a la superficie, a estado gaseoso y se transfiere a la atmósfera.

La evaporación está afectada por factores meteorológicos como son el suministro de energía; encargada de suministrar el calor latente de vaporización, humedad relativa, velocidad del viento; encargada del transporte del vapor fuera de la superficie de evaporación, la precipitación, la presión atmosférica y la temperatura entre

otros. Otro factor importante es el control debido a la vegetación, ya que en la transpiración las plantas regulan la salida de vapor de agua a la atmósfera. Además factores físicos como salinidad pueden reducir la evaporación hasta en un 3%.

Diversos autores han desarrollado métodos y ecuaciones para el cálculo de la evaporación real y potencial, las cuales se obtuvieron por medio de ajustes, correlaciones de variables climáticas, otros están basados en las teorías del balance de energía, balance hídrico, método aerodinámico y otros. Uno de los problemas para el uso de estas ecuaciones es la falta de mediciones de las variables meteorológicas requeridas y de la poca precisión de las que se tienen, como presión atmosférica, punto de rocío, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, etc.

En el campo de la agronomía existen diversos trabajos en los cuales se evalúan algunos de los métodos para calcular la evaporación con el propósito de realizar estimativos de evaporación en algún tipo de cultivo. En la bibliografía son enumerados algunos de ellos. Estos trabajos no fueron base fundamental del presente trabajo, debido a las diferencias de escala y de objetivos con los que fueron enfrentados.

2 FUENTES DE INFORMACIÓN

Todas las variables se requieren a una escala espacial de 5 minutos de arco cubriendo todo el territorio de Colombia, ya que esta es la escala a la cual se hacen las estimaciones. Por tal razón se combinó observaciones; tales como registros de estaciones meteorológicas y de satélite, con procedimientos empíricos aplicados a la estimación de los datos más escasos como son la presión atmosférica, punto de rocío, la humedad relativa, etc. A partir de registros puntuales se efectúan interpolaciones espaciales para todo Colombia.

3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

En el desarrollo de este trabajo se evaluaron diversos métodos para estimar la evaporación,

pero aquí solo se presentarán los más representativos, tanto por su facilidad de implementación, como por su desarrollo teórico.

3.1 Ecuación de Turc

Turc (1945) calcula la evaporación real (mm/año), establecida a partir de observaciones hechas en 254 cuencas situadas en todos los climas de la tierra, mediante la ecuación

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (1)$$

La cual es función de la precipitación (mm/año), un parámetro L , el cual depende de la temperatura media ($^{\circ}\text{C}$) y se obtiene de la expresión $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ (mm). La ecuación (1) es válida para $(P/L) > 0.316$. En caso contrario $ETR = P$.

3.2 Método de Morton

Morton (1983), basado en la ecuación de balance de energía postula con base en la hipótesis de Bouchet, una relación complementaria entre la evaporación potencial ETP , la real ETR y la evaporación de un ambiente húmedo ETW .

En términos de ecuaciones esta relación se puede escribir,

$$ETR = 2ETW + ETP \quad (2)$$

ETR es la evaporación real, ETW es la evaporación de un ambiente húmedo y ETP es la evaporación potencial, dadas en W/m^2 . La relación complementaria también puede expresarse gráficamente así,

La Figura 1 es una representación esquemática de la ecuación (2) bajo condiciones de suministro de radiación constantes. La abscisa representa el suministro de agua a la superficie suelo-planta de un área, una cantidad que es usualmente desconocida. Cuando no hay disponibilidad de agua para la evaporación real (extremo izquierdo de la Figura 1) resulta que ETR es igual a cero, el aire es muy caliente y seco y ETP alcanza la máxima tasa de $2ETW$ (la evaporación potencial de un ambiente seco). Como el suministro de agua para la superficie

suelo-planta del área se incrementa (moviéndose a la derecha de la Figura 1) el resultado equivalente en el incremento de *ETR* causa que el aire que está pasando por encima se vuelve frío y más húmedo, el cual a su vez produce un decremento equivalente en *ETP*. Finalmente cuando el suministro de agua para la superficie suelo-planta del área se ha incrementado suficientemente los valores de *ETR* y *ETP* convergen al mismo punto.

La definición convencional de la evaporación potencial es la misma definición que la evaporación real de un ambiente húmedo. Sin embargo la evaporación potencial que es estimada por las ecuaciones de transferencia de vapor y balance de energía por técnicas analíticas (Penman, 1948), gráficas (Ferguson, 1952) o iterativas. (Morton, 1983). Como puede verse la relación complementaria de Morton (1983) es muy similar a la propuesta por Bouchet (1963). El procedimiento para el cálculo es bastante extenso, por lo tanto no será desarrollado en este artículo (Ver Morton, 1983, o Barco y Cuartas, 1998).

3.3 Método de Penman

Debido a que el suministro de energía y el transporte de vapor son limitantes, es necesario la combinación de los métodos de balance de energía y aerodinámico para dar un valor estimado de la evaporación *E*, esta ecuación fue inicialmente desarrollada por Penman en 1948 y está dada por

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (3)$$

Para grandes áreas, las consideraciones de balance de energía dominan la tasa de evaporación. Priestley - Taylor determinaron que el segundo término de la ecuación del balance de energía es aproximadamente un 30 % del primero, así

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r \quad (4)$$

Donde $\alpha = 1.3$, pero que se varía levemente para otras localidades. En esta ecuación g es la constante sicrométrica, la cual se expresa como,

$$\gamma = \frac{C_p K_h p}{0.6221 l_v K_w} \quad (5)$$

C_p es el calor específico a presión constante; usualmente este valor es de $1004 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$, p es la presión atmosférica, l_v es el calor latente de vaporización, dado por,

$$l_v = 2.501 * 10^6 - 2.370T \quad (6)$$

expresado en J/kg y T es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$. K_h/K_w es la relación entre las difusividades de calor y el vapor, se toma comúnmente como 1 (Priestley y Taylor, 1972). D es la pendiente de la curva de presión de saturación del vapor a la temperatura de aire, expresada como

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (7)$$

la pendiente esta en $\text{Pa}/^\circ\text{C}$, e_s es la presión de vapor de saturación en Pa y los otros términos y unidades ya fueron definidos anteriormente.

3.4 Método de Holdridge

El método de Holdridge esta basado en dos ábacos: Diagrama para la clasificación de Zonas de Vida o formaciones vegetales del mundo y movimientos del agua en asociaciones climáticas (Holdridge, 1982). El diagrama para la clasificación de zonas de vida (Holdridge, 1978) tiene tres ejes: precipitación, biotemperatura y relación de evaporación potencial. Entrando a este con estas variables se obtiene la zona de vida del lugar correspondiente. Como la variable requerida en este caso es la evaporación real, con los datos de precipitación y biotemperatura se lee en el ábaco la relación de evaporación potencial. Esta relación se multiplica por la precipitación obteniéndose así el valor de la evaporación potencial (ETP). Esta no es obtenida solamente del diagrama, sino que Holdridge desarrolló las siguientes ecuaciones:

$$T_{bio} = T - \frac{(3 * \text{latitud } [^\circ])}{100} (T - 24)^2, \quad (8)$$

($^\circ\text{C}$) para regiones subtropicales (9)

$$ETP = 58.93 * T_{bio} (\text{mm/año}) \quad (10)$$

Con el nomograma de movimientos del agua en asociaciones climáticas (Holdridge, 1978) se calcula la evaporación real (*ETR*) de la siguiente forma: se divide *ETP*, calculada con la ecuación (9), por la precipitación obteniéndose la relación de evaporación potencial, con este valor se entra al nomograma con una línea vertical hasta cortar la curva de evaporación real, se lee el porcentaje de evaporación potencial y este último se multiplica por *ETP*, para obtener así la evaporación real. De los dos ábacos que utiliza el método de Holdridge, se sistematizó el nomograma movimientos de agua en asociaciones climáticas. Debido a que la curva de *ETR* no tenía una tendencia definida, se dividió en tres partes y a cada una de ellas se le hizo la regresión que mejor se ajustara, obteniéndose buenos coeficientes de correlación.

Para relaciones de *ETP/P* entre 64 y 1 la ecuación es:

$$\%ETP = 66.182(ETP/P) - 1,0105$$

$$R^2 = 0.9999.$$

Para *ETP/P* entre 1 y 0.25 la ecuación es:

$$\begin{aligned} \%ETP &= 231.5(ETP/P)^3 - \\ &495.14(ETP/P)^2 + \\ &289(ETP/P) + 41.314 \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.9996$$

Para relaciones de *ETP/P* entre 0.25 y 0.015625 la ecuación de regresión es:

$$\%ETR = 33.127 \ln(ETP/P) + 141.04$$

$$R^2 = 0.9926$$

En los puntos de intersección de estas ecuaciones el salto era mínimo y además conservaban las pendientes. Para diminuir este error, los puntos se leyeron directamente de la gráfica.

3.5 Ecuación de Budyko

Budyko (1974) basado en un balance de masas y partiendo de las relaciones heurísticas halladas por Schreiber (1904) y por estudios de tra-

bajos hechos anteriormente por Ule y Penck, propone la siguiente expresión,

$$\begin{aligned} ETR &= \left[ETP * P * \tanh \left(\frac{P}{ETP} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ &\quad \left. \left(1 - \cosh \left(\frac{ETP}{P} \right) + \sinh \left(\frac{ETP}{P} \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (11)$$

ETR es la evaporación real, P es la precipitación, ETP es la evaporación potencial en mm por el período considerado. La ecuación (10) gráficamente se expresa como,

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para enfrentar el problema de falta de mediciones de algunas variables hidrológicas o información poco confiable se hicieron cálculos con ecuaciones teóricas o con ecuaciones obtenidas de regresiones. El método de Morton es uno de los métodos que da los estimativos más altos para Colombia, este se ajusta muy bien a las observaciones esperadas lo cual permite su recomendación pues la metodología en la que se fundamenta está basada en principios físicos claros que permitirán extender su aplicabilidad a zonas con poca o ninguna medición de evaporación. La ecuación de Turc calcula directamente la evaporación real a partir de la temperatura y la precipitación, y como la temperatura media refleja totalmente la topografía, esto a su vez se refleja en la distribución espacial de la evaporación potencial, la cual es el ya definido parámetro L. Es de aclarar que este método es una buena herramienta para cálculos aproximados, por su fácil implementación, además las variables que se requieren en su cálculo son las más disponibles. El método desarrollado por Penman dio estimativos bajos, esto puede ser porque la mayoría de las variables fueron obtenidas de información de satélite a una resolución espacial gruesa. Holdridge muestran gran variabilidad espacial según la región y la vegetación.

En casi todo el país Turc da menores estimativos que Morton y Penman, exceptuando las regiones de alta nubosidad como en el Chocó, esto puede ser causa de la influencia

de la radiación neta, que es un término importante para el cálculo por Penman y Morton. Los métodos de Penman y Morton dan estimativos de la evaporación potencial muy similares, esto puede ser debido a que las dos ecuaciones están basadas en el balance de energía. En la Figura 3, se presentan los resultados de evaporación real para cada uno de los métodos antes descritos.

Para verificar la aplicabilidad de estas metodologías se hizo una evaluación por medio del balance hídrico, el cual ha probado ser una buena metodología para la estimación del caudal medio anual. Se hicieron comparaciones entre el caudal medio medido en 200 estaciones de caudal en Colombia y el caudal estimado por medio del balance hídrico usando los mapas de precipitación, desarrollados en el proyecto realizado por UNALMED-COLCIENCIAS-UPME, 1999 y mapas de evaporación, estimados por los métodos descritos anteriormente. En la Figura 4, se presentan estos resultados.

En general, puede afirmarse que los estimativos de evaporación obtenidos son aceptables, ya que el error promedio presentado por los métodos oscila entre el 20 y el 30% en la estimación de los caudales (ver Figura 4) y se distribuye a lo largo de las cuencas de manera sistemática, es decir subestimando o sobreestimando el caudal a lo largo de su red; lo cual revela errores en los campos de precipitación y evaporación, que no han podido ser superados por las deficiencias y la escasez de la información de base utilizada para la estimación de dichos campos, y / o debido a errores de medición de caudal.

En la Figura 5 se presentan las cuencas con errores relativos menores al 20% en la estimación de la evaporación, es decir la comparación entre la evaporación estimada por las metodologías y la evaporación calculada por medio del balance hídrico. Se observa como los métodos de Penman y Turc tienen mayor cantidad de estaciones de caudal en las cuales los errores relativos entre la evaporación del balance y la estimada por los métodos, en valor absoluto son menores al 20%, por lo tanto se con-

sidera que son las que estiman con menor error la evaporación real en Colombia.

5 CONCLUSIONES

Debido a la dificultad de medición directa de la evapotranspiración real se recurrió a la estimación por medio de metodologías propuestas por diversos autores. En particular se incorporaron ideas modernas como la relación complementaria entre evaporación potencial y real, la estimación con base a las zonas de vida y a índices de vegetación obtenidos de sensores remotos, y relaciones climáticas apoyadas en estudios de largo plazo a nivel mundial. La selección del método más adecuado se hizo con base a la comparación con los promedios climatológicos en más de 200 cuencas que se puede obtener del balance hídrico usando caudales disponibles en las estaciones limnimétricas.

De estas ecuaciones se puede decir que Penman está basada en una teoría física muy consistente como lo es el balance de energía, pero que requiere de datos de radiación, no disponible a pequeña escala para todo Colombia.

Turc se basa en un balance de masas y según Brutsaert (1982) tiene un desarrollo muy similar a la ecuación de Budyko (1974). Este método es más sencillo de implementar debido a que sólo está en función de la temperatura y de la precipitación. Es uno de los que arroja menores errores en los estimativos de la evaporación real.

Penman y Morton son métodos difíciles de implementar debido a la información requerida, pero el desarrollo teórico de ambos es muy interesante y da buenos estimativos.

En Colombia las estaciones meteorológicas de entidades oficiales no cuentan con lisímetros, los cuales miden la evaporación real, solo los agrónomos los utilizan para conocer las necesidades de cultivos en pequeñas parcelas. Por lo tanto no se puede hacer una validación más confiable de los estimativos de los diferentes métodos.

Para validar los resultados con un balance es necesario contar con información confiable,

lo que es difícil, ya que se encontraron incongruencias en los datos, como por ejemplo que la radiación necesaria para la evaporación anual obtenida por el balance en ciertas cuencas es mucho mayor que la se tiene en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado por COLCIENCIAS y la Unidad de Planeación Minero - Energética (UPME). Se agradece a Eduardo Machado de la UPME y Alvaro Jaramillo de Cenicafe por sus aportes. Igualmente se reconoce la información recibida de IDEAM, EPM, CENICAFE y diversas instituciones del exterior como NOAA, NASA y CIRES de la Universidad de Colorado.

REFERENCIAS

- Aparicio, F. Fundamentos De Hidrología De Superficie. México: Limusa Noriega, 1993.
- Barco, J. y Cuartas, A. Estimación de la Evaporación en Colombia. Trabajo dirigido de grado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniera Civil. Facultad de Minas, Universidad Nacional. Medellín. 1998.
- Brutsaert, W. Evaporation Into The Atmosphere, Theory, History and Applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1984.
- Budyko, M. J. Climate and life, Academic Press, N.Y., 508 pp. 1974.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill, 1994.
- Eslava J. A. Régimen de la Presión Atmosférica en Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Alvarez Lleras N°8. Santa Fe de Bogotá, D.C. 1995.
- Holdridge, L.R. Life Zone Ecology. Tropical Science Center, San José de Costa Rica, 1978.
- Maidment, D.R. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, INC. Nueva York. 1993.
- Morton, F.I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their Significance to the science and practice of hydrology. Journal of Hydrology. National Hydrology Research Institute, Environmental Canada, Ottawa, August of 1982.
- Poveda, G., y Mesa, O. Efectos Hidrológicos de la Deforestación. Energética. Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, N°16, 91-102, Diciembre. 1995.
- Priestley, C.H.B., y Taylor, R. J. On the Assessment of surface heat flux and Evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Rev., vol. 100, pp. 81-92. 1972.
- Remenieras, G. Tratado de Hidrología Aplicada. Técnicos Asociados S.A. Segunda edición. Barcelona. 1974.
- UNAL-UPME-COLCIENCIAS. Universidad Nacional de Colombia. Unidad de Planeación Minero-Energética. Balance Hidrológico de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas, Medellín, 1999.

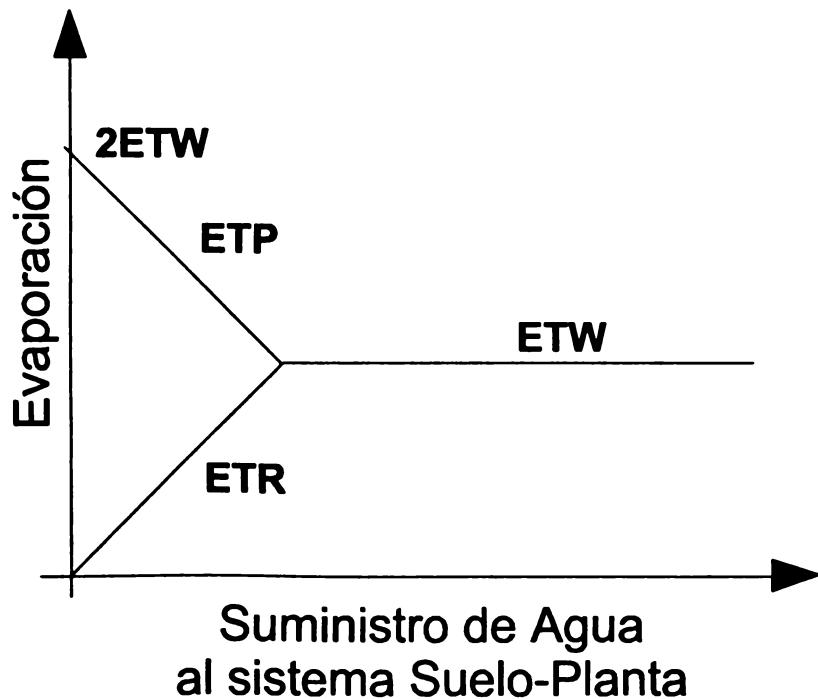


Figura 1. Representación esquemática de la relación complementaria entre evaporación potencial y real con suministro de energía de radiación constante.

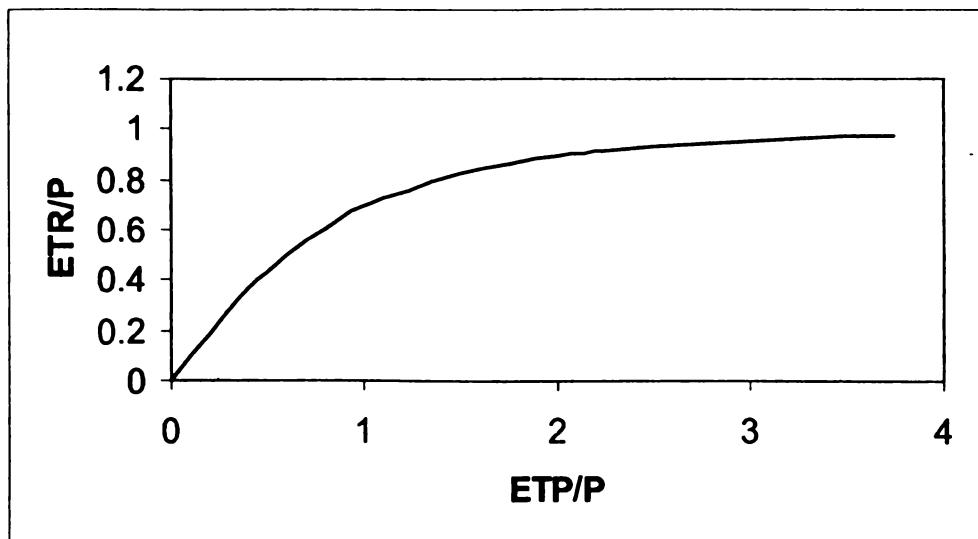


Figura 2. Relación adimensional entre la evaporación real y potencial para la ecuación de Budyko.

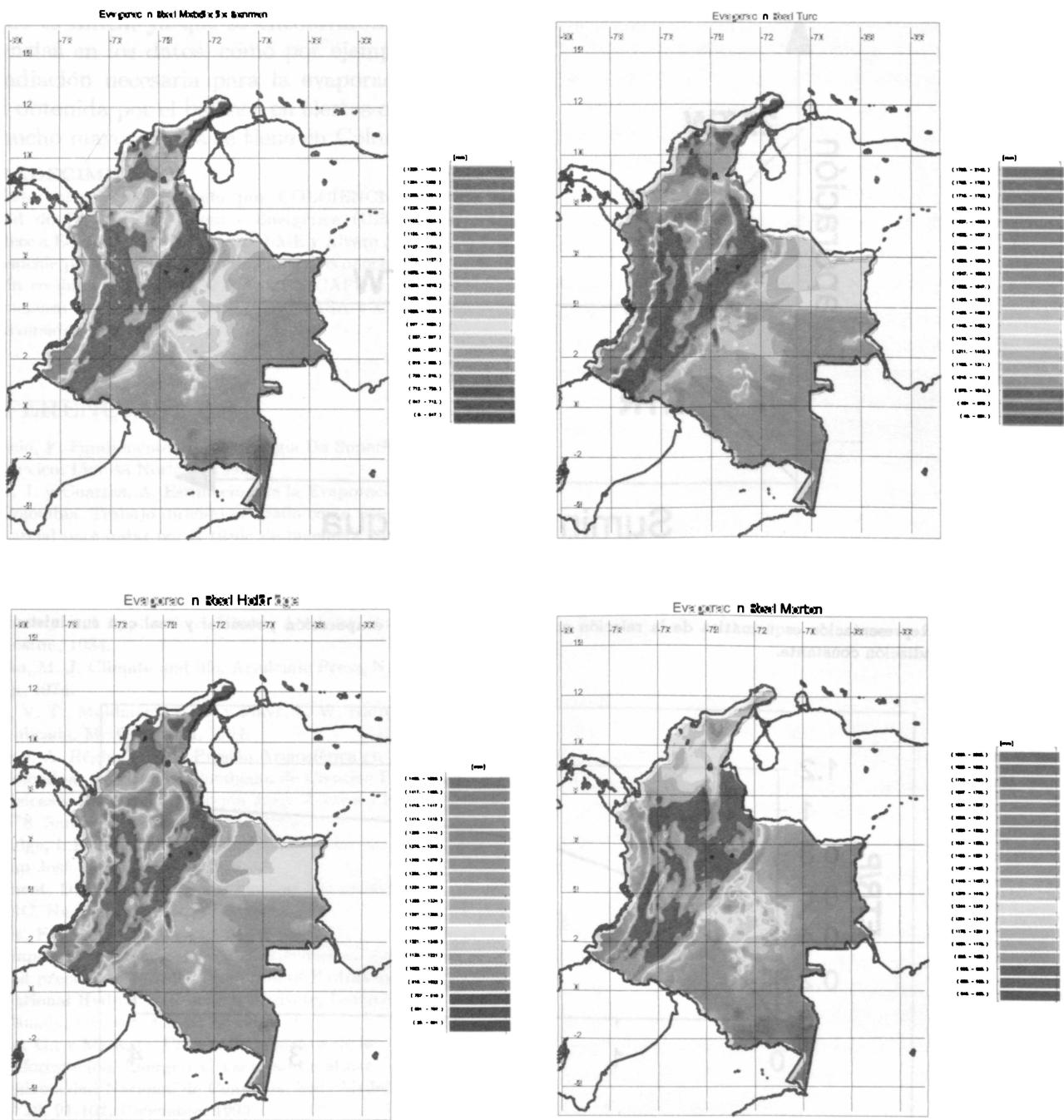


Figura 3. Distribución espacial de la estimación de la evapotranspiración por los métodos de Morton, Turc, Holdridge y Penman.

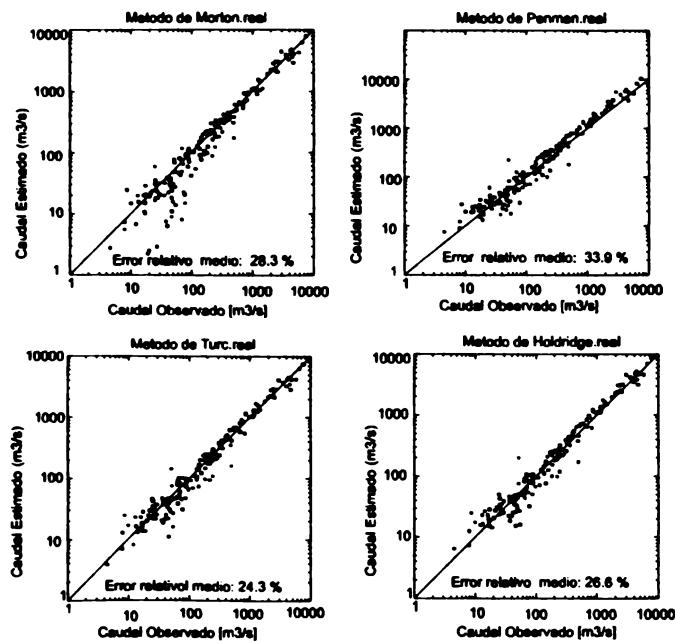


Figura 4. Comparación entre el caudal observado en las estaciones y estimación con el balance.

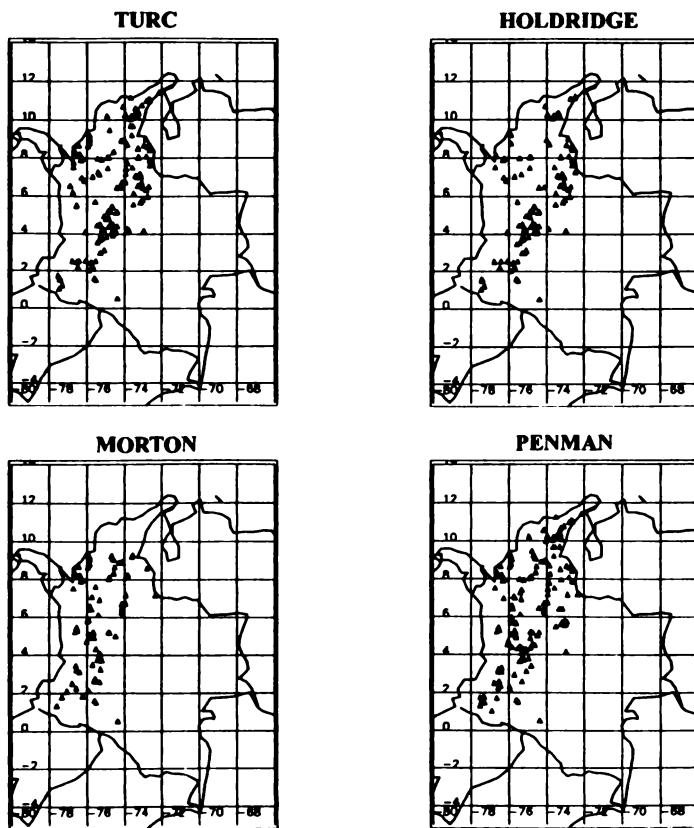


Figura 5. Estaciones de caudal en las cuales el valor absoluto del error relativo es menor o igual al 20%.