

**VALIDACIÓN DE LAS FÓRMULAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN
DE REFERENCIA (ET_o) PARA COLOMBIA**

Juan Antonio Gómez Blanco
Gonzalo Hurtado Moreno
Martha Cecilia Cadena

**Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Subdirección de Meteorología**

Contenido

Introducción	3
1. Objetivos	4
1.1 Objetivo general.....	4
1.2 Objetivos específicos.....	4
2. Marco conceptual	5
2.1 Definiciones.....	5
2.2 Revisión bibliográfica	6
3. Materiales y métodos	7
3.1 Información meteorológica.....	7
3.2 Revisión de métodos empíricos utilizados para el cálculo de la ETo	9
3.2.1 Método FAO-Penman-Monteith.....	10
3.2.2 Otros métodos empíricos utilizados en el estudio	20
3.2.2.1 Método de Thornthwaite.....	20
3.2.2.2 Método de Christiansen.....	21
3.2.2.3 Método de Linacre	23
3.2.2.4 Método de Turc.....	25
3.2.2.5 Método de Hargreaves	26
3.3 Procedimiento de cálculo.....	27
3.4 Selección del método más apropiado por zona pluviométrica.	28
3.5 Espacialización de la ETo y generación de puntos de control en zonas no instrumentadas	28
4. Análisis de resultados	29
4.1 Selección del método más apropiado para cada zona pluviométrica analizada.	29
4.1.1 Zona pluviométrica Pacífico Norte y Central.	30
4.1.2 Zona pluviométrica Alto Magdalena y Alto Cauca.	30
4.1.3 Zona pluviométrica Caribe-Cesar	32
4.1.4 Zona pluviométrica Medio Magdalena y Medio Cauca	35
4.1.5 Zona pluviométrica Catatumbo.	36
4.1.6 Zona pluviométrica Sogamoso-Lebrija-Altiplano.	37
4.1.7 Zona pluviométrica Orinoquía Occidental.	37
4.1.8 Zona pluviométrica Piedemonte Amazónico	38
4.1.9 Zona pluviométrica Trapecio Amazónico.....	39
4.1.10 Zona pluviométrica Patía y Mira.	39
4.1.11 Fórmula aplicable para Colombia	40
Bibliografía	41

Índice de mapas y gráficas

Mapa 1. Estaciones por zona pluviométrica	9
1. Número de estaciones por zona pluviométrica	8
2 Cálculo de la curva de presión de saturación	11
3. Cálculo de la presión atmosférica	12
4. Cálculo del parámetro A	12
5. Cálculo del parámetro B	13
6. Cálculo del parámetro C	13
7. Cálculo del parámetro D	14
8. Cálculo del parámetro E	15
9. Cálculo de la declinación solar	16
10. Cálculo del ángulo de radiación a la hora de puesta del sol	16
11. Cálculo del ángulo de radiación extraterrestre para periodos diarios	17
12. Cálculo del parámetro F	19
13. Cálculo del parámetro G	19
14. Cálculo de la ETo por el método FAO-Penman-Monteith	20
15. Cálculo de la ETo por el método Thornthwaite	21
16. Cálculo del brillo solar teórico	22
17. Cálculo de la radiación extraterrestre en el tope de la atmósfera	23
18. Cálculo de la ETo por el método de Christiansen	23
19. Cálculo de la ETo por el método de Linacre	24
20. Cálculo de la ETo por el método de Turc	26
21. Cálculo de la ETo por el método de Hargraves	27

Introducción

La presente nota técnica se hizo con el objetivo principal de actualizar el cálculo de evapotranspiración de referencia (ETo) para el país, puesto que la última publicación al respecto, llamada *La evapotranspiración potencial en Colombia*, la editó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) en el año 2000.

Para tal fin se realizaron nuevos cálculos, tomando como base información meteorológica registrada en las estaciones para el periodo 1981-2016, y se obtuvo como resultado un cálculo actualizado de la evapotranspiración en Colombia, escalas anual, mensual y decadiaria.

En el documento se exponen inicialmente una serie de definiciones y conceptos propios del marco conceptual de la variable, sobre los cuales existe extensa bibliografía referente a las diversas fórmulas de cálculo y explicaciones a cerca de su fundamento físico y matemático; de todas ellas, la más completa –y la que se sigue a lo largo de este análisis– corresponde a la Nota Técnica 56, publicada por FAO-2006: “Evapotranspiración del cultivo”. Aquí se explican la importancia y la forma de calcular la evapotranspiración, teniendo en cuenta todos los factores involucrados en el sistema

ambiente-planta y la diferencia, por ejemplo, entre la evapotranspiración calculada únicamente con factores meteorológicos (ET) y la que incluye un cultivo de referencia (ET_o).

Seguidamente, se describirá la información base con la cual se calculó la ET_o para Colombia. Esta información está compuesta por datos obtenidos de estaciones que cumplen con la exigencia del cálculo y que involucran variables como la humedad relativa, velocidad del viento, temperaturas media, máxima y mínima, y radiación. Las estaciones disponibles se analizaron rigurosamente, con el propósito de emplear los registros más completos y de esta manera disminuir el margen de error en el cálculo de la ET_o.

Además, se muestra el detalle de las metodologías disponibles en la bibliografía para el cálculo de la ET_o y se analizan siete modelos distintos, desde los más elaborados como el método FAO-Penman-Monteith, hasta los menos exigentes en información como la fórmula de Thornthwaite, con el fin de compararlos entre sí y determinar cuál es el más aplicable para calcular la ET_o en Colombia.

Una vez hechos los cálculos a partir del aplicativo Evapotrans desarrollado para tal fin, se seleccionó el método con los resultados más aproximados a la variable evaporación, tomada como referencia y registrada en el tanque evaporímetro. Aunque el volumen de evaporación del tanque no es exactamente el mismo estimado a partir de las fórmulas utilizadas, sí sirvió como un indicador al menos del comportamiento de dicha variable y es aplicable en la escogencia de la fórmula más precisa. Después de hacer tal comparación, se corroboró que el método FAO-Penman-Monteith es el más cercano al valor de referencia en las zonas pluviométricas de Colombia.

Cada una de las ecuaciones aplicadas, dio como resultado un valor de evapotranspiración mensual y otro valor de evapotranspiración decadiaria, los cuales, una vez agrupados por zonas pluviométricas, permitieron hacer el análisis espacial por regiones para escoger una fórmula alterna que resultara menos exigente en cuanto a información de entrada, y ajustarla posteriormente a partir de constantes obtenidas de la ecuación de referencia FAO-Penman-Monteith y de este modo tener una mayor cobertura de puntos de referencia para el país.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Actualizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia ET_o para Colombia y elaborar los mapas correspondientes, con base en los datos obtenidos en las escalas mensual y decadiaria para fines agrícolas.

1.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información disponible y necesaria para el cálculo, como variables de entrada y conformación de la base de datos requerida (temperaturas máxima y mínima, insolación o radiación, humedad relativa y velocidad del viento a dos metros).
- Calcular la ET_o tanto mensual como decadal para estaciones de referencia, según las metodologías seleccionadas disponibles en la bibliografía existente, y escoger el método que mejor se ajusta en las regiones de Colombia, mediante la validación de los resultados, con mediciones reales o fuentes de información alternas.

- Calcular la variable en las escalas mensual y decadal para todo el país con el método seleccionado, y conformar la base de datos de la variable para cada una de las estaciones.
- Elaborar mapas nacionales en las escalas mensual y decadal de la evapotranspiración de referencia.

2. Marco conceptual

2.1 Definiciones

Charles Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) fue quien habló por primera vez de evapotranspiración, concepto que definió como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, desarrollado en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua. La evapotranspiración es un proceso combinado que comprende la evaporación de todos los tipos de superficies (vegetal-suelo-lámina de agua) y la transpiración de las plantas.

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de una variedad de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación húmeda.

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y su posterior remoción hacia la atmósfera. Los cultivos pierden agua especialmente a través de los estomas.

Al igual que la transpiración, la evapotranspiración es un fenómeno que depende de las condiciones atmosféricas (radiación, viento, humedad), del suelo (albedo, contenido de humedad, superficie) y de la vegetación (sistema radicular, extensión y morfología del área foliar).

De acuerdo con lo anterior, se resumen los conceptos más comúnmente utilizados en los estudios de evapotranspiración:

Evapotranspiración potencial (ETP). Cantidad máxima de agua que puede perder una capa de vegetación verde, continua y de corta altura, cuando la cantidad de agua suministrada al suelo es ilimitada.

Evapotranspiración real (ETr). Cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes.

Evapotranspiración de referencia (ETo). Evapotranspiración de un cultivo específico, estándar o de referencia.

El concepto evapotranspiración de referencia (ETo) se estableció con el fin de estimar de manera más precisa la evapotranspiración en espacios que presentan algún tipo de cobertura vegetal. Se diferencia de la ETP justamente porque incorpora el componente vegetal a los factores que inciden en la evapotranspiración, pero también porque la ETo se calcula mediante la contemplación de un cultivo de referencia, generalmente gramíneas o alfalfa de entre 8 y 15 cm de altura, de crecimiento uniforme y condiciones de humedad ideales.

A pesar de que la ETo incluye dentro de su estimación un cultivo de referencia, esto sigue siendo muy ambiguo si lo que se pretende es evaluar la evapotranspiración en modelos productivos agrícolas, con características diferentes de las de un cultivo de referencia.

La ETo, al tener un cultivo de referencia estándar, no toma en cuenta aspectos como dimensiones y morfología del follaje, etapa de desarrollo (fenología) y demás características fisiológicas propias de las plantas, como su respiración y fotosíntesis. Por tal motivo, al cálculo de la ETo se le incorpora un coeficiente de cultivo (K_c), el cual incorpora aspectos vegetales al cálculo de evapotranspiración y da origen a la evapotranspiración de cultivo (ETc) en condiciones estándar.

Por último, está la evapotranspiración del cultivo para condiciones no estándar (ETcaj), la cual se calcula teniendo en cuenta condiciones específicas de cada variable para una zona de interés, tales como cultivos no uniformes en su densidad de siembra o sometidos a estrés hídrico, entre otros.

2.2 Revisión bibliográfica

A pesar de la reconocida importancia del tema, en Colombia son relativamente escasas las investigaciones hechas sobre esta materia, y las que existen las han realizado en su mayoría el Ideam o las universidades. Entre las que abarcan el nivel nacional, podrían citarse las siguientes:

Los primeros estudios de evapotranspiración potencial en Colombia estuvieron a cargo de los integrantes de la misión de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la cual fue asignada en sus comienzos al Servicio Colombiano de Hidrología y Meteorología (SCMH). En 1976, el SCMH se convirtió en el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (Himat). En Dobrea (1976) (Dobrea, 1976) se hizo una evaluación de la ETo calculada por el método de Thornthwaite, con base en la temperatura media. En este estudio inicial, así como en algunos posteriores, se siguieron metodologías que aparecían descritas en (Norero, 1976) y (Grassi, 1978), manuales que se prepararon en el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (Cidiat), con sede en Mérida (Venezuela).

En la década de los ochenta, tras la creación del Himat, instituto cuyas prioridades eran la adecuación de tierras y los estudios aplicados a labores de riego y drenaje, surgió la necesidad de evaluar los elementos del balance hídrico de cultivos, entre los cuales figuran la evapotranspiración potencial de referencia (ETo) y para cultivos en particular (ETc). Estas evaluaciones se hicieron de manera experimental y por medio de fórmulas empíricas.

Las mediciones experimentales, aunque más exactas, representan una gran dificultad debido a su complejidad en cuanto a infraestructura y emplazamiento de los puntos de medición, motivo por el cual son relativamente escasos los estudios en los cuales se tomó en cuenta información de campo. En Basto (1992) (Basto, 1982) y García (1984) (García, 1984) se describen mediciones hechas a partir de un evapotranspirómetro desarrollado por García, con el apoyo del Himat. Los resultados tuvieron un razonable nivel de confiabilidad, y la OMM avaló el equipo del Himat como uno de los más confiables. Estos equipos generaron información por un periodo superior a diez años, que se empleó ocasionalmente en aplicaciones de riego. En la siguiente década, tales estudios experimentales pasaron al dominio de las universidades; por ejemplo, en Montealegre (1995) (Montealegre, 1995) se describe un interesante experimento en campos de soya y con diferentes niveles de agotamiento de agua en el suelo, cuyos resultados Fenalce consideró para mejorar el manejo hídrico del cultivo.

La mayor parte de los estudios de ETo en Colombia se han realizado utilizando fórmulas empíricas. Sin embargo, dada la gran cantidad de métodos y ecuaciones existentes en la bibliografía (Baldión, 1985), inicialmente se trató de establecer un método que fuese válido en las condiciones ambientales de nuestro país. El estudio de Castro y Guzmán (1985) (Castro & Guzmán, 1985) se concentró en calcular la ETo por diferentes metodologías, contrastándolas con la evaporación del tanque clase A, existente en la mayoría de las estaciones climatológicas principales. Este estudio es uno de los pocos que han tratado el tema, pero sus resultados no fueron suficientemente confiables debido al escaso número de estaciones que se consideraron (doce en total) y a la inconsistencia de la información. Estas deficiencias se pueden justificar por la ausencia de equipos de cómputo modernos, que en esos años aún no eran de utilización masiva en el país. Sin embargo, siguiendo las directrices de este estudio, en (Lasso, 1987) se aplica la fórmula de Penman para calcular la ETo en todo el país, presumiendo que es el método más confiable para las latitudes ecuatoriales. Posteriormente, este estudio se actualizó en (Hurtado G. , 2000), utilizando la más reciente actualización del modelo Penman-Monteith y el *software* más actualizado de la época (Hurtado, 2000). En este estudio se determinó la ETo para más de 400 estaciones distribuidas en todo el país, y mediante técnicas estadísticas, se extendieron los resultados a cerca de mil puntos adicionales. Tales estimaciones de la ETo se han actualizado en varias oportunidades, siguiendo las directrices y métodos descritos en FAO (2006) (FAO, 2006). Estos promedios mensuales, son los que se usan hoy en día en todos los estudios que utilizan la variable.

3. Materiales y métodos

3.1 Información meteorológica

La información meteorológica se recopiló en su totalidad de la base de datos del Ideam, registrada por la red de estaciones meteorológicas que funcionan o han funcionado en Colombia. Para efectos del presente proyecto se extractaron 141 estaciones, cuya característica común consistió en que tuvieran registros diarios de temperatura media, humedad relativa, velocidad media del viento, radiación solar, brillo solar, evaporación, temperatura punto de rocío y tensión de vapor. La información diaria se procesó en las escalas decadiaria y mensual.

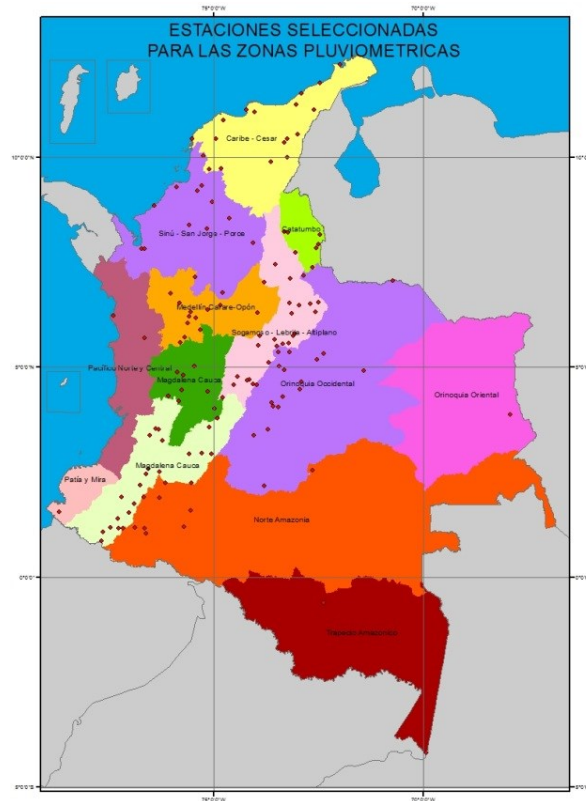
El período de análisis seleccionado corresponde al de 1981-2016, para las variables enunciadas. Las estaciones seleccionadas y sus características se relacionan en el anexo I. Cabe aclarar que cada método se trabajó con un diferente número de estaciones, de acuerdo con los requerimientos de variables que cada método exigía. De esta manera, los métodos que utilizaban menor número de variables fueron los que mayor cantidad de estaciones usaron, y el de mayor exigencia de datos resultó ser el de FAO-Penman-Monteith, por lo cual se calculó para un menor número de estaciones.

Las estaciones inicialmente seleccionadas se especializaron en cada una de las zonas pluviométricas, con el fin de analizar el cubrimiento en cada una de ellas (tabla 1, mapa 1). Las zonas pluviométricas están descritas en la publicación del IDEAM del 2014, "Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP)".

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119>

Tabla 1. Número de estaciones por zona pluviométrica

NOMZH	RÉGIMEN	ESTACIONES
Sinú-San Jorge-Porce	Mm-1	15
Caribe-Cesar	Bm-1	16
Sogamoso-Lebrija-Altiplano	Bm-3	24
Medellín-Carare-Opón	Bm-2	13
Pacífico Norte y Central	Se	2
Patía y Mira	Mm-4	1
Magdalena-Cauca	Bm-6	21
Orinoquia Occidental	Mm-1	19
Norte Amazonia	Mm-3	10
Trapezio Amazónico	Mm-5	2
Catatumbo	Bm-4	6
Orinoquia Oriental	Mm-2	1
Magdalena-Cauca	Bm-5	9
San Andrés y Providencia		2
Total		141



Mapa 1. Estaciones por zona pluviométrica

Se puede apreciar que las zonas con menor densidad de estaciones son Patía y Mira, y Orinoquia Oriental, con una estación; Pacífico Norte y Central y Trapecio Amazónico, con dos estaciones. Este bajo cubrimiento no permitió obtener una buena resolución de ETo en las escalas decadiaria y mensual en estas zonas. El resto de las zonas presentan una aceptable cantidad y distribución de estaciones en materia espacial.

3.2 Revisión de métodos empíricos utilizados para calcular la ETo

La medición exacta de la ETo en condiciones de campo solamente puede realizarse a través de mediciones experimentales, las cuales se hacen en condiciones muy precisas de terreno y cultivo. Los aparatos utilizados son los lisímetros, que son tanques aislados rellenos con suelo disturbado o no disturbado en los que el cultivo crece y se desarrolla. Sin embargo, como los lisímetros son difíciles de manejar y costosos de construir, y además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, su empleo se restringe normalmente a trabajos investigativos.

A causa de las dificultades en la realización de mediciones experimentales, la ETo se calcula comúnmente con datos meteorológicos. Se han desarrollado numerosas ecuaciones empíricas o semiempíricas para determinar la evapotranspiración del cultivo o la evapotranspiración de referencia, utilizando datos meteorológicos. En este estudio se probaron seis métodos empíricos, aparte de la ecuación Penman-Monteith, estimada según la ecuación propuesta por la FAO, para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo).

3.2.1 Método FAO-Penman-Monteith

El método FAO-Penman-Monteith se recomienda actualmente como el único método estándar para la definición y cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET₀). El método requiere datos meteorológicos, como radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, y datos de ubicación geográfica de la estación, como latitud, longitud y elevación.

La ecuación FAO-Penman-Monteith se derivó a partir de la ecuación original de Penman-Monteith (Penman, 1948) (Penman, 1948) y de las ecuaciones de resistencia aerodinámica y del cultivo. La ecuación es:

$$\lambda ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \left[\frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_a} \right]}{\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

Donde:

R_n radiación neta

G flujo de calor en el suelo

(e_s - e_a) déficit de presión del vapor del aire

ρ_a densidad del aire

C_p calor específico del aire seco

Δ pendiente de la curva de presión de saturación

λ constante sicrométrica

r_a resistencia aerodinámica de la superficie para el vapor de agua

r_s resistencia superficial total

La resistencia superficial (r_s) describe la resistencia al flujo de vapor a través de los estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo. La resistencia aerodinámica (r_a) describe la resistencia en la parte inmediatamente superior a la vegetación e incluye a la fricción que sufre el aire al fluir sobre superficies vegetativas.

En el Cuaderno N.º 56 de la FAO (FAO NO.56, 2006) se recomienda una simplificación de la ecuación anterior, mediante la utilización de algunas constantes para una superficie de grama tomada como cultivo de referencia. Se definió un cultivo de referencia con una altura media de 0,12 m, una resistencia fija de 70 s/m y un valor de albedo de 0,23. De esta manera, la ecuación se modifica a la expresión:

$$ET_o(mm) = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)}$$

Las fórmulas y ecuaciones para calcular las variables intermedias, los parámetros y la ecuación de ET_o se describen a continuación:

Para ilustración se han calculado los diferentes parámetros de la ecuación, con la información de una estación meteorológica típica.

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor (Δ) [$kPa^\circ C^{-1}$]

Para calcular la curva de presión de saturación es necesaria la temperatura media del aire.

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \exp\left(\frac{17,27 * T_{media}}{T_{media} + 237,3}\right) \right]}{(T_{media} + 237,3)^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

Tabla 2. Cálculo de la curva de presión de saturación

Tmedia	Δ
27,7	0,21620499
27,0	0,20862615
27,5	0,21456177
27,7	0,21620499
27,8	0,21730633
27,6	0,21565608
27,5	0,21456177
27,0	0,20862615
27,4	0,21292906
27,2	0,21130681
27,0	0,20862615
27,1	0,21023109

La constante sicrométrica es una función de la presión atmosférica en cada localidad. Esta presión se calcula generalmente con base en la elevación.

Presión atmosférica (P) [kPa]

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Ec. (2)}$$

Constante psicrométrica (γ) [$kPa^\circ C^{-1}$]

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} * P \quad \text{Ec. (3)}$$

Tabla 2. Cálculo de la presión atmosférica

z		p	lambda
53	0,99882423	100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489
		100,675073	0,0669489

Con las variables intermedias anteriores y la velocidad del viento (u^2) es posible calcular los cuatro parámetros de la ecuación:

$$\text{Parámetro A} = (1 + 0,34 * u_2) \quad \text{Ec. (4)}$$

Tabla 3. Cálculo del parámetro A

u	A
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68
2	1,68

$$\text{Parámetro } B = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma(\text{Parámetro } A)} \quad \text{Ec. (5)}$$

Tabla 4. Cálculo parámetro B

A	lamda	Δ	B
1,68000	0,06694892	0,21620499	0,65779946
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,64972261
1,68000	0,06694892	0,21456177	0,65608005
1,68000	0,06694892	0,21620499	0,65779946
1,68000	0,06694892	0,21730633	0,65894229
1,68000	0,06694892	0,21565608	0,65722702
1,68000	0,06694892	0,21456177	0,65608005
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,64972261
1,68000	0,06694892	0,21292906	0,65435443
1,68000	0,06694892	0,21130681	0,65262263
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,64972261
1,68000	0,06694892	0,21023109	0,65146467

$$\text{Parámetro } C = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma(\text{Parámetro } A)} \quad \text{Ec. (6)}$$

A	lamda	Δ	C
1,68000	0,06694892	0,21620499	0,11554285
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,11974022
1,68000	0,06694892	0,21456177	0,11642774
1,68000	0,06694892	0,21620499	0,11554285
1,68000	0,06694892	0,21730633	0,11495726
1,68000	0,06694892	0,21565608	0,11583695
1,68000	0,06694892	0,21456177	0,11642774
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,11974022
1,68000	0,06694892	0,21292906	0,11732049
1,68000	0,06694892	0,21130681	0,11822119
1,68000	0,06694892	0,20862615	0,11974022
1,68000	0,06694892	0,21023109	0,1188261

Tabla 5. Cálculo parámetro C

$$\text{Parámetro } D = \left[\frac{900}{(T_{media} + 273)} \right] u_2 \quad \text{Ec. (7)}$$

Tabla 6. Cálculo parámetro D

Tmedia	u	D
27,7	2	5,98702811
27,0	2	6,00100017
27,5	2	5,99001664
27,7	2	5,98702811
27,8	2	5,98503741
27,6	2	5,98802395
27,5	2	5,99001664
27,0	2	6,00100017
27,4	2	5,99300816
27,2	2	5,99600266
27,0	2	6,00100017
27,1	2	5,99800067

El siguiente componente de la ecuación considera los parámetros de humedad del aire.

Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima del aire ($e^0 Tmáx$)[kPa]

$$e_0(T_{máxima}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{máxima}}{T_{máxima} + 237,3} \right] \quad \text{Ec. (8)}$$

Para calcular la presión de saturación de vapor (e^0) a la temperatura máxima, se tomó la temperatura máxima del aire.

Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima del aire ($e^0 Tmín$) [kPa]

$$e_0(T_{mínima}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{mínima}}{T_{mínima} + 237,3} \right] \quad \text{Ec. (9)}$$

Para Calcular la presión de saturación de vapor (e^0) a la temperatura mínima, se tomó la temperatura mínima del aire.

Presión media de vapor de saturación (e_s)[kPa]

$$e_s = \frac{e^0(T_{máxima}) + e^0(T_{mínima})}{2} \quad \text{Ec. (10)}$$

La presión media de vapor de saturación (e_s) se obtuvo del promedio de las presiones a $Tmáx$ y $Tmín$.

Presión de saturación de vapor a la temperatura media del aire ($e^0 T_{med}$) [kPa]

$$e^0(T_{media}) = 0,6108 * \exp \left[\frac{17,27 * T_{media}}{T_{media} + 237,3} \right] \quad \text{Ec. (11)}$$

La presión de saturación de vapor a la temperatura media se calculó con la temperatura media del aire.

Presión real de vapor (e_a) [kPa]

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} e^0(T_{media}) \quad \text{Ec. (12)}$$

La presión real de vapor (e_a) se obtuvo con los datos de humedad relativa media como dato de entrada y la presión de saturación de vapor a la temperatura media del aire, obtenida en el ítem anterior. Con las cinco variables anteriores es posible calcular el parámetro E de la ecuación FAO-Penman-Monteith, que corresponde al déficit de presión de vapor.

Déficit de presión de vapor (parámetro E) [kPa]

$$\text{Parámetro } E = (e_s - e_a) \quad \text{Ec. (13)}$$

Tabla 7. Cálculo del parámetro E

$$E = \frac{e^0(T_{m\acute{a}xima}) + e^0(T_{m\acute{i}nima})}{2} - \frac{HR_{media}}{100} e^0(T_{media})$$

17,27...	e(tmed)	ea	E
1,80228534	3,70357893	2,11103999	1,59253894
1,76131126	3,55489509	2,23958391	1,31531118
1,79352341	3,67127021	2,45975104	1,21151917
1,80228534	3,70357893	2,7776842	0,92589473
1,80812111	3,72525536	2,83119408	0,89406129
1,7993658	3,69278196	2,62187519	1,07090677
1,79352341	3,67127021	2,53317644	1,13809376
1,76131126	3,55489509	2,23958391	1,31531118
1,78475156	3,63920719	2,3290926	1,31011459
1,77596975	3,6073883	2,56124569	1,04614261
1,76131126	3,55489509	2,73726922	0,81762587
1,77010968	3,58631057	2,65386982	0,93244075

El parámetro F involucra numerosos cálculos, debido a que es necesario determinar variables astronómicas.

Distancia relativa al Sol inversa Tierra-Sol (dr)

$$dr = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad \text{Ec. (14)}$$

J corresponde al día juliano (número del día, entre el 1.º de enero y el 31 diciembre). Para el caso de los datos de carácter mensual, el valor J que se toma corresponde al quinceavo de cada mes.

Declinación solar (d) [rad]

$$\delta = 0,409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad \text{Ec. (15)}$$

Tabla 8. Cálculo de la declinación solar

Mes	dayno	soldeclin
1	15	-0,37048737
2	46	-0,23048164
3	76	-0,03341091
4	107	0,17873871
5	137	0,33724262
6	168	0,40833141
7	198	0,36897629
8	229	0,22756189
9	259	0,02989859
10	290	-0,18190128
11	320	-0,3392264
12	351	-0,4085585

Este parámetro depende del día juliano y se calculó en radianes.

Ángulo de radiación a la hora de puesta del sol (ω_s) [rad]

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad \text{Ec. (16)}$$

Tabla 9. Cálculo del ángulo de radiación a la hora de la puesta del Sol

soldeclin	f(lat)	rad	xx	yy	omega
-0,37048737	6,15	0,10733775	-0,03878917	0,92678631	1,52893068
-0,23048164	6,15	0,10733775	-0,02447387	0,9679535	1,54550949
-0,03341091	6,15	0,10733775	-0,0035787	0,99368995	1,56719489
0,17873871	6,15	0,10733775	0,0190468	0,97840524	1,59026474
0,33724262	6,15	0,10733775	0,03544843	0,93823965	1,60858717
0,40833141	6,15	0,10733775	0,04253971	0,91250266	1,61743196

0,36897629	6,15	0,10733775	0,03863822	0,92732922	1,61247453
0,22756189	6,15	0,10733775	0,02416924	0,96861254	1,59575135
0,02989859	6,15	0,10733775	0,00320261	0,99380048	1,57401892
-0,18190128	6,15	0,10733775	-0,01938011	0,97784131	1,55097575
-0,3392264	6,15	0,10733775	-0,03564891	0,93758518	1,53276511
-0,4085585	6,15	0,10733775	-0,04256204	0,91241298	1,52413161

Esta variable se calculó a partir de la fórmula (en el aplicativo Evapotrans):

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0.5}} \right] \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \text{ y } X = 0,00001 \text{ si } X \leq 0$$

Radiación extraterrestre para **periodos** diarios (R_a) [$MJ m^{-2} día^{-1}$]

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Ec. 18)

Donde

$$G_s = \text{constante solar} = 0,082 MJ m^{-2} min^{-1}$$

Tabla 10. Cálculo del ángulo de radiación extraterrestre para **periodos** diarios

dayno	soldeclin	f(lat)	rad	xx	yy	omega	dr	Ra
15	-0,37049	6,15000	0,10734	-0,03879	0,92679	1,52893	1,03191	33,61392
46	-0,23048	6,15000	0,10734	-0,02447	0,96795	1,54551	1,02318	35,75841
76	-0,03341	6,15000	0,10734	-0,00358	0,99369	1,56719	1,00856	37,45583
107	0,17874	6,15000	0,10734	0,01905	0,97841	1,59026	0,99116	37,57082
137	0,33724	6,15000	0,10734	0,03545	0,93824	1,60859	0,97662	36,50854
168	0,40833	6,15000	0,10734	0,04254	0,91250	1,61743	0,96802	35,66790
198	0,36898	6,15000	0,10734	0,03864	0,92733	1,61247	0,96817	35,98297
229	0,22756	6,15000	0,10734	0,02417	0,96861	1,59575	0,97702	36,97487
259	0,02990	6,15000	0,10734	0,00320	0,99380	1,57402	0,99171	37,23106
290	-0,18190	6,15000	0,10734	-0,01938	0,97784	1,55098	1,00911	35,94067
320	-0,33923	6,15000	0,10734	-0,03565	0,93759	1,53277	1,02358	33,94291
351	-0,40856	6,15000	0,10734	-0,04256	0,91241	1,52413	1,03205	32,83807

Como se observa, esta variable depende de las cuatro definidas anteriormente y si se desea obtener a escala diaria, los parámetros precedentes deben contemplar este aspecto.

Duración máxima de la insolación (N) [h]

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad \text{Ec. (19)}$$

La duración máxima de la insolación depende del ángulo de radiación a la hora de puesta del sol. Este valor se construye con información diaria, por ello se necesitará identificar el número del día en el cual se está calculando.

Radiación solar (R_s) [$MJ m^{-2} día^{-1}$]

$$R_s = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N}\right) R_a \quad \text{Ec. (20)}$$

Radiación neta solar o de onda corta (R_{ns}) [$MJ m^{-2} día^{-1}$]

$$R_{ns} = 0,77 * R_{sa} \quad \text{Ec. (21)}$$

Radiación solar en un día despejado (R_{so}) [$MJ m^{-2} día^{-1}$]

$$R_{so} = \left(0,75 + \frac{2z}{100000}\right) R_a \quad \text{Ec. (22)}$$

Radiación neta solar de onda larga (R_{nl}) [$MJ m^{-2} día^{-1}$]

$$R_{nl} = \delta \left(\frac{T_{máxima,K}^4 + T_{mínima,K}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde

$$\sigma = 4,903 * 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}$$

y corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann. En lo que respecta a las temperaturas (máximas y mínimas absolutas), se expresaron en grados Kelvin [$K = °C + 273,16$]. La presión de vapor real ya se había calculado para el parámetro E.

Parámetro F : (radiación neta [$MJ m^{-2} día^{-1}$])

$$\text{Parámetro } F = R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Ec. (24)}$$

Tabla 11. Cálculo del parámetro F

tmax	tmin	tmax**4	tmin**4	*sigma	(0,34..	(1,35...	Rnl	Rn=F
32,1	23,2	8665005258	7697331962	40,11226969	0,136588	0,397366	2,177111	8,584663
31	22,9	8540717056	7666194977	39,73124485	0,130487	0,391642	2,030429	9,330250
31,9	23,1	8642307155	7686942449	40,0311554	0,120430	0,240267	1,158312	8,312766
32,5	22,8	8710535565	7655837006	40,12216236	0,106671	0,235253	1,006851	8,412616
32,3	23,2	8687748041	7697331962	40,16802363	0,104434	0,232165	0,973910	8,130928
31,8	23,4	8630974841	7718142581	40,07986136	0,113309	0,070685	0,321011	6,106850
31,5	23,5	8597044760	7728563700	40,02222914	0,117177	0,166357	0,780159	7,179210
31,1	22,8	8551960388	7655837006	39,73341531	0,130487	0,215753	1,118610	7,842567
32,2	22,5	8676371061	7624826060	39,96238474	0,126341	0,231968	1,171178	8,110701
31,7	22,7	8619653676	7645489533	39,87399858	0,115946	0,240937	1,113903	7,984370
30,9	23	8529484814	7676563456	39,72912733	0,108374	0,344697	1,484134	8,617144
31,1	23,1	8551960388	7686942449	39,8096703	0,111930	0,344947	1,537050	8,238944

Parámetro G: (flujo de calor del suelo [$\text{MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$])

$$\text{Parámetro } G = G_{mes,i} = 0.07(T_{media,i+1} - T_{media,i-1}) \quad \text{Ec. (25)}$$

El flujo de calor calculado para períodos diarios o decadales puede considerarse ≈ 0 . No obstante, a nivel mensual el valor sí viene dado por la ecuación precedente, en el cual la temperatura media (en $^{\circ}\text{C}$) del mes anterior que se va a calcular y del mes posterior son las variables independientes.

Tabla 12. Cálculo del parámetro G

Tmedia	G
27,7	-0,0105
27,0	0,0105
27,5	-0,049
27,7	-0,0175
27,8	0,0035
27,6	0,0175
27,5	0,0455
27,0	0,0105
27,4	-0,0175
27,2	0,028
27,0	0,007
27,1	-0,049

Generación de la variable de interés

Con los siete parámetros ya es posible calcular la ET_o , siguiendo para su construcción la ecuación:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(\text{Parámetro}F - \text{Parámetro}G) + \gamma * \text{Parámetro}E}{\Delta + \gamma * \text{Parámetro}A} \quad \text{Ec. (26)}$$

Tabla 13. Cálculo de la ETo. Método FAO-Penman-Monteith

A	B	C	D	E	Rn=F	G	ETodia	Etomes
1,68	0,65780	0,11554	5,98703	1,59254	8,58466	-0,0105	4,25	131,72
1,68	0,64972	0,11974	6,00100	1,31531	9,33025	0,0105	4,12	115,26
1,68	0,65608	0,11643	5,99002	1,21152	8,31277	-0,0490	3,72	115,44
1,68	0,65780	0,11554	5,98703	0,92589	8,41262	-0,0175	3,39	101,75
1,68	0,65894	0,11496	5,98504	0,89406	8,13093	0,0035	3,27	101,41
1,68	0,65723	0,11584	5,98802	1,07091	6,10685	0,0175	2,94	88,24
1,68	0,65608	0,11643	5,99002	1,13809	7,17921	0,0455	3,31	102,46
1,68	0,64972	0,11974	6,00100	1,31531	7,84257	0,0105	3,72	115,38
1,68	0,65435	0,11732	5,99301	1,31011	8,11070	-0,0175	3,79	113,56
1,68	0,65262	0,11822	5,99600	1,04614	7,98437	0,0280	3,42	105,88
1,68	0,64972	0,11974	6,00100	0,81763	8,61714	0,0070	3,31	99,16
1,68	0,65146	0,11883	5,99800	0,93244	8,23894	-0,0490	3,36	104,26
							ETP anual	1294,5

Las anteriores ecuaciones las explican Allen, et al. (1989) y forman parte de la fórmula de Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia.

3.2.2 Otros métodos empíricos utilizados en el estudio

A continuación, se hace una síntesis de las metodologías aplicadas en las escalas decadal y mensual, así como una breve descripción de la fórmula de cálculo. En la fuente bibliográfica que aparece en cada método se pueden hallar más detalles del método en cuestión.

3.2.2.1 Método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)

$$ETP = 0,53 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad ETP = 0.53(10T / I)^a$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial media diaria sin ajustar, en mm

T= temperatura media mensual (°C)

I = índice calórico anual

$$I = 12 \left[\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1,514} \right]$$

$$a = (675 * 10^{-9})I^3 - (771 * 10^{-7})I^2 + (179 * 10^{-4})I + 0,492$$

Para ajustar el valor obtenido de ETo hay que multiplicarlo por un factor dependiente de la latitud y de la época del año.

Tabla 14. Cálculo de la ETo por el método de Thornthwaite

Estación	Apto El Caraño
Municipio	Quibdó
Departamento	Chocó
Elevación (msnm)	53
Latitud (°,dec)	5,69
Longitud (°,dec)	76,64

col (1)	col (2)	col (3)	col (4)	col (5)	col (6)	col (7)
Mes	Tanual	Tmensual	Indice (I)	Indice (a)	ETPdiaria	ETPmensual
1	22,2	22,3	114,6	2,55	2,89	88,9
2	22,2	22,5	114,6	2,55	2,95	91,0
3	22,2	22,2	114,6	2,55	2,85	87,9
4	22,2	22,1	114,6	2,55	2,82	86,9
5	22,2	22,1	114,6	2,55	2,82	86,9
6	22,2	22,2	114,6	2,55	2,85	87,9
7	22,2	22,0	114,6	2,55	2,79	85,9
8	22,2	22,6	114,6	2,55	2,99	92,0
9	22,2	22,8	114,6	2,55	3,06	94,1
10	22,2	22,4	114,6	2,55	2,92	90,0
11	22,2	21,8	114,6	2,55	2,73	83,9
12	22,2	21,9	114,6	2,55	2,76	84,9
					ETP anual	1060,4

Los cálculos de la ETo mensual por este método aparecen en el anexo 2.

3.2.2.2 Método de Christiansen (Christiansen, 1968)

$$ETP=0,324*R_{tt}*C_{tt}*C_{wt}*C_{ht}*C_{st}*C_e$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial, en mm/mes

Rt = radiación extraterrestre tomada en el tope de la atmósfera, calculada de acuerdo con la constante solar de 2 calorías/cm²/min.

Rtt = Rt*número de días del mes.

$$C_{tt} = 0,43 + 0,425 * \left(\frac{T_c}{T_{co}}\right) + 0,122 * \left(\frac{T_c}{T_c^2}\right)$$

Tc = temperatura media en °C

Tco = 20 °C

$$C_{wt} = 0,672 + 0,406 \left(\frac{w}{w_0} \right) - 0,078 \left(\frac{w}{w_0} \right)^2$$

w = velocidad media del viento a 2 m de altura, en km/hora

w₀ = 6,7 km/hora

$$C_{ht} = 1,035 + 0,240 \left(\frac{H_m}{H_{m0}} \right)^2 + 0,275 \left(\frac{H_m}{H_{m0}} \right)^3$$

H_m = humedad relativa, en decimales

H_{m0} = 0,60

$$C_{st} = 0,340 + 0,856 \left(\frac{S}{S_0} \right) - 0,196 \left(\frac{S}{S_0} \right)^2$$

S = porcentaje de brillo solar medio, en decimales

S = n/N

n = brillo solar del mes i

N = brillo solar teórico del mes i

S₀ = 0,80

C_e = 0,970 + 0,030 (e / eo)

e = Elevación de la estación en metros

eo = 305 metros

Tabla 15. Cálculo del brillo solar teórico

Valores de N en función de la latitud												
0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12	12	12,1	12,1	12,1	12,1	12
5	11,8	11,9	12	12,2	12,3	12	12	12,3	12,1	12,2	11,9	12
10	11,6	11,8	12	12,3	12,6	13	13	12,4	12,1	11,8	11,6	12

Tabla 16. Cálculo de la radiación extraterrestre en el tope de la atmósfera

Valores de Rt en función de la latitud												
LAT	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	885	915	925	900	850	820	830	870	905	910	890	875
10	780	840	900	925	915	900	905	915	905	865	800	760
20	660	750	850	920	960	965	960	935	875	785	685	630

Tabla 17. Cálculo de la ETo. Método de Christiansen

Estación	Checua
Municipio	Nemocón
Departamento	c/marca
Elevación (msnm)	2580
Latitud (°,dec)	5,1
Longitud (°,dec)	73,9

mes	Rt(cte)	Rtt	Tmedia	Ctt	V vto	Cwt	HR	Cht	Bs(de tabla)	Cst	Ce	ETP
1	14,00	433,9	14,2	0,793	2,5	1,011	0,58	1,011	0,5741	0,85334	1,2238	119,0
2	14,71	411,9	15,3	0,827	2,4	1,000	0,53	1,033	0,5672	0,84840	1,2238	118,3
3	15,24	472,3	15,1	0,820	2,2	0,979	0,63	0,981	0,3522	0,67882	1,2238	100,2
4	15,18	455,4	15,7	0,839	2,1	0,968	0,66	0,959	0,3443	0,67206	1,2238	94,5
5	14,63	453,6	13,9	0,784	2,3	0,990	0,66	0,959	0,3409	0,66921	1,2238	89,7
6	14,24	427,2	14,3	0,796	2,4	1,000	0,66	0,959	0,1075	0,45151	1,2238	58,5
7	14,37	445,5	13,6	0,775	2,5	1,011	0,64	0,974	0,2465	0,58517	1,2238	78,9
8	14,82	459,5	14,4	0,799	1,9	0,945	0,67	0,951	0,3147	0,64641	1,2238	84,6
9	15,08	452,5	13,9	0,784	2,4	1,000	0,66	0,959	0,3388	0,66740	1,2238	90,1
10	14,84	460,1	14,2	0,793	2,2	0,979	0,66	0,959	0,3437	0,67161	1,2238	91,3
11	14,19	425,6	15,4	0,830	2,2	0,979	0,58	1,011	0,4958	0,79522	1,2238	110,2
12	13,76	426,5	14,7	0,808	2,0	0,957	0,66	0,959	0,4975	0,79656	1,2238	99,9

Los cálculos de la ETo mensual por este método aparecen en el anexo 3.

3.2.2.3 Método de Linacre

$$Et = \frac{[500T_m/(100 - A)] + 15(T - T_d)}{80 - T}$$

Donde:

Et = evapotranspiración con un buen suministro de agua y un albedo de 0,25, en mm/día

Tm = T+0,006h (o sea, equivalente al nivel del mar)

h = elevación sobre el nivel del mar, en metros

Td = punto de rocío promedio, en °C

A = latitud del lugar (expresados los minutos en décimas)

T = temperatura media del aire, en °C

Cuando no se posee información sobre el punto de rocío, entonces el término (T - Td) se determina así:

$$(T - Td) = 0,0023h + 0,37T + 0,53R + 0,35R \text{ año} - 10,9$$

Donde:

R = rango medio diario de temperatura

R año = diferencia entre las temperaturas medias del mes más cálido y el mes más frío

Tabla 18. Cálculo de la ETo. Método de Linacre

Estación	Checua
Municipio	Nemocón
Departamento	C/marca
Elevación (msnm)	2580
Latitud (°,dec)	5,1
Longitud °,dec)	73,9

Mes	Tmedia	h(altura)	Tm (n.mar)	Td(P. Rocío)	A (latitud)	ETP(diaria)	ETP(mensual)
1	14,2	2580	29,7	6,29	5,10	4,18	129,6
2	15,3	2580	30,8	6,70	5,10	4,50	139,5
3	15,1	2580	30,6	6,62	5,10	4,44	137,7
4	15,7	2580	31,2	6,84	5,10	4,62	143,3
5	13,9	2580	29,4	6,18	5,10	4,09	126,9
6	14,3	2580	29,8	6,33	5,10	4,21	130,5
7	13,6	2580	29,1	6,07	5,10	4,01	124,3
8	14,4	2580	29,9	6,36	5,10	4,24	131,4
9	13,9	2580	29,4	6,18	5,10	4,09	126,9
10	14,2	2580	29,7	6,29	5,10	4,18	129,6
11	15,4	2580	30,9	6,73	5,10	4,53	140,5
12	14,7	2580	30,2	6,47	5,10	4,32	134,1
ETPanual							1594,2

Los cálculos de la ETo mensual por este método aparecen en el anexo 4.

3.2.2.4 Método de Turc (Turc, 1961)

Cuando la humedad relativa media mensual es inferior al 50 %.

$$ETP = K \left[\frac{T}{T + 15} \right] (RG + 50) \left(\frac{1 + 50 - HR}{70} \right)$$

Cuando la humedad relativa media mensual es superior al 50 %

$$ETP = K \left[\frac{T}{T + 15} \right] (RG + 50)$$

Donde:

ETP = evapotranspiración potencial mensual, en mm

K = 0,40 para los meses de 30 y 31 días

K = 0,37 para el mes de febrero

K = 0,13 para un periodo de 10 días

T = temperatura media mensual, en °C

RG = radiación global, en cal/cm²/día

Cuando no se dispone de la información de radiación global, esta puede calcularse por la fórmula de Angstrom modificada:

$$RG = RA \left[a + b \frac{n}{N} \right]$$

Donde:

RG = radiación, en cal/cm²/día

RA = radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera (radiación extraterrestre)

n = número real de horas de insolación, en horas y décimas

N = duración de la insolación posible desde el punto de vista astronómico (horas)

a y b = coeficiente de regresión, utilizados así: a + b

Para zonas frías y templadas: 0,18 + 0,55

Para zonas tropicales secas: 0,25 + 0,45

Para zonas tropicales húmedas: 0,29 + 0,42

Tabla 19. Cálculo de la ETo. Método de Turc

Estación	Checua
Municipio	Nemocón
Departamento	C/marca
Elevación (msnm)	2580
Latitud (°,dec)	5,1
Longitud °,dec)	73,9

Mes	Tmedia	K (tabla)	RA(tabla)	a (tabla)	b (tabla)	n	N(tabla)	n/N	RG	ETP
1	14,2	0,4	14,00	0,25	0,45	6,8	11,8	0,57	419,8	91,4
2	15,3	0,37	14,71	0,25	0,45	6,8	11,8	0,57	440,4	91,6
3	15,1	0,4	15,24	0,25	0,45	4,2	11,8	0,36	369,6	84,2
4	15,7	0,4	15,18	0,25	0,45	4,2	11,8	0,36	367,3	85,4
5	13,9	0,4	14,63	0,25	0,45	4,2	11,8	0,36	353,9	77,7
6	14,3	0,4	14,24	0,25	0,45	1,3	11,8	0,11	252,8	59,1
7	13,6	0,4	14,37	0,25	0,45	3,0	11,8	0,26	310,0	68,5
8	14,4	0,4	14,82	0,25	0,45	3,9	11,8	0,33	347,7	77,9
9	13,9	0,4	15,08	0,25	0,45	4,1	11,8	0,35	361,6	79,2
10	14,2	0,4	14,84	0,25	0,45	4,2	11,8	0,36	359,0	79,6
11	15,4	0,4	14,19	0,25	0,45	5,9	11,8	0,50	397,6	90,7
12	14,7	0,4	13,76	0,25	0,45	5,9	11,8	0,50	384,6	86,1
ETPanual										971,3

Los cálculos de la ETo mensual por este método aparecen en el anexo 5.

3.2.2.5 Método de Hargreaves (Hargreaves, 1983)

$$ETP = 0,0023 * (Tmed + 17,78) * Ro * (Tmáx - Tmín) * 0,5$$

Donde:

Tmed: temperatura media

Ro: radiación en el tope de la atmósfera

Tmáx: temperatura máxima

Tmín: temperatura mínima

Tabla 20. Cálculo de la ETo. Método de Hargreaves

Estación	Apto El Caraño
Municipio	Quibdó
Departamento	Chocó
Elevación (msnm)	53
Latitud (°,dec)	5,69
Longitud °,dec)	76,64

Mes	TMED	Ro	tmax	tmin	(tmax-tmin)	(tmax-tmi)**0,5	ETPdia	ETPmes
1	27,7	14,00	32,1	23,2	8,9	2,983	4,36	135,2
2	27,0	14,71	31	22,9	8,1	2,846	4,31	120,6
3	27,5	15,24	31,9	23,1	8,8	2,966	4,71	145,9
4	27,7	15,18	32,5	22,8	9,7	3,114	4,94	148,2
5	27,8	14,63	32,3	23,2	9,1	3,017	4,62	143,3
6	27,6	14,24	31,8	23,4	8,4	2,898	4,31	129,2
7	27,5	14,37	31,5	23,5	8,0	2,828	4,23	131,2
8	27,0	14,82	31,1	22,8	8,3	2,881	4,39	136,2
9	27,4	15,08	32,2	22,5	9,7	3,114	4,88	146,3
10	27,2	14,84	31,7	22,7	9,0	3,000	4,61	142,8
11	27,0	14,19	30,9	23	7,9	2,811	4,10	123,1
12	27,1	13,76	31,1	23,1	8,0	2,828	4,02	124,5
ETPanual								1626,6

Los cálculos de la ETo mensual por este método aparecen en el anexo 6.

3.3 Procedimiento de cálculo

Debido a la complejidad y volumen de los cálculos, se implementó una rutina computacional en lenguaje Python llamada Evapotrans. Las variables de entrada son los datos diarios registrados en las estaciones climatológicas del Ideam. La aplicación consta de tres componentes: la base de datos, el módulo de funcionalidades y la interfaz gráfica con la que se espacializan los resultados.

El componente de base de datos contiene todos los archivos SQL necesarios para crear la base de datos en el motor de base de datos PostgreSQL. El componente de funcionalidades comprende todas las instrucciones necesarias para ejecutar el código SQL, importar y exportar archivos y la ejecución de la aplicación, con las fórmulas para el cálculo por los diferentes métodos.

La interfaz gráfica se compone de las ventanas controles y botones que permiten la interacción del usuario con la base de datos y la obtención de mapas.



Gráfica 1. Estructura del aplicativo Evapotrans

3.4 Selección del método más apropiado por zona pluviométrica

Para seleccionar el método que mejor se ajustaba al comportamiento de la variable, se agruparon las estaciones de acuerdo con las zonas pluviométricas definidas por el Ideam en el *Atlas Climatológico*; luego se hicieron comparaciones entre los cálculos obtenidos y las mediciones del tanque evaporímetro y se escogió la fórmula que más se acercaba en términos de volumen y distribución temporal de la variable.

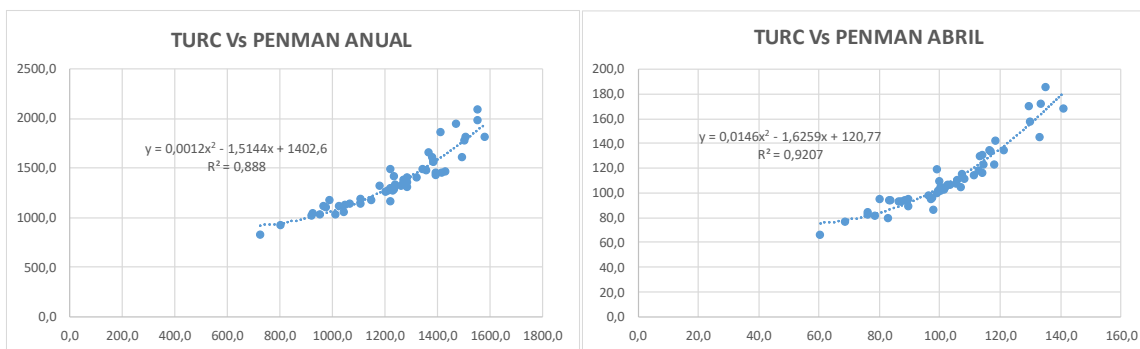
Seguidamente, se compararon las curvas mensuales de la evaporación y de la ETo calculada por cada método. Se adoptaron dos criterios para la selección: la tendencia y el valor absoluto de los promedios multianuales. Por tendencia se entiende que las curvas sean semejantes en cuanto a la ocurrencia de los valores máximos y mínimos durante el año; el valor absoluto significa que la diferencia entre los valores mensuales de la ETo considerada y los de la evaporación, sean lo más cercano posible a 0. Este análisis se desarrolló con los resultados obtenidos en la escala mensual. Finalmente, con el método seleccionado, se hicieron los cálculos en la escala decadiaria.

3.5 Espacialización de la ETo y generación de puntos de control en zonas no instrumentadas

Uno de los objetivos del presente estudio consistió en identificar los métodos empíricos que mejor reflejaran las condiciones reales de la evapotranspiración en las zonas pluviométricas, para posteriormente, con este criterio de ajuste, aplicar las respectivas constantes a las fórmulas menos exigentes en información de entrada, para así calcular la ETo en el mayor número de estaciones en el país, brindando un mejor cubrimiento y, en consecuencia, una representación espacial más ajustada al comportamiento de la variable.

Para tal efecto, se buscaron las ecuaciones de ajuste de cada método con respecto al método de Penman-Monteith. Una vez calculadas estas ecuaciones, se evaluó el método con mejor correlación y que a su vez utilizara el menor número de variables medidas en la mayor cantidad de estaciones de registro del Ideam.

Se elaboraron regresiones matemáticas entre los resultados obtenidos por el aplicativo informático en la escala mensual, anual y multianual, con los resultados obtenidos por Thorthwaite, Christiansen, Blaney-Criddle, Linacre, Turc, Hargreaves versus Penman-Monteith, de las cuales se analizaron las gráficas, fórmulas y los coeficientes de regresión. A manera de ejemplo, se muestra la ecuación de regresión aplicada para el método de Turc versus Penman-Monteith.



Gráfica 2. Regresión de la ecuación de Turc versus Penman-Monteith

Se procedió a generar nuevos puntos de estimación con base en la ETo obtenida mediante el método de Penman, con la cual se había hecho el cálculo para 61 estaciones con información confiable sobre las variables requeridas. A través de los coeficientes de ajuste dados por las regresiones se obtuvieron 141 puntos derivados de la fórmula de Turc, la que mejor ajuste presentó, ya que incorpora de igual manera un buen número de variables, como la temperatura media, la humedad relativa y la radiación.

Sin embargo, continuaba siendo insuficiente el número de puntos para representar el comportamiento de la variable en la escala nacional, por lo que se optó por la fórmula FAO-Penman-Monteith y el procedimiento de cálculo sugerido en caso de datos faltantes, empleando los registros de las estaciones climatológicas ordinarias, que cuentan con datos de temperatura del aire, lo que aumentó el número de puntos de control a 419, cubriendo el país de manera representativa. Para las demás zonas, se acudió a correlaciones con la altura, que arrojaran coeficientes significativos.

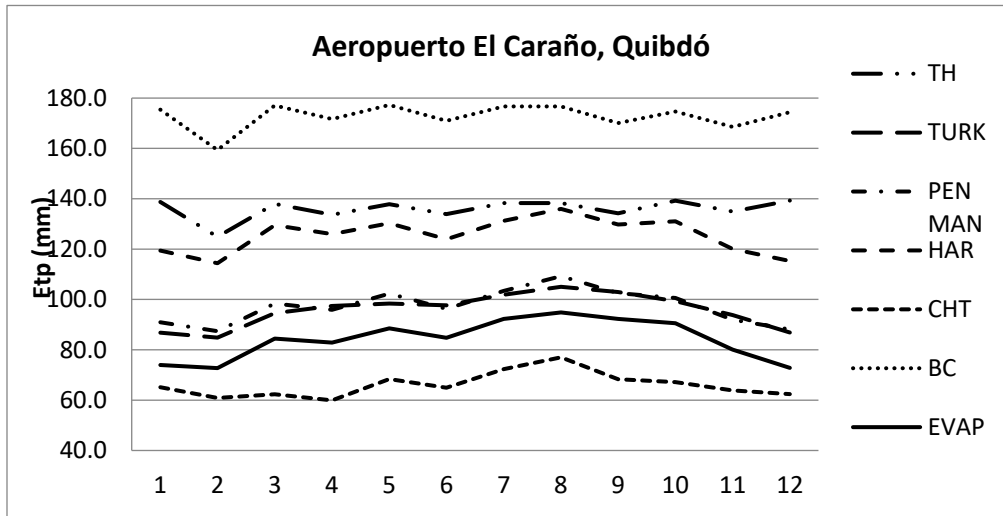
4. Análisis de resultados

4.1 Selección del método más apropiado para cada zona pluviométrica analizada

Los resultados obtenidos por zona pluviométrica fueron los siguientes:

4.1.1 Zona pluviométrica Pacífico Norte y Central

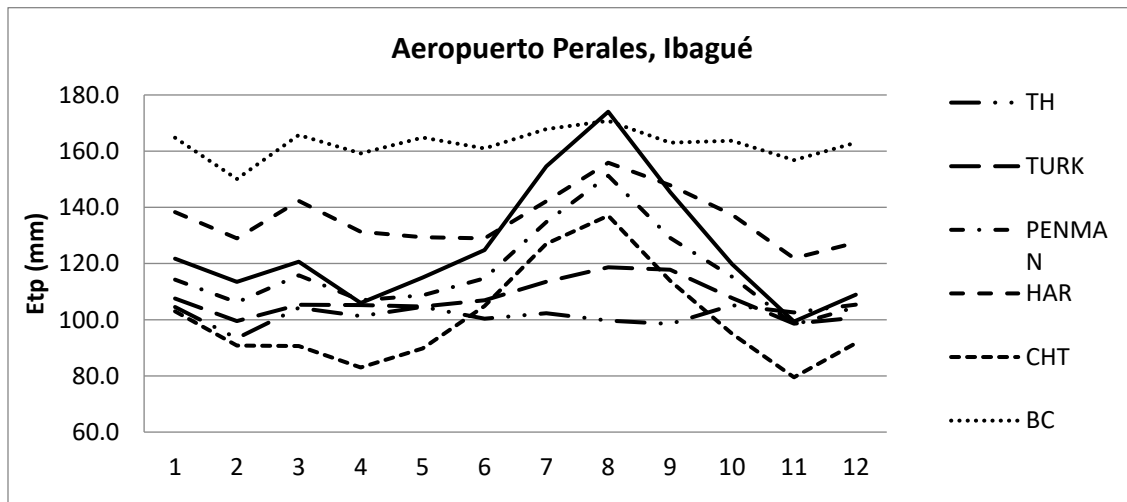
En esta zona pluviométrica se observó que los métodos de Turc y Penman-Monteith se pueden aplicar con buena resolución (gráfica 3, anexos 2 al 8).



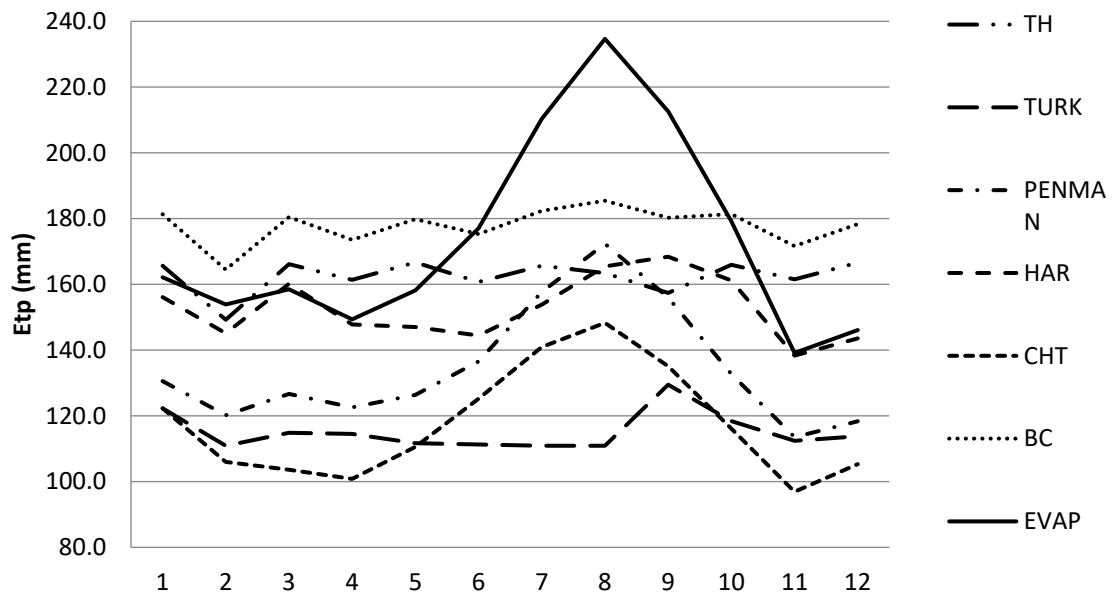
Gráfica 3. Zona pluviométrica Pacífico Norte y Central

4.1.2 Zona pluviométrica Alto Magdalena y Alto Cauca

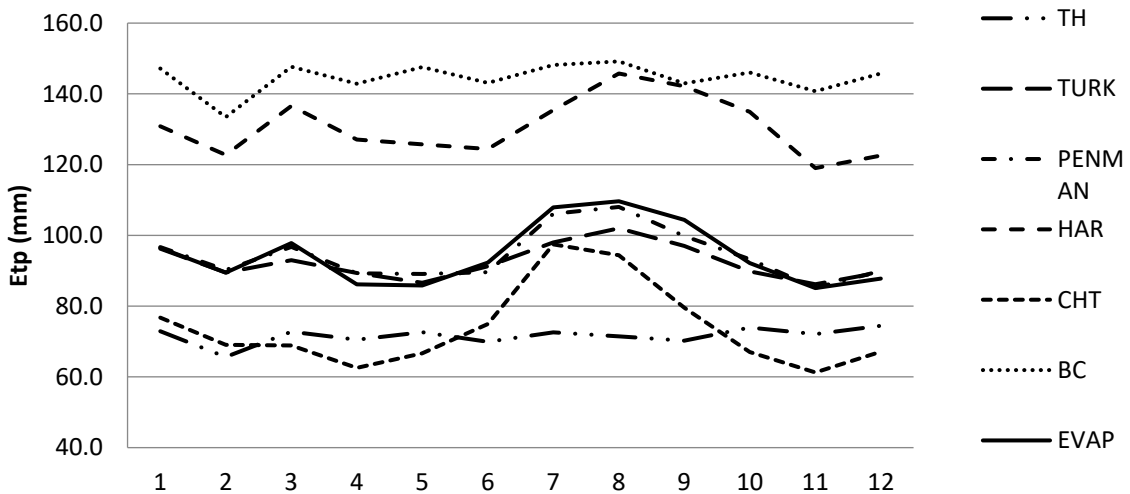
En buena parte de esta zona se establece que el mejor método es el de Penman-Monteith; sin embargo, en ciertos sectores, el método de Hargreaves puede ser igualmente preciso (gráfica 4, anexos 2 al 8).

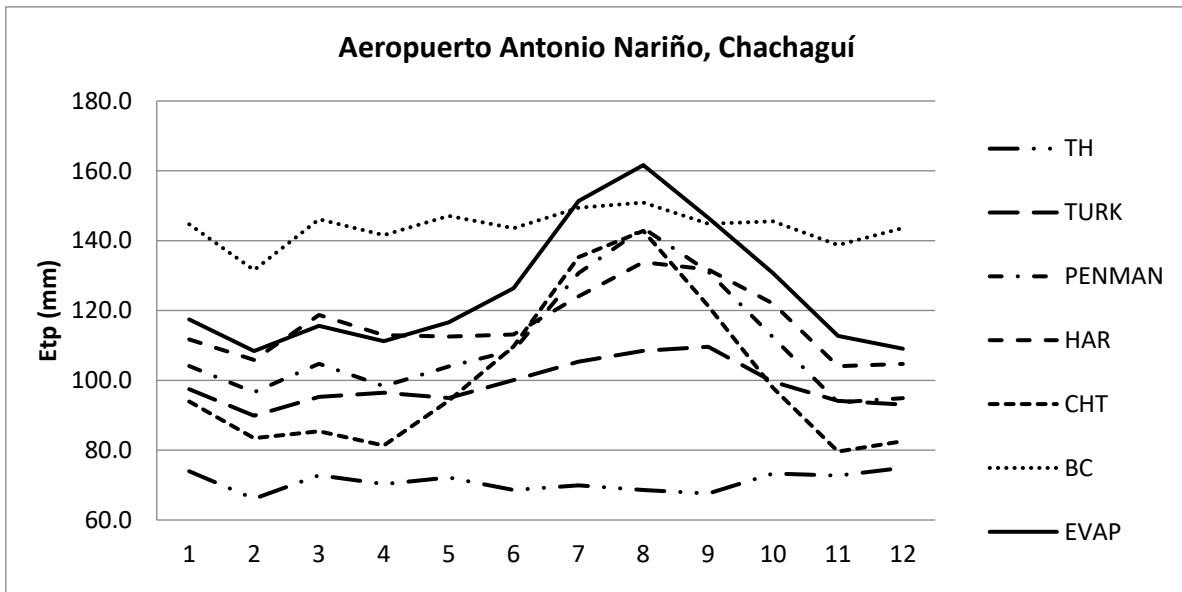
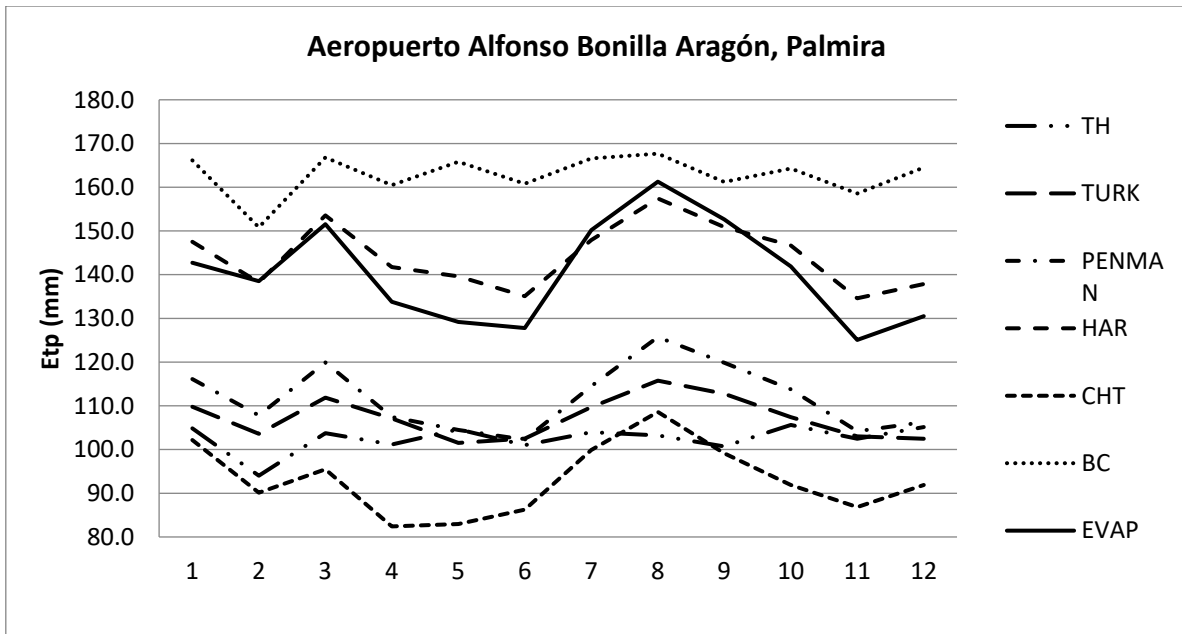


Aeropuerto Benito Salas Vargas, Neiva



Aeropuerto Guillermo León Valencia, Popayán

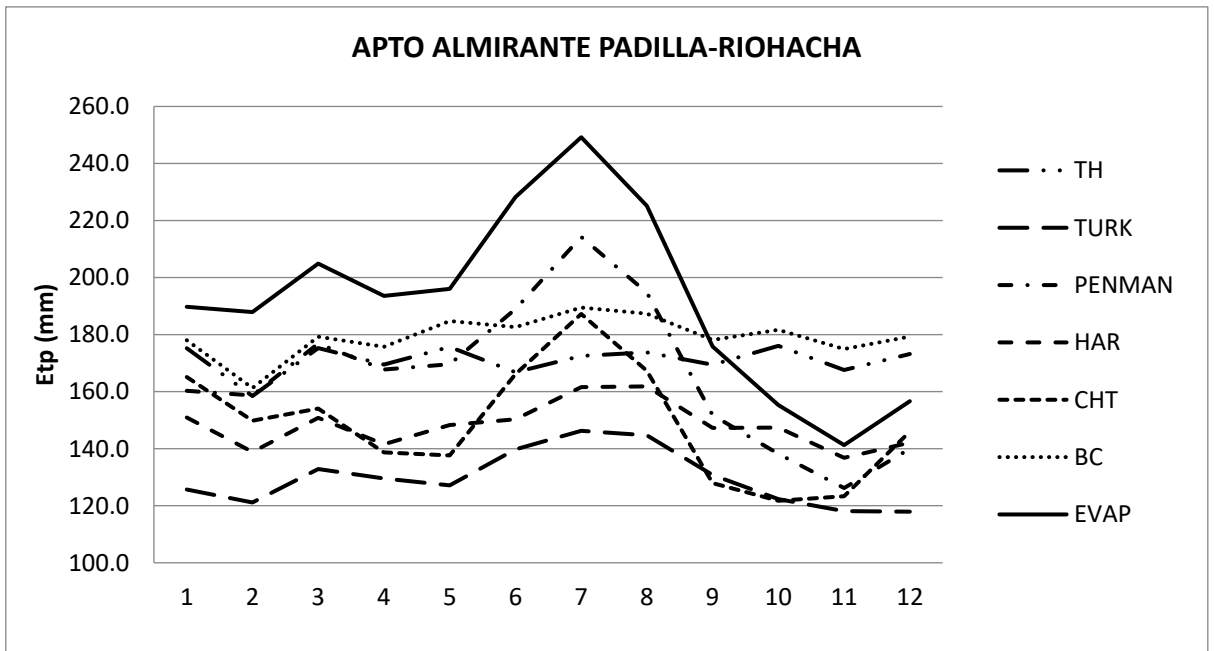
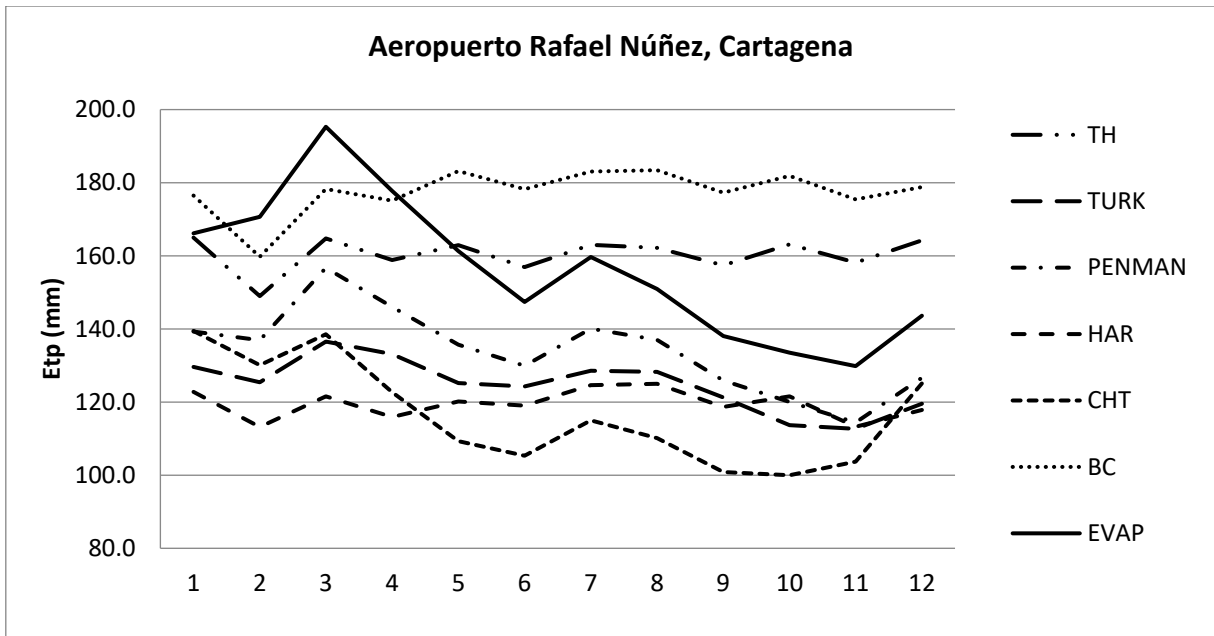


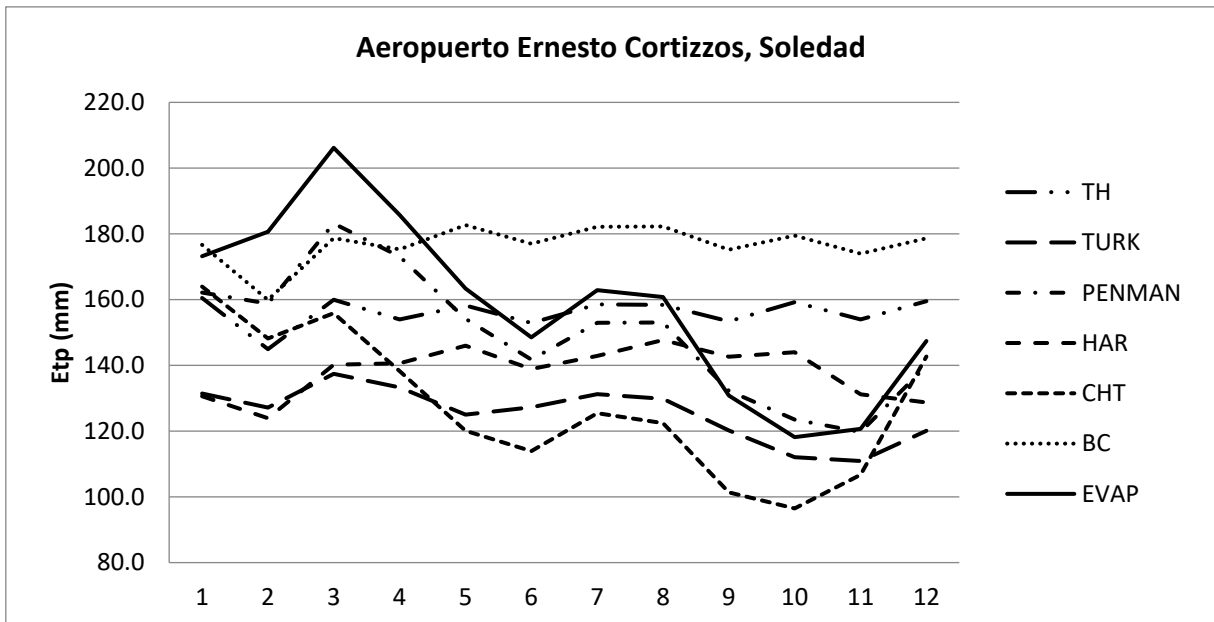
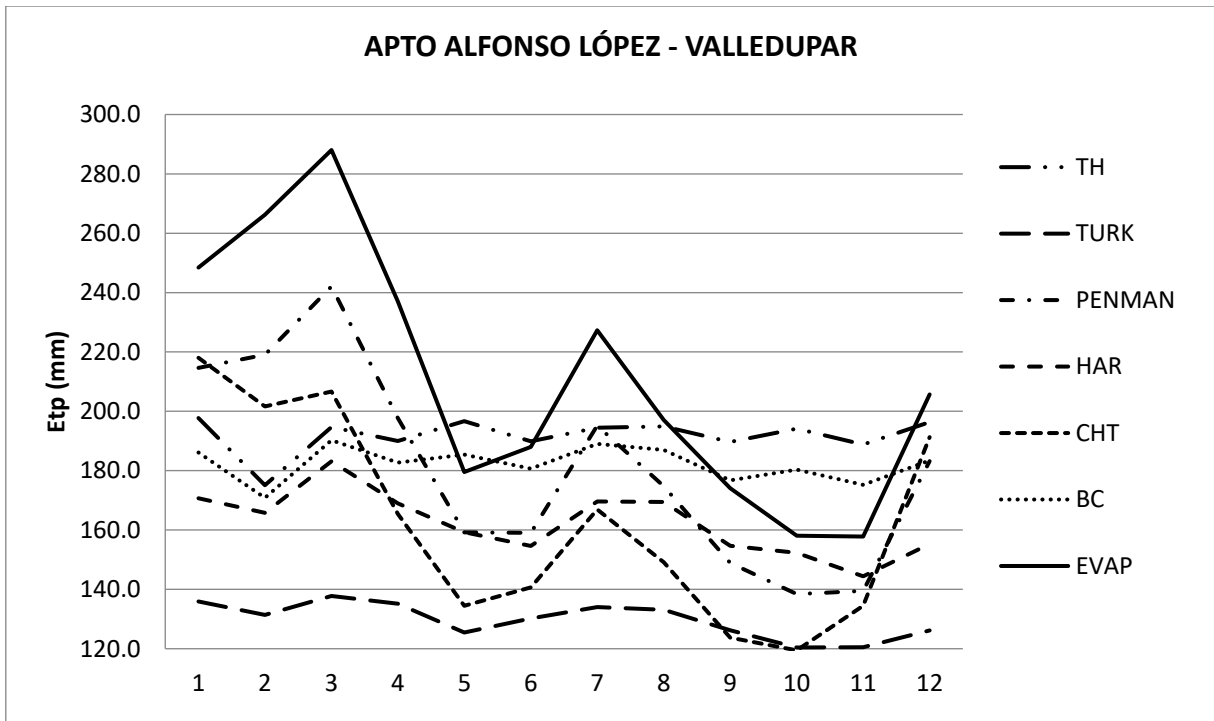


Gráfica 4. Zona pluviométrica Magdalena-Cauca

4.1.3 Zona pluviométrica Caribe-Cesar

Esta zona, enclavada en la región Caribe, se caracteriza por registrar altos valores de evapotranspiración. Se determinó que el método más adecuado para calcular este parámetro es la fórmula de Penman-Monteith (gráfica 5, anexos 2 al 8).

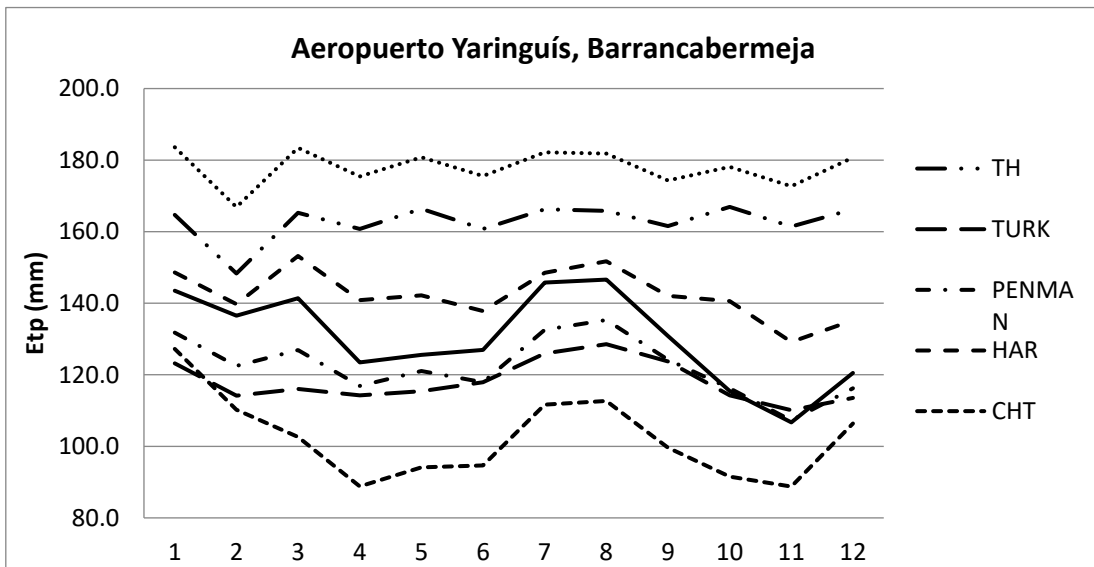
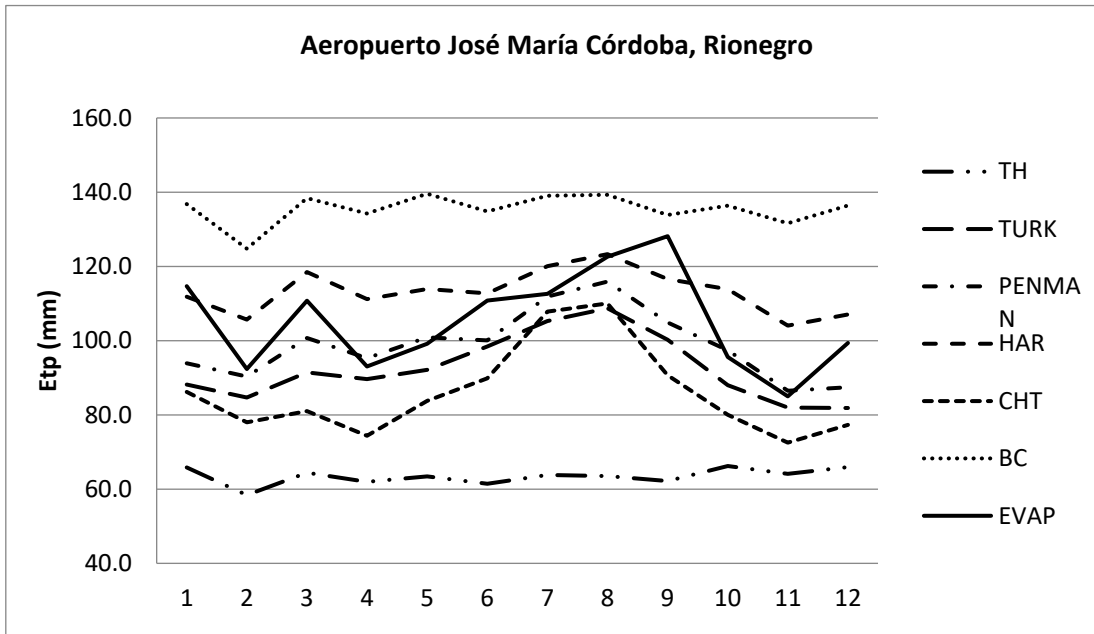


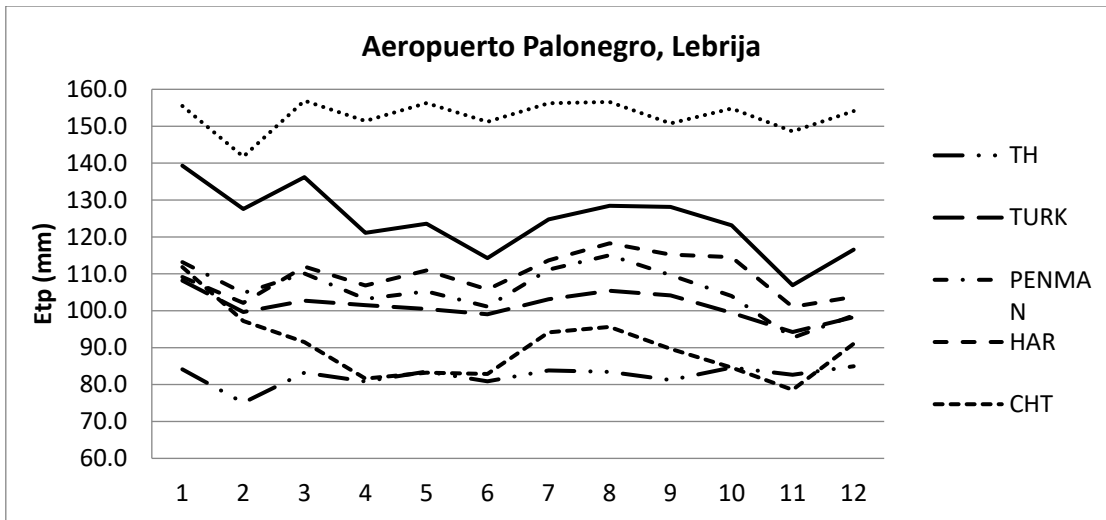


Gráfica 5. Zona pluviométrica Caribe-Cesar

4.1.4 Zona pluviométrica Medio Magdalena y Medio Cauca

Zona conformada por los municipios de Medellín, Rionegro, Lebrija, Barrancabermeja, entre otros. Se pudo establecer que los métodos más recomendables son el de Penman-Monteith y el de Hargreaves (gráfica 6, anexos 2 al 8).

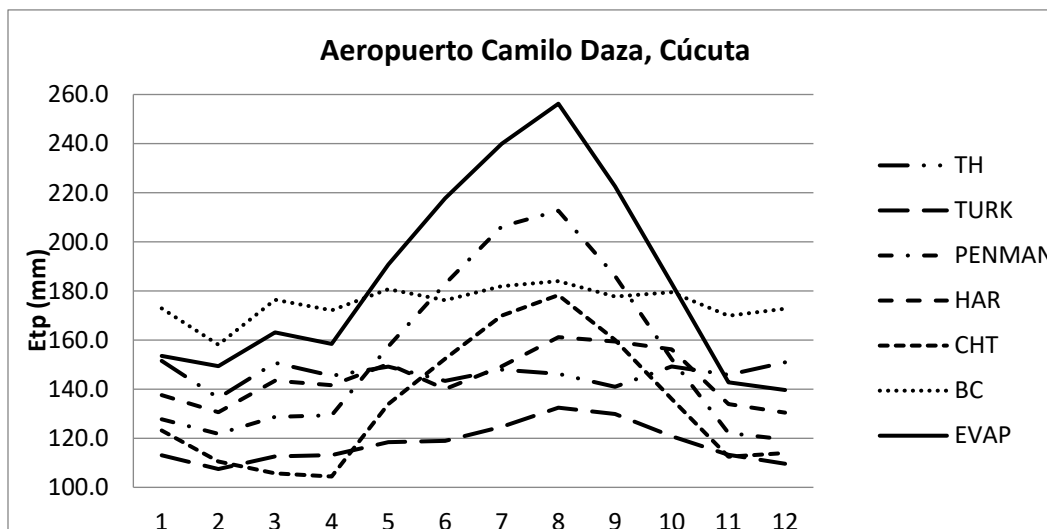




Gráfica 6. Zona pluviométrica Medio Magdalena y Medio Cauca

4.1.5 Zona pluviométrica Catatumbo

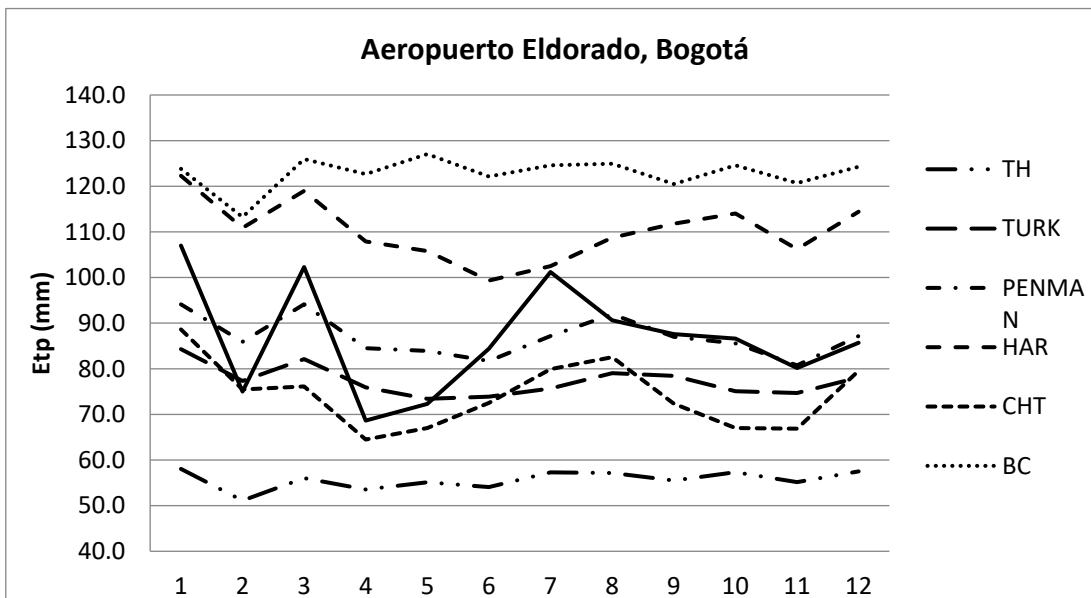
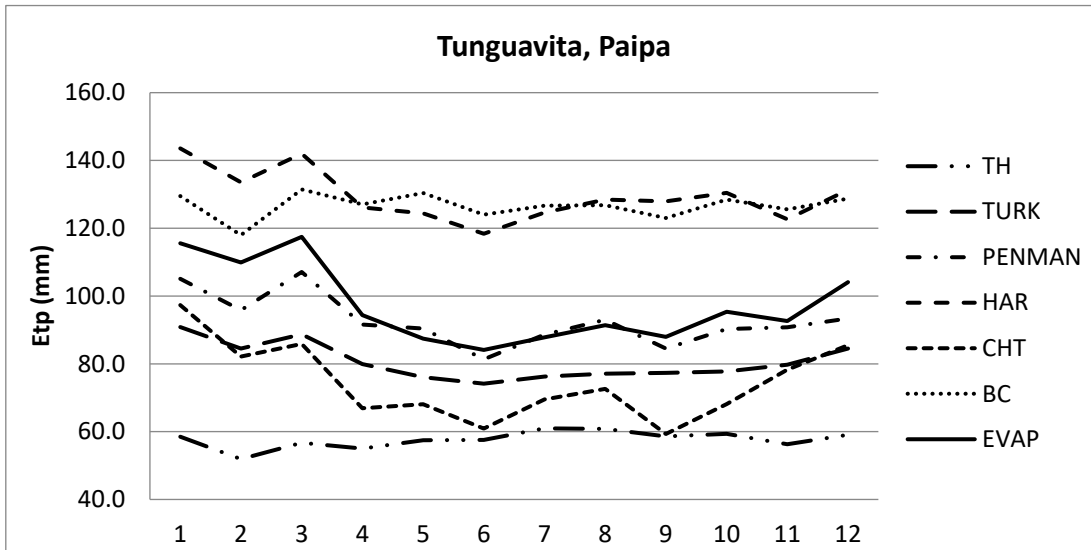
Se pudo establecer que el método de mejor ajuste es el de Penman-Monteith (gráfica 7, anexos 2 al 8).



Gráfica 7. Zona pluviométrica Catatumbo

4.1.6 Zona pluviométrica Sogamoso-Lebrija-Altiplano

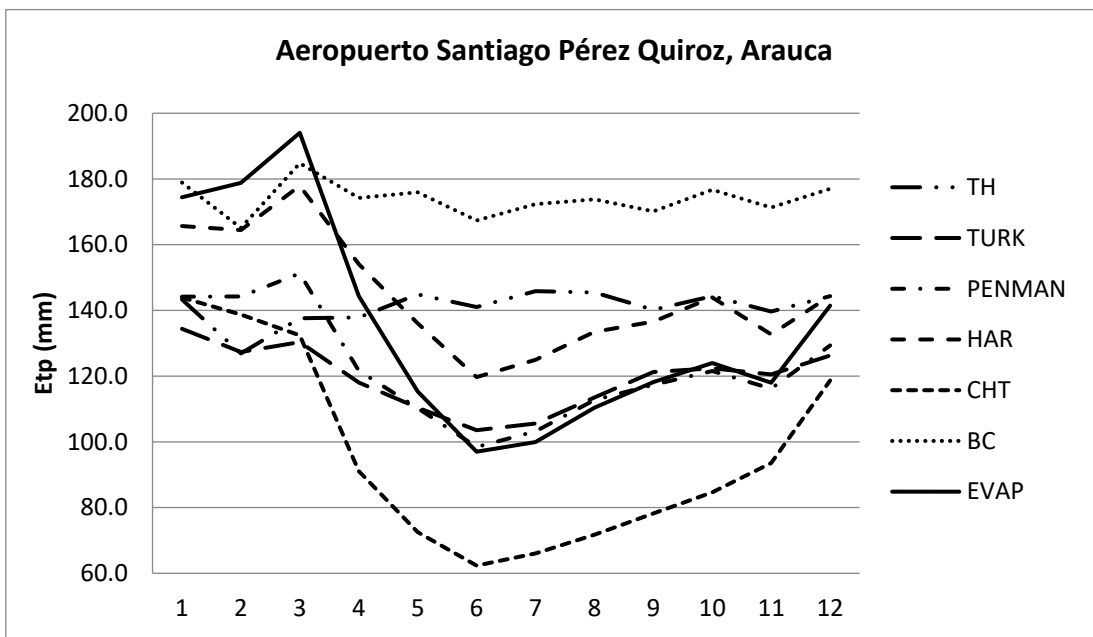
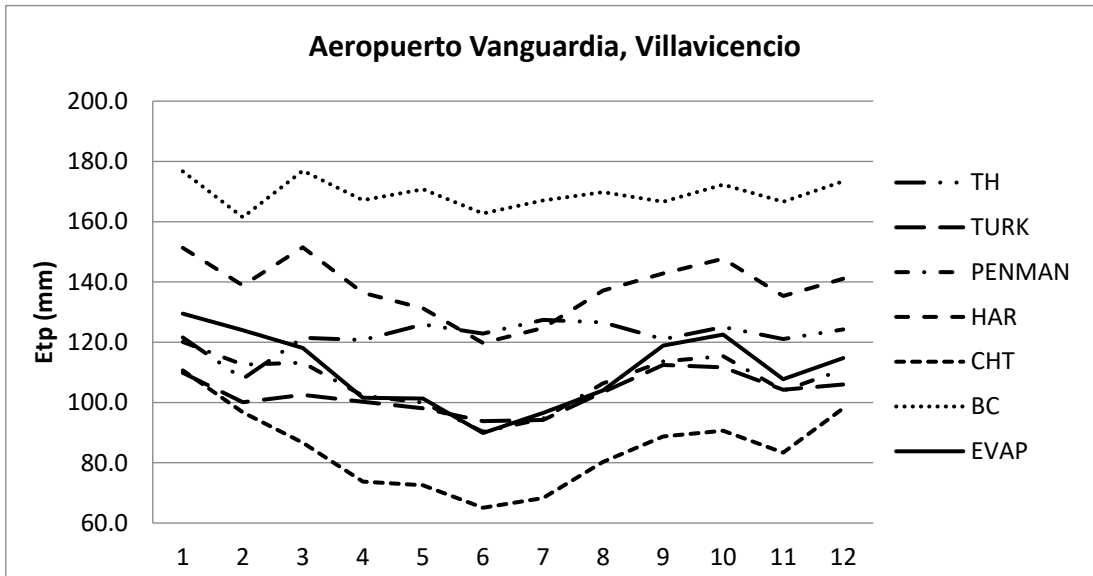
Zona conformada por el altiplano cundiboyacense, la cuenca media-alta del río Sogamoso y parte del departamento de Santander. Se encontró que el método que arroja datos de evapotranspiración más confiables es el de Penman-Monteith (gráfica 8, anexos 2 al 8).



Gráfica 8. Zona pluviométrica Sogamoso-Lebrija-Altiplano

4.1.7 Zona pluviométrica Orinoquia Occidental

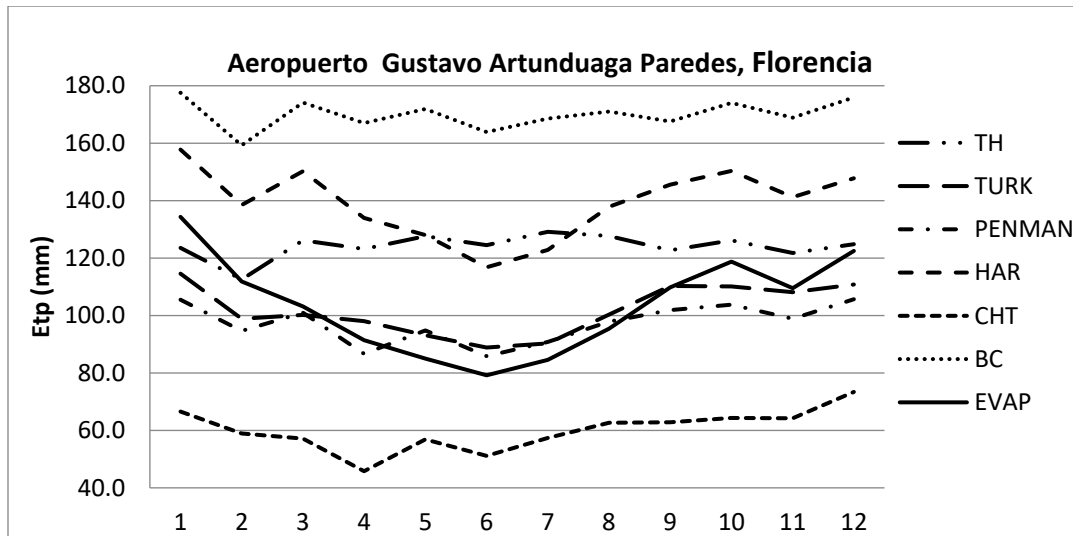
Zona que pertenece a la región de la Orinoquia y está muy cerca del flanco oriental de la cordillera Oriental. Se halló que el método que se puede aplicar con mayor confiabilidad es el de Penman-Monteith (gráfica 9, anexos 2 al 8).



Gráfica 9. Zona pluviométrica Orinoquia Occidental

4.1.8 Zona pluviométrica Piedemonte Amazónico

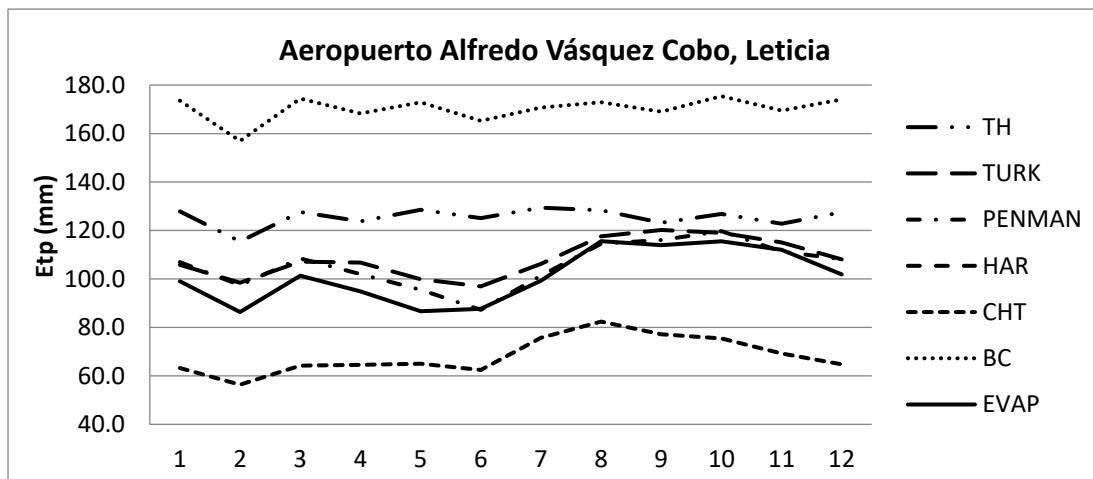
Zona de la Amazonia que está muy cerca de la región de la Orinoquia. Se determinó que el método que se debe aplicar con seguridad es el de Penman-Monteith (gráfica 10, anexos 2 al 8).



Gráfica 10. Zona pluviométrica Norte Amazonia

4.1.9 Zona pluviométrica Trapecio Amazónico

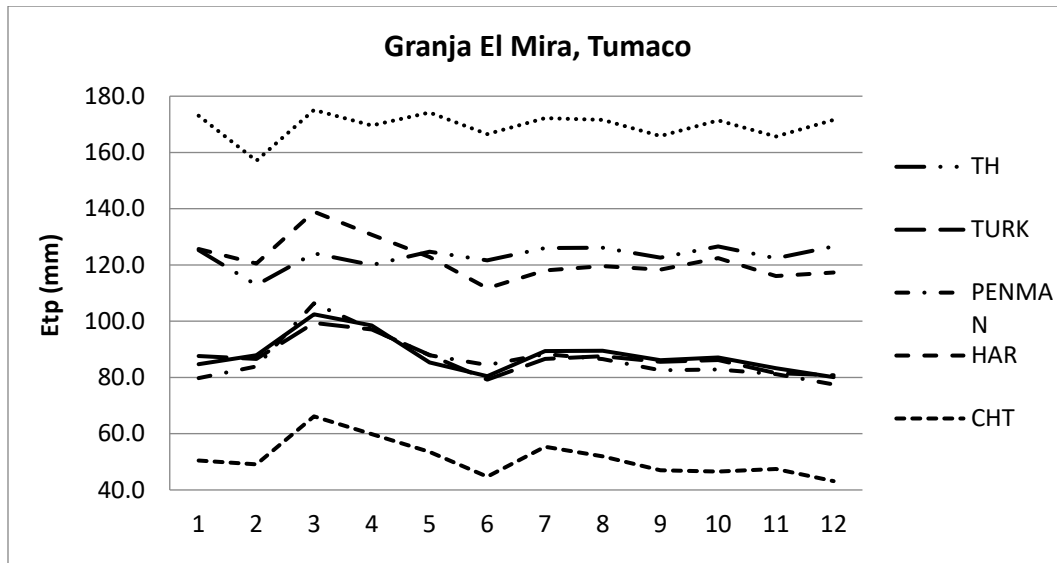
Zona que pertenece al norte de la región de la Amazonia y está en el municipio de Leticia, Se determinó que el método que más se adapta es el de Penman-Monteith (gráfica 11, anexos 2 al 8).



Gráfica 11. Zona pluviométrica Trapecio Amazónico

4.1.10 Zona pluviométrica Patía y Mira

Esta zona, localizada sobre el Pacífico, se caracteriza por precipitación constante a lo largo del año, con volúmenes superiores a los 3.500 mm; igual que en el Pacífico Centro y Norte, hay pocas horas de brillo solar y humedad relativa alta. Con esas condiciones, en la zona Patía y Mira funciona bien el método de Penman-Monteith (gráfica 12, anexos 2 al 8).



Gráfica 12. Zona Pluviométrica Patía y Mira

4.1.11 Fórmula aplicable para Colombia

De acuerdo con lo expuesto, se corroboró que en la gran mayoría de las zonas pluviométricas del país el método que más se aproxima al patrón de comparación tomado como referencia es el método de Penman-Monteith, calculado con la metodología propuesta por la FAO. La ETo obtenida por este procedimiento, conserva prácticamente la misma tendencia de la evaporación medida en el tanque evaporímetro en cuanto a la distribución temporal y es muy cercana a los valores registrados. Se ratifica la recomendación de la FAO para el caso de Colombia, y en lo sucesivo se avala utilizar este método en los estudios e investigaciones que incluyan el cálculo de la ETo y que cuenten con la información requerida.

Finalmente, para cumplir con los objetivos del proyecto se procedió a calcular la ETo por el método de FAO-Penman-Monteith para todo el país, en la escala decadiaria y mensual, y se hicieron las respectivas complementaciones con las demás fórmulas analizadas, de las cuales se seleccionó la ecuación de Turc y se usaron correlaciones con la altura para determinar puntos de control y dar un cubrimiento representativo del comportamiento de la variable en el país. Los resultados aparecen en el anexo 2.

Bibliografía

- Ancco Carita, C. (2010). *Estudio Hidrológico de las Cuencas Huancané y Suches*, vol. 1. Lima, Perú.
- Baldión, J. V. (1985). *La evapotranspiración potencial*. Bogotá: Himat.
- Basto, F. (1982). *Cálculo de la ETP en Espinal (Tolima)*. Ibagué Regional 12: Himat.
- Blaney, H. F. & Criddle, W. D. (1950). *Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data*. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, *Tech. Pap.* 96, 48 pp.
- Castro, M. A. & Guzmán, O. (1985). *Estudio comparativo de fórmulas de ETP en Colombia*. Bogotá: Himat.
- Christiansen, J. (1968). *Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data*. J. J. Irrig. and Drain. Div.
- Dobrea, I. N. (1976). *Evaluación de la ETP en Colombia según método de Thornthwaite*. Bogotá: Himat.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W. O. (1977). *Crop water requirements*. FAO Estudio de Riego y Drenaje, 24. Roma: FAO, 114 pp.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio FAO Riego y Drenaje, 56. Roma: FAO.
- García, J. E. (1984). *Determinación de la ETP en pastos*. Bogotá: ICA-Himat.
- Goyal, M. R. (1990). *Manejo de Riego por Goteo*. San Juan: Universidad de Puerto Rico.
- Grassi, C. (1978). *Aspectos metodológicos para la determinación experimental de la ETP y la frecuencia de riego*. Mérida, Venezuela: Cidiat.
- Hargreaves, G. H. (1983). Discussion of application of Penman wind function by Cuenca, R. H., M. J.J. Nicholson. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 109(2), 277-278. Hargreaves, G. H., Samani (1985).
- Hurtado, G. (2000). *La ETP en Colombia*. Bogotá: Ideam.
- Lasso, L. (1987). *La ETP del territorio colombiano estimada por el método de Penman*. Bogotá: Himat.
- Marín, V. V. (2010). <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis369.pdf>.
- Miliarium, A. (2004). http://www.miliarium.com/Proyectos/EstudiosHidrogeologicos/Anejos/Metodos_Determinacion_Evapotranspiracion/Metodos_Empiricos/MetodosEmpiricos.asp#Thornthwaite.
- Montealegre, F. (1995). *Determinación de la ET real en soya y evaluación de fórmulas de ETP en Palmira*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.
- Norero, A. (1976). *La evapotranspiración potencial de los cultivos: aspectos agrofísicos*. Mérida, Venezuela: Cidiat.
- Penman, H. L. (April 22 1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193 (1032), 120-145
- Sánchez, S. R. (2011). <http://hidrologia.usal.es/practicas/ET>.
- Thornthwaite, C. W. (Jan. 1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate *Geographical Review* 38 (1), 55-94
- Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. *Ann. Agron.*

ANEXOS

Anexo 1. Listado de estaciones meteorológicas

NOMBRE	MUNICIPIO	CORRIENTE	DEPARTAMEN	ALTITUD	LONGITUD	LATITUD
Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	Amazonas	84	-69,9409167000	-4,1938611000
Canasgordas	Canasgordas	Canasgordas	Antioquia	1200	-76,0297222000	6,7580556000
Uniban	Apartado	Zungo	Antioquia	23	-76,6513889000	7,8261111000
Apto Los Cedros	Carepa	Vijagual	Antioquia	19	-76,7178333000	7,8166667000
Arboletes	Arboletes	Qda Seca	Antioquia	4	-76,4227222000	8,8466389000
Alejandria	Alejandria	Nare	Antioquia	1660	-75,1433889000	6,3762778000
Nus Gja Exp El	San Roque	Nus	Antioquia	835	-74,8366667000	6,4858333000
Apto J M Cordova	Rionegro	Rionegro	Antioquia	2073	-75,4258889000	6,1686389000
Vegachi	Vegachi	Volcan	Antioquia	1107	-74,7965833000	6,7741111000
Nacional Gja La	Tamesis	Cartama	Antioquia	1151	-75,6942778000	5,7201667000
Mesopotamia	La Union	Buey	Antioquia	2314	-75,3186389000	5,8863611000
Jardin El	Jardin	San Juan	Antioquia	2005	-75,8005556000	5,5877222000
Sta Isabel	Valdivia	Valdivia	Antioquia	1200	-75,4422778000	7,1572778000
Apto Olaya Herrera	Medellin	Medellin	Antioquia	1490	-75,5889722000	6,2206111000
Tulio Ospina	Bello	Medellin	Antioquia	1438	-75,5525000000	6,3211111000
Aragon	Santa Rosa de Osos	Grande	Antioquia	2600	-75,8270000000	6,5340000000
Salada La	Caldas	Medellin	Antioquia	1680	-75,6246944000	6,0483611000
Apto Arauca	Arauca	Arauca	Arauca	128	-70,7380556000	7,0694444000
Normal Manati	Manati	Cga Guajaro	Atlantico	10	-74,9546389000	10,4535833000
Apto E Cortissoz	Soledad	Magdalena	Atlantico	14	-74,7797778000	10,8833611000
Venado Oro Viviero	Bogota D.C.	Bogota	Bogota D.C.	2725	-74,0615556000	4,5983611000
Apto El Dorado	Bogota D.C.	Bogota	Bogota D.C.	2547	-74,1506667000	4,7055833000
Apto Rafael Nunez	Cartagena	Mar Caribe	Bolivar	2	-75,5160278000	10,4472500000
Sta Rosa D Simiti	Santa Rosa del Sur	Qda Las Mercedes	Bolivar	650	-74,0591667000	7,9652778000
Monterrey Forestal	Zambrano	Magdalena	Bolivar	25	-74,8350000000	9,7352778000
Carmen de Bolivar	El Carmen de Bolivar	Ay Alferéz	Bolivar	152	-75,1064167000	9,7157500000
San Pablo	Maria La Baja	Ay Hondo	Bolivar	20	-75,2586111000	10,0431667000
Buenvista	Buenvista	Qda Negra	Boyaca	2200	-73,9431111000	5,5149167000
Villa Carmen	Samaca	Gachaneca	Boyaca	2600	-73,4957778000	5,5116944000
Villa De Leiva	Villa de Leyva	Qda Tintales	Boyaca	2215	-73,5439444000	5,6558333000
Copa La	Toca	Tuta	Boyaca	2700	-73,2079444000	5,5794444000
Surbata Bonza	Duitama	Surba	Boyaca	2485	-73,0744722000	5,8024444000
U P T C	Tunja	Chulo	Boyaca	2690	-73,3552778000	5,5535556000
Tunguavita	Paipa	Salitre	Boyaca	2470	-73,1163611000	5,7459167000
Chiscas	Chiscas	Chiscano	Boyaca	2350	-72,5047222000	6,5495278000

Boavita	Boavita	Qda Ocalaya	Boyaca	2150	-72,5787778000	6,3261944000
Nuevo Colon	Nuevo Colon	Turmeque	Boyaca	2438	-73,4565000000	5,3538056000
Sutatenza	Sutatenza	Garagoa	Boyaca	1930	-73,4491667000	5,0222778000
Inst Agr Macanal	Macanal	Bata	Boyaca	1300	-73,3166944000	4,9410556000
Rondon	Rondon	Mueche	Boyaca	2120	-73,2036111000	5,3584167000
Apto La Nubia	Manizales	Chinchina	Caldas	2058	-75,4699444000	5,0297500000
Apto G Artunduaga	Florencia	Hacha	Caqueta	244	-75,5595556000	1,5890556000
Valparaiso	Valparaiso	Pescado	Caqueta	270	-75,7044722000	1,1952500000
Araracuara	Solano	Caqueta	Caqueta	150	-72,3819167000	-0,6163611000
Huerta La Grande	Villanueva	Upia	Casanare	255	-72,9173333000	4,6550833000
Aguazul	Aguazul	Unete	Casanare	380	-72,5508890000	5,1793333000
Apto Yopal	Yopal	Cravo Sur	Casanare	325	-72,3875000000	5,3204444000
Modulos	Orocue	Cno San Miguel	Casanare	130	-71,4330556000	4,9104722000
Sta Leticia	Purace	La Plata	Cauca	2085	-76,1639167000	2,2414722000
Gabriel Lopez	Totoro	Palace	Cauca	3000	-76,2890556000	2,5097778000
Venta de Cajibío	Cajibío	Cajibío	Cauca	1850	-76,5618611000	2,5847500000
Apto G L Valencia	Popayan	Cauca	Cauca	1749	-76,6086944000	2,4528889000
Miranda	Miranda	Desbaratado	Cauca	1128	-76,2231111000	3,2455556000
Valencia	San Sebastian	Caqueta	Cauca	2900	-76,6687500000	1,9004167000
Milagros Los	Bolivar	Sambingo	Cauca	2300	-76,8916667000	1,7533333000
Sierra La	La Sierra	Guachicono	Cauca	1870	-76,7503333000	2,1938333000
Gja Exp Univ Narin	Mercaderes	Patia	Cauca	580	-77,1926944000	1,9053889000
Motilonia Codazzi	Agustin Codazzi	Pernambuco	Cesar	180	-73,2528611000	10,0043611000
Callao El	Valledupar	Azucarabuena	Cesar	110	-73,3194444000	10,3630556000
Apto Alfonso Lopez	Valledupar	Guatapuri	Cesar	138	-73,2494444000	10,4394444000
Guaymaral	Valledupar	Garupal	Cesar	50	-73,6475278000	9,9049167000
Apto El Carano	Quibdo	Atrato	Choco	53	-76,6438611000	5,6905556000
Panamericana	Bahia Solano	Pacifico	Choco	4	-77,4044444000	6,2233333000
Doctrina La	Lorica	Sinu	Cordoba	4	-75,8923611000	9,2903333000
Ayapel	Ayapel	Cga Ayapel	Cordoba	22	-75,1645000000	8,2951944000
Planeta Rica	Planeta Rica	Ay El Desorden	Cordoba	90	-75,5837222000	8,3993333000
Tibaitata	Mosquera	Balsillas	Cundinamarca	2543	-74,2090000000	4,6914167000
Mercedes Las	Anapoima	Bogota	Cundinamarca	810	-74,5266111000	4,5818889000
Florida La	Anolaima	Bajamon	Cundinamarca	1915	-74,4376389000	4,7708889000
Silos	Choconta	Sisga	Cundinamarca	2709	-73,7014167000	5,1177222000
Bolsa La	Choachi	Negro	Cundinamarca	3195	-73,9814167000	4,5754167000
Pto Inirida	Inirida	Inirida	Guainia	100	-67,9316944000	3,8676667000
San Jose Guaviare	San Jose del Guaviare	Guaviare	Guaviare	165	-72,6470833000	2,5530278000
Parque Arqueologic	San Agustin	Naranjo	Huila	1800	-76,2949722000	1,8884722000
Zuluaga	Garzon	Loro	Huila	1270	-75,5294444000	2,2525000000

Apto Benito Salas	Neiva	Las Ceibas	Huila	439	-75,2930556000	2,9487500000
Palacio-Vegalarga	Neiva	Fortalecillas	Huila	1100	-75,0665833000	2,9426389000
Sta Maria	Santa Maria	Bache	Huila	1300	-75,5838056000	2,9426389000
Matitas	Riohacha	Tapias	La Guajira	20	-73,0302778000	11,2638889000
Apto A. Padilla	Riohacha	Ay Zongo	La Guajira	4	-72,9176944000	11,5282222000
Mina La	Hatonuevo	Ay Tabaco	La Guajira	80	-72,6159444000	11,1375833000
Manaure	Manaure	Mar Caribe	La Guajira	1	-72,4801667000	11,7810556000
Pto Bolivar	Uribia	Mar Caribe	La Guajira	10	-71,9995556000	12,2243056000
Urumita	Urumita	Nacho	La Guajira	255	-73,0087778000	10,5598611000
Apto Simon Bolivar	Santa Marta	Mar Caribe	Magdalena	4	-74,2288889000	11,1283333000
San Lorenzo	Santa Marta	Piedra	Magdalena	2200	-74,0336111000	11,0800000000
Macarena La	La Macarena	Guayabero	Meta	350	-73,7933333000	2,1761111000
Holanda La	Granada	Ariari	Meta	360	-73,7160278000	3,5163333000
Mesetas	Mesetas	Guejar	Meta	620	-74,0429722000	3,3800556000
Libertad La	Villavicencio	Negro	Meta	336	-73,4679167000	4,0573611000
Apto Vanguardia	Villavicencio	Guatiquia	Meta	423	-73,6205000000	4,1634444000
Unillanos	Villavicencio	Guatiquia	Meta	340	-73,5820000000	4,0767222000
Cabana La Hda	Cumaral	Guacavia	Meta	305	-73,3575000000	4,3004444000
Guacaramo	Barranca de Upia	Upia	Meta	190	-72,9535833000	4,4686667000
Encano El	Pasto	Guamues	Narino	2830	-77,1614722000	1,1599444000
Granja El Mira	Tumaco	Caunapi	Narino	16	-78,6955833000	1,5501944000
Apto Antonio Narino	Chachagui	Pasto	Narino	1816	-77,2908611000	1,3940833000
San Bernardo	San Bernardo	Juanambu	Narino	2190	-77,0326111000	1,5387222000
Apto San Luis	Aldana	Guaitara	Narino	2961	-77,6777500000	0,8570833000
Paraiso El	Tuquerres	Guaitara	Narino	3120	-77,6368889000	1,0706111000
Bombona	Consaca	Guaitara	Narino	1493	-77,4651111000	1,1843611000
Botana	Pasto	Ay Botanilla	Narino	2820	-77,2788056000	1,1600000000
Apto Camilo Daza	Cucuta	Pamplonita	Norte de Santander	250	-72,5091667000	7,9302778000
Iser Pamplona	Pamplona	Pamplonita	Norte de Santander	2340	-72,6450000000	7,3731111000
Carmen de Tonchala	Cucuta	Qda Tonchala	Norte de Santander	285	-72,5661111000	7,8488889000
Cinera-Villa Olga	Cucuta	Qda La Floresta	Norte de Santander	100	-72,4686111000	8,1677778000
Playa La	La Playa	Algodonal	Norte de Santander	1500	-73,2350000000	8,2175000000
Univ Fco P Santand	Ocana	Algdonal	Norte de Santander	1150	-73,3222222000	8,2377778000
Esc Agr Cachira	Cachira	Cachira	Norte de Santander	1882	-73,0516667000	7,7352778000
Villagarzon	Villagarzon	Mocoa	Putumayo	440	-76,6192500000	1,0342500000
Mocoa Acueducto	Mocoa	Caqueta	Putumayo	650	-76,6518333000	1,1573333000
Michoacan	Colon	Putumayo	Putumayo	2100	-76,8836111000	1,1789167000
Apto El Eden	Armenia	Quindio	Quindio	1229	-75,7663889000	4,4546667000
Apto Matecana	Pereira	Otun	Risaralda	1342	-75,7338611000	4,8158611000
Bohemia La	Pereira	Cauca	Risaralda	970	-75,8775833000	4,8779444000

Apto Sesquicentena	San Andres	Mar Caribe	San Andres	1	-81,7038889000	12,5869444000
Apto El Embrujo	Providencia	Mar Caribe	San Andres	1	-81,3500000000	13,3500000000
Albania	Albania	Qda Canutillo	Santander	1690	-73,9133333000	5,7583333000
Cimitarra	Cimitarra	Qda Toraba	Santander	300	-73,9522222000	6,3086111000
Apto Yariguies	Barrancabermeja	Magdalena	Santander	126	-73,8086111000	7,0263889000
Villa Leiva	Sabana de Torres	Qda Stos Gutierrez	Santander	328	-73,5372222000	7,4561111000
Apto Palonegro	Lebrija	De Oro	Santander	1189	-73,1845278000	7,1214722000
Cucharo El	Pinchote	Fonce	Santander	975	-73,1991667000	6,5322222000
Esc Agr Mogotes	Mogotes	Mogoticos	Santander	1673	-72,9688889000	6,4700000000
Charala	Charala	Pienta	Santander	1350	-73,1505556000	6,2741667000
Capitanejo	Capitanejo	Chicamocha	Santander	1160	-72,6932222000	6,5177222000
Berlin	Tona	Jordan	Santander	3214	-72,8686111000	7,1869444000
Apto Rafael Barvo	Corozal	Corozal	Sucre	166	-75,2830556000	9,3338889000
San Benito Abad	San Benito Abad	Cga de Machado	Sucre	20	-75,0363889000	8,9352778000
Majagual	Majagual	Cano Mojana	Sucre	22	-74,6355556000	8,5428333000
Unisucre Automatica	Sampues	Ay Canoas	Sucre	160	-75,4022222000	9,2116667000
Anchique	Natagaima	Anchique	Tolima	415	-75,1090000000	3,5738333000
Pst De Monta	Prado	Prado	Tolima	349	-74,9169444000	3,7876389000
Guamo	Guamo	Luisa	Tolima	360	-74,9813333000	4,0089444000
Apto Santiago Vila	Flandes	Magdalena	Tolima	286	-74,7984444000	4,2776111000
Apto Perales	Ibague	Opia	Tolima	928	-75,1484167000	4,4301111000
Univ del Valle	Cali	Melendez	Valle del Cauca	985	-76,5337778000	3,3780000000
Palmira Ica	Palmira	Palmira	Valle del Cauca	1050	-76,3150278000	3,5133889000
Apto A Bonilla	Palmira	Guachal	Valle del Cauca	961	-76,3855833000	3,5333333000
Ing Riopaila	Zarzal	Cauca	Valle del Cauca	941	-76,0824167000	4,3182222000
Cumbarco	Sevilla	La Vieja	Valle del Cauca	1692	-75,8323611000	4,1850278000

Anexo 2. Resultados de la ETo mensual, método de Penman

Anexo 3. Resultados de la ETo mensual, método de Thorthwaite

Anexo 4. resultados de la ETo mensual, método de Christiansen

Anexo 5. Resultados de la ETo mensual, método de Blaney y Criddle

Anexo 6. Resultados de la ETo mensual, método de Linacre

Anexo 7. Resultados de la ETo mensual, método de Turc

Anexo 8. Resultados de la ETo mensual, método de Hargreaves