

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

**“ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA APLICACIÓN DE
DIVERSOS MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN EN UN MISMO ESCENARIO”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

TANNIA NARCIZA CHÉRREZ CHÉRREZ

GUAYAQUIL – ECUADOR
2015

AGRADECIMIENTO

A Dios y mi familia, al Doctor David Matamoros, al Centro de Agua y Desarrollo Sustentable (CADS).

DEDICATORIA

A DIOS

A MI FAMILIA

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Msc. Ma. Isabel Montoya F.
PRESIDENTE



Ph.D. David Matamoros C.
DIRECTOR DE TESIS



Ph. D. Mijail Arias H.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la

- “ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Tannia Narciza Chérrez Chérrez

RESUMEN

El presente estudio muestra un análisis comparativo de resultados obtenidos de varios métodos utilizados en el cálculo de la evapotranspiración con datos registrados de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la provincia del Guayas y en las provincias adyacentes al límite provincial.

En el capítulo dos se presenta la revisión teórica así como definiciones y generalidades de la evapotranspiración y por supuesto los factores que la afectan. Los métodos utilizados, su definición y ecuaciones también se encuentran en este capítulo, se trata de explicar los datos que se requiere y su procedimiento de cálculo.

El capítulo tres muestra los resultados obtenidos con cada uno de los cuatro métodos utilizados, se realizó un análisis comparativo a fin de establecer que método se puede utilizar en nuestra localidad teniendo en cuenta los datos que las estaciones meteorológicas registran.

La presentación de datos se realiza mediante gráficas y mapas raster, con la ayuda de herramientas de información geográfica (GIS).

El capítulo cuatro presenta el balance hídrico a partir de datos de evapotranspiración evaluados con los métodos Penman, Hargreaves y Thornthwaite, no se evalúa el método de la evaporación ya que presenta gran diferencia respecto de los datos evaluados con el método Penman.

Para la comparación se utilizan como base los datos que dieron como resultado la evaluación del método Penman-Monteith ya que es el único método aceptado y recomendado por la FAO.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE FIGURAS	XVI
INDICE DE ECUACIONES	XIX
SIMBOLOGIA	XXI
ABREVIATURAS	XXII
1 INTRODUCCION	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	3
1.3. Antecedentes del Proyecto	3
1.4. Objetivo General	4
1.5. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Introducción	5
2 REVISION TEORICA	6
2.1 Definiciones y Generalidades sobre la Evapotranspiración	6
2.2 Evaporación.....	8
2.3 Transpiración	9
2.4 Factores que afectan la evapotranspiración	14
2.5 Método de Penman –Monteith FAO	17

2.6	Método de Hargreaves	18
2.7	Método de Thornthwaite	20
2.8	Método usando la Evaporación	21
2.8.1	Tanque evaporímetro	21
2.8.2	Descripción y características del Tanque Clase A.....	22
3	ANÁLISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS	26
3.1	Determinación de Parámetros de Interés	26
3.2	Método Penman-Monteith.....	27
3.2.1	Estaciones climatológicas utilizadas.....	31
3.3	Método de Hargraeves	33
3.3.1	Estaciones climatológicas utilizadas.....	34
3.4	Método de Thornthwaite	35
3.4.1	Estaciones climatológicas utilizadas.....	36
3.5	Método usando la Evaporación	37
3.5.1	Estaciones climatológicas utilizadas.....	38
3.6	Resultados obtenidos usando los diferentes métodos.....	40
3.7	Comparación y Análisis	44
3.8	Elaboración de mapas	54
4	MODELO DE BALANCE HIDRICO	62
4.1.	Datos Utilizados.....	62
4.2.	Modelo Conceptual.....	63

4.3. Determinación de áreas de influencia de cada método de utilizado para la determinación de Evapotranspiración en la provincia del Guayas	65
4.4. Análisis de resultados obtenidos en el Balance Hídrico	75
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1. Conclusiones	77
5.2. Recomendaciones	79

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Factores de conversión para expresar evapotranspiración	12
Tabla II. Tabla de valore de K_p que dependen de velocidad y humedad relativa.....	25
Tabla III. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de velocidad.....	32
Tabla IV. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura	32
Tabla V. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de humedad relativa	32
Tabla VI. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de horas sol	32
Tabla VII. Estaciones utilizadas en el método Penman-Monteith.....	33
Tabla VIII. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura	34
Tabla IX. Estaciones utilizadas en el método Hargreaves	34
Tabla X. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura	36

Tabla XI. Estaciones Utilizadas en el método Thornthwaite	36
Tabla XII. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de evaporación del tanque A.....	39
Tabla XIII. Estaciones utilizadas con el método de evaporación	39
Tabla XIV. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Granja Santa Inés evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.	40
Tabla XV. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Guayaquil Universidad Estatal evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.	41
Tabla XVI. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Ingenio Aztra (La Troncal) evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.	41
Tabla XVII. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Ingenio San Carlos evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.....	42
Tabla XVIII. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Machala UTM evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.....	42

Tabla XIX. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Milagro (Ingenio Valdez) evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.	43
Tabla XX. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Pichilingue evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.....	43
Tabla XXI. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Vinces Inamhi evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.....	44
Tabla XXII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	45
Tabla XXIII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	46
Tabla XXIV. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	47
Tabla XXV. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	48

Tabla XXVI. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	49
Tabla XXVII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	50
Tabla XXVIII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	51
Tabla XXIX. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	52
Tabla XXX. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith	53
Tabla XXXI. Bondad de ajuste del modelo por interpolación IDW y Spline ..	56
Tabla XXXII. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas. Penman-Monteith.....	64
Tabla XXXIII. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas. Hagreaves	64
Tabla XXXIV. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas. Thornthwaite	65

Tabla XXXV. Bondad de ajuste del modelo por interpolación IDW y Spline .	65
Tabla XXXVI: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Penman-Monteith	66
Tabla XXXVII: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Hargreaves	68
Tabla XXXVIII: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Thornthwaite	70
Tabla XXXIX. Método utilizado para modelo zonificado a nivel provincial.....	72
Tabla XL: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas.	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Medida directa de la evapotranspiración (Sánchez, 2010)	11
Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración. (FAO, 2006).....	15
Figura 3. Tanque evaporímetro Clase A. (FAO, 2006).....	24
Figura 4. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Granja Sta. Inés para un período de retorno de 2 años.....	45
Figura 5. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Guayaquil U. Estatal para un período de retorno de 2 años.	46
Figura 6. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Ingenio Aztra para un período de retorno de 2 años.	47
Figura 7. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Ingenio San Carlos para un período de retorno de 2 años.....	48
Figura 8. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Machala UTM para un período de retorno de 2 años.	49

Figura 9. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Milagro para un período de retorno de 2 años.....	50
Figura 10. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Pichilingue para un período de retorno de 2 años.	51
Figura 11. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Vinces Inamhi para un período de retorno de 2 años.	52
Figura 12. Promedio anual de evapotranspiración a nivel provincial	53
Figura 13: Relación entre datos de ET medida y ET interpolada. Spline	56
Figura 14: Relación entre datos de ET medida y ET interpolada. IDW	56
Figura 15. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Penman-Monteith para el mes de abril y un período de retorno de 2 años. ..	58
Figura 16. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Hargreaves para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.	59
Figura 17. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Thornthwaite para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.	60
Figura 18. Mapa provincial de evapotranspiración usando la evaporación para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.....	61
Figura 21: Proporción del balance hídrico provincial	66

Figura 22: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Penman-Monteith.....	67
Figura 23: Proporción del balance hídrico provincial	68
Figura 24: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Hargreaves	69
Figura 25: Proporción del balance hídrico provincial	70
Figura 26: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Thornthwaite	71
Figura 27: Balance Hídrico a nivel de laprovincia del Guayas. Modelo zonificado.....	72
Figura 28: Proporción del balance hídrico provincial	73
Figura 29: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Mapa zonificado.....	74

INDICE DE ECUACIONES

Ec. 1	11
Ec. 2	12
Ec. 3	13
Ec. 4	17
Ec.5	18
Ec. 6	19
Ec. 7	19
Ec. 8	20
Ec. 9	20
Ec. 10	21
Ec. 11	21
Ec. 12	22
Ec. 13	27
Ec. 14	27
Ec. 15	27
Ec. 16	28
Ec. 17	28
Ec. 18	28
Ec. 19	29
Ec. 20	30

Ec. 21	30
Ec. 22	30
Ec. 23	30
Ec. 24	31
Ec. 25	55
Ec. 26	55
Ec. 27	55
Ec. 28	63

SIMBOLOGIA

°C Grados Centígrados

Ha Hectáreas

J Jouls

KPa Kilo Pascal

m metros

mm milímetros

MJ Mega Joules

% Porcentaje

Rs Radiación Solar

S Segundos

ABREVIATURAS

BH	Balance Hídrico
ET	Evapotranspiración
ET _o	Evapotranspiración del cultivo de referencia
FAO	Formento y Aprovechamiento de Aguas
HG	Hargreaves
IDW	Inverse Distance Weighting
INAMI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
PM	Penman-Monteith
Rs	Radiación Solar
SIG	Sistema de Información Geográfica
UTM	Universal Transversal Mercator

CAPITULO 1

1 INTRODUCCION

1.1. Antecedentes

Se han realizado varias publicaciones en distintos países sobre la determinación de la evapotranspiración (ET) con el propósito de establecer el método que proponga mejores resultados a las necesidades de riego en los cultivos. En la publicación 56 de la FAO en su estudio de Riego y Drenaje recomienda el método Penman-Monteith como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de cultivo de referencia con parámetros climáticos.

Para el hidrólogo, el interés de la ET se centra en la cuantificación de los recursos hídricos de una zona: la precipitación menos la evapotranspiración corresponde al volumen de agua disponible. La ET se estudia principalmente en el campo de las ciencias agronómicas, donde se considera las necesidades hídricas de los cultivos para su correcto desarrollo.

Ricardo Trezza(2008) hace referencia a qué método utilizar en su publicación “La Estimación de la Evapotranspiración de Referencia a nivel mensual en Venezuela”. Se analizaron varios métodos, entre ellos Penman-Monteith, la ecuación de Thornthwaite, las publicaciones de FAO-24 como son la Radiación y la ecuación de Penman-modificada, el método de Blaney-Criddle y el método de Hargreaves y concluyó que para las condiciones en estudio el método más aplicable es el de Penman-Monteith.

Por otra parte en el estado de Trujillo en Venezuela se determinó la evapotranspiración evaluando la Fórmula de Hargreaves-Samani (HG) ya que solo requiere de valores de temperaturas máximas y mínimas y Radiación extraterrestre que son los únicos datos que registran las estaciones meteorológicas ubicadas en esa localidad. Encontraron que la ecuación HG subestima los valores de la ET_0 diarios debido a la alta dependencia de ese modelo de la oscilación térmica la cual es baja en condiciones de páramo, aún con alta insolación. Realizaron un modelo de regresión lineal propuesto donde involucraron la Radiación solar medida

(Rs). Este modelo predijo mejor la ET_o diaria lo que confirma, para las condiciones de este estudio, la alta dependencia de la ET_o en los datos Rs.

1.2. Justificación

Se realiza este estudio a fin de determinar que método de los propuestos en este análisis presenta valores de ET_o con el menor porcentaje de error teniendo en cuenta los datos que registran estaciones meteorológicas ubicadas en la Provincia del Guayas. Los métodos a utilizarse son: El método Penman-Monteith, el Thornthwaite, el método de Hargreaves y el método usando la evaporación.

1.3. Antecedentes del Proyecto

Un buen uso del recurso agua es el resultado de un correcto cálculo de necesidades de riego de los cultivos que se da a partir de una correcta estimación de ET_o . Existen diversos métodos para determinar la ET_o , que requieren de datos climáticos específicos. Por lo tanto, se necesita disponer de una base de datos suficiente (serie histórica) para así determinar con

precisión la influencia de todos los factores en cálculo de la ET_o tanto a nivel mensual como anual.

1.4. Objetivo General

Determinación de la evapotranspiración con la mayor precisión posible que se pueda alcanzar con los datos meteorológicos disponibles en la Provincia del Guayas; mediante el estudio comparativo de diversos métodos propuestos en la bibliografía relacionada.

1.5. Objetivos Específicos

Comparar resultados obtenidos entre métodos y determinar qué método ofrece el mejor resultado.

Determinar que método es aplicable en la provincia del Guayas de acuerdo con los datos disponibles de las estaciones meteorológicas.

1.6. Introducción

La evapotranspiración es un factor muy importante para el correcto uso del recurso agua, por tal motivo y luego de varios estudios la FAO en su publicación 56 recomienda que el método aceptado para evaluar la ET es el de PM ya que en su expresión general involucra variables como: temperatura media, velocidad del viento y humedad relativa las mismas que no son registradas por las estaciones ubicadas dentro y en las zonas cercanas al límite de la provincia del Guayas lo cual es una limitante para el cálculo de la evapotranspiración.

El presente estudio muestra resultados de evapotranspiración evaluados con el método Penman-Monteith y métodos alternos que requieren datos que si son registrados por las estaciones climatológicas de la provincia del Guayas y mediante comparaciones de resultados de los métodos alternos tomando como base los resultados del método recomendado por la FAO identificar el que proponga menor error y de esa manera establecer un método que sea aplicable en la provincia del Guayas teniendo en cuenta los datos climáticos disponibles.

CAPITULO 2

2 REVISION TEORICA

2.1 Definiciones y Generalidades sobre la Evapotranspiración

La evapotranspiración es el componente más difícil de cuantificar al momento de determinar el balance hídrico y es el componente más importante para realizar un correcto estudio de Riego y Drenaje. La evapotranspiración que ocurre a partir de una superficie con vegetación es función de las condiciones meteorológicas del área.

Debido a que las características de la vegetación presentan una gran variabilidad de una especie a otra, ha existido la tendencia a tratar la evapotranspiración basándose en una superficie específica o de referencia.

Esto permite evaluar la ET considerando solamente las variables meteorológicas del área en estudio.

La ET_0 expresa la demanda o poder evaporativo de la atmosfera en un lugar específico, en un momento determinado y depende únicamente de factores climáticos sin tomar en cuenta factores asociados al suelo, tipo y manejo del cultivo. Teniendo en cuenta este concepto, la mejor alternativa es la aplicación del método de Hargraeves-Samani (Hargreaves y Samani, 1985) el cual solo requiere datos de temperatura máxima y mínima y registros de radiación extraterrestre que son datos de fácil obtención. (Maffei, 2002).

Por otra parte, el método Penman-Monteith utiliza datos de flujo de calor en el suelo, temperatura, velocidad del viento, presión de vapor a saturación, presión real del vapor, pendiente de la curva de presión de vapor a saturación y una constante psicrométrica. Estos datos pueden ser fácilmente medidos o derivados de datos comúnmente medidos, siempre y cuando no haya escasez de registros meteorológicos. El procedimiento de cálculo se muestra en la publicación *Evapotranspiración del Cultivo* (FAO, 2006)

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos por los cuales se pierde agua a través de la evaporación y la transpiración de la parte biótica del ecosistema (principalmente la vegetación). Estos dos procesos son difíciles de medir por separado, y lo mejor es considerar su estimación de

manera conjunta. Por este motivo, la cantidad total de agua que se pierde a la atmosfera se la estima a través del cálculo de la evapotranspiración.

La evapotranspiración interviene directamente en el ciclo hidrológico.

El concepto de evapotranspiración difiere de la evaporación ya que la superficie de la cual escapan las moléculas de agua no es una superficie de agua sino superficie de vegetales

2.2 Evaporación

Evaporación es un proceso mediante el cual el agua en estado líquido pasa a un estado gaseoso sin que sea necesario una temperatura determinada, pero mientras más alta sea más rápido se efectivizará el ciclo. Es un ciclo necesario ya que de esta manera el agua es devuelta a la atmosfera en forma de vapor.

La energía cinética producida por la radiación solar, el viento y las diferencias de presión de vapor hace que las moléculas cercanas a la superficie de un suelo húmedo o una masa de agua sean transferidas de manera continua a la atmosfera. Al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmosfera se condensan y regresan al cuerpo de agua.(Aparicio, 1992)

La evaporación de carácter biológico realizada por los vegetales se denomina transpiración y es el principal fragmento de la evaporación, ambos ocurren simultáneamente pero son dos procesos totalmente independientes

La evaporación del agua del suelo desnudo(es decir sin vegetación) es el proceso por el cual el agua se pierde desde el suelo a la atmosfera. Si el proceso de evaporación no se controla mediante una práctica de manejo del agua en el suelo, una cantidad considerable de agua se puede perder de un sistema de riego o una tierra de cultivo. Durante el período de siembra y germinación, la evaporación puede reducir el contenido de agua del suelo de manera significativa y puede obstaculizar el crecimiento de la planta. (Lal, 2004)

2.3 Transpiración

Es el proceso biológico por el cual las plantas pierden agua. El agua es absorbida del suelo a través de sus raíces, éstas toman lo necesario para su crecimiento y el excedente es expulsado hacia la atmosfera por medio de la transpiración. El contenido de agua del suelo y la capacidad del suelo de conducir agua a las raíces también determinan la tasa de transpiración, así como la salinidad del suelo y el agua de riego. Es influenciada también por las características del cultivo, el medio donde se produce y las prácticas de cultivo que se realizan. Adicionalmente, depende del aporte de energía, del

gradiente del vapor de presión y de la velocidad del viento. Por lo tanto, en la determinación de la evapotranspiración se deben considerar parámetros de radiación, de temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento (Allen, 2006)

Cada planta tiene su tasa de transpiración por tal motivo no solo se deben considerar el tipo de cultivo sino también el ambiente en el que crecen y la gestión con la que se producen. Es importante notar que al momento de la siembra el agua en su totalidad se pierde por evaporación debido a que el suelo se encuentra aún a la intemperie, lo contrario ocurre cuando la planta empieza a crecer, cubre completamente al suelo y el agua es devuelta a la atmosfera por transpiración.

1.1.Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración se mide de manera directa con el lisímetro.

Consiste en un recipiente enterrado y cerrado lateralmente, de modo que agua drenada por gravedad (la que se hubiera infiltrado hasta el acuífero) es recogida por un drenaje sub-superficial. En su construcción hay que restituir adecuadamente el suelo excavado en condiciones lo más similares posible a las originales. En las cercanías del lisímetro, se debe colocar un pluviómetro para registrar el agua caída por precipitación.

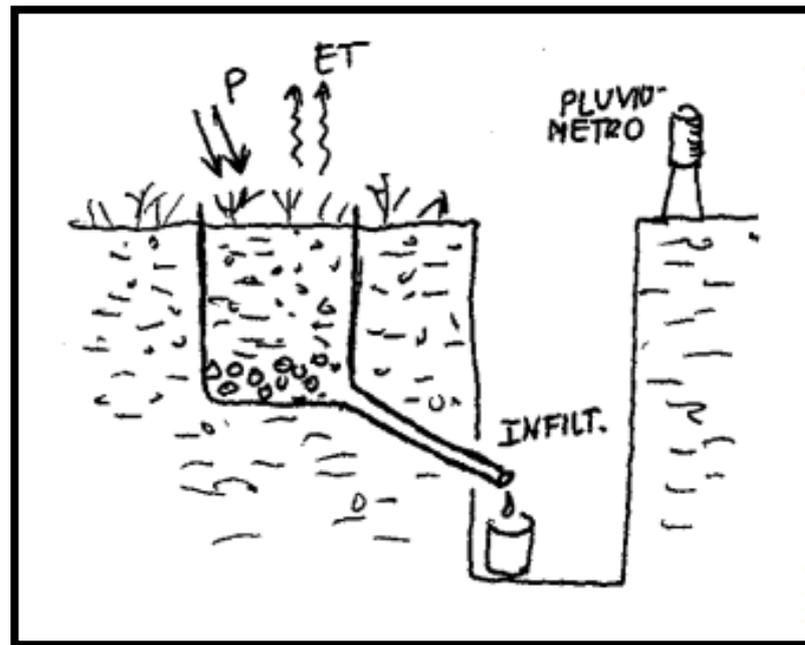


Figura 1. Medida directa de la evapotranspiración
(Sánchez, 2010)

Se despeja la evapotranspiración (ETR) de la siguiente ecuación que expresa el balance hídrico en el lisímetro:

$$\text{Precipitaciones} = \text{ETR} + \text{Infiltración} \pm \text{almacenamiento} \quad \text{Ec. 1}$$

(Hay que tener en cuenta que el lisímetro se construye con unos bordes que impidan la escorrentía superficial)

La única medida compleja es el almacenamiento. Normalmente se mide la humedad del suelo y a partir de ahí se calcula para convertir esa humedad en una lámina de agua equivalente expresada en mm. Si queremos medir la

ETP, es más simple. Mediante riego, debemos mantener el suelo en condiciones óptimas de humedad, y el cálculo sería:

$$\text{Precipitación} + \text{Riego} = \text{ETP} + \text{Infiltración} \quad \text{Ec. 2}$$

Ya no hay almacenamiento, puesto que el suelo siempre está en condiciones de saturación (almacenamiento de agua completo).

Un lisímetro es difícilmente representativo de toda la región. En ocasiones se establece el balance hídrico en una parcela experimental, en la que se miden precipitaciones, escorrentía superficial, variaciones de la humedad en el suelo, etc. Y así finalmente obtener la evapotranspiración. Es un procedimiento más exacto, pero más costoso y complicado (Sánchez, 2010). El cuadro 1 resume las unidades usadas para expresar la evapotranspiración y los factores de conversión entre ellas.

Tabla I. Factores de conversión para expresar evapotranspiración

	Altura de agua	Volumen por unidad de área		Energía por unidad de área*
	mm día ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	l s ⁻¹ ha ⁻¹	MJ m ⁻² día ⁻¹
1 mm día ⁻¹	1	10	0.116	2.45
1 m ³ ha ⁻¹ día ⁻¹	0.1	1	0.012	0.245
1 l s ⁻¹ ha ⁻¹	8.640	86.40	1	21.17
1 MJ m ⁻² día ⁻¹	0.408	4.082	0.047	1

*Para el agua con una densidad de 1000 kilogramos m⁻³ y a 20°C. (FAO, 2006)

Es muy importante estimar correctamente la evapotranspiración para calcular el balance hídrico y así detectar el stress hídrico vegetal y también estimar los rendimientos agrícolas. Estimar dicha variable es complejo ya que requiere de numeroso factores que intervienen en su proceso (Sánchez,2002)

Cuando se habla de evapotranspiración se debe tener en cuenta además tres definiciones según lo expuesto por Allen et all. (2006):

1. Evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_0
2. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar, ET_c

$$ET_c = ET_0 \times K_c \qquad \text{Ec. 3}$$

Donde, K_c es el factor de cultivo bien regado en condiciones agronómicas óptimas

3. Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar, ET_{caj}

2.4 Factores que afectan la evapotranspiración

La Evapotranspiración es un fenómeno complejo debido a la diversidad de factores que lo afectan. Por una parte, se encuentran las condiciones ambientales imperantes en el momento en el que se desea cuantificar su intensidad, las cuales se pueden agrupar bajo el concepto de factores climáticos, o meteorológicos según el caso; pero también son muy importantes las relativas a las características de la vegetación que cubre el suelo, dado que cada vegetal tiene requerimientos hídricos distintos, con lo cual la tasa de transpiración será diferente según la planta. Finalmente la condición de humedad del suelo es un factor que también es decisivo en la magnitud del proceso, pues constituye la fuente de suministro hídrico, tanto para la transpiración vegetal como para la evaporación directa del agua del suelo.(Román, Hidrogeología Hidrología Universidad de Salamanca España, 2010)

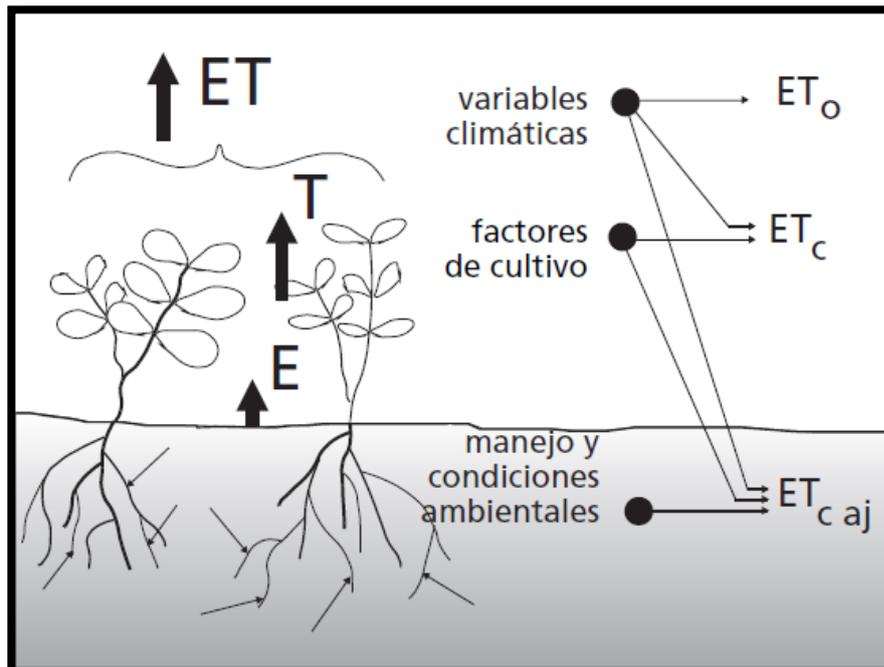


Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración. (FAO, 2006)

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio del desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración. Dentro de las principales variables climáticas tenemos a la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. (G. Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006)

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración del cultivo que se desarrollan en áreas grandes y bien manejadas. Las diferencias en resistencia a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radicales rugosidad del cultivo dan

lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas. La evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c) se refiere a la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen en áreas grandes bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas.(FAO,2006)

Los factores tales como salinidad o baja fertilidad del suelo, el uso limitado de fertilizantes, la presencia de horizontes duros o impenetrables en el suelo, ausencia de control de enfermedades y de parásitos y el mal manejo del suelo pueden limitar el desarrollo del cultivo y reducir la evapotranspiración. Así como también la densidad del cultivo y el contenido de agua del suelo.

Ya que el cultivo de referencia para la estimación de la evapotranspiración es considerado como un crecimiento activo de pasto sin limitaciones de agua, es importante tener en cuenta que demasiada agua dará lugar a la saturación del suelo lo cual puede dañar las raíces de la planta y provocar reducción de su capacidad de extraer agua del suelo por la inhibición de la respiración.(FAO,2006)

2.5 Método de Penman –Monteith FAO

La ecuación de Penman es considerada como uno de los métodos más precisos en términos de estimación y describe la evaporación de una superficie de agua expuesta a la intemperie y fue desarrollada por Howard Penman en 1948. La ecuación de Penman requiere de temperatura media diaria, la velocidad del viento, humedad relativa para determinar la evapotranspiración.

Es el único método recomendado para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, a partir de datos meteorológicos. Sus procedimientos de cálculo en función de los datos meteorológicos disponibles y la escala de tiempo de los cálculos están estandarizados. (FAO, 2006)

Ecuación:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_{sat} - e_{act})}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 4}$$

G=es el flujo de calor en el suelo

T= Temperatura media del aire

R_n =Radiación Solar neta

u_2 = velocidad del viento a 2m de altura

γ =Constante Psicométrica

Δ =Pendiente de la curva de presión de vapor

e_{sat} =Presion de vapor de saturación

e_{act} =Presion de vapor activa

2.6 Método de Hargreaves

Método de Hargreaves-Samani 1985 cuenta con gran precisión y requiere solo de parámetros de Temperaturas y Radiación Solar. Es recomendado por la FAO, pero como método alternativo. Conociendo que por escases de datos la utilización de otros métodos es restringida.

Expresión general:

$$ET_0 = 0.0135R_s(T + 17.8) \quad \text{Ec.5}$$

Donde

ET_0 Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_s Radiación solar (MJ m⁻² día⁻¹)

T Temperatura media (°C)

Hargreaves y Samani (1982) recomienda una ecuación simple para estimar la radiación solar usando la diferencia de temperatura:

$$R_S = K_{RS} R_a (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

K_{RS} Coeficiente de ajuste basado en el periodo mensual de la humedad relativa

R_a Radiación extraterrestre MJmm⁻²d⁻¹(tabulada, ver anexo)

T_{max} Temperatura máxima °C

T_{min} Temperatura mínima °C

El coeficiente empírico K_{RS} estaba fijado inicialmente en 0.17 para Salt Lake City y otras regiones semiáridas, y más tarde Hargreaves (1994) recomienda el uso de 0.162 para las regiones del interior donde la masa de la tierra domina, y 0.190 para las regiones costeras, donde están influenciados masas de aire por un cuerpo de agua cercano

Reemplazando las ecuaciones y con un valor de $K_{RS}=0.16^*$ se obtiene:

$$ET_o = 0.0022(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad \text{Ec. 7}$$

Sin embargo, para los meses de mayor demanda, Hargreaves y Samani (1985) recomienda que el coeficiente se incremente a 0.0023. Este ajuste dio lugar a la denominada ecuación Hargreaves 1985:

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a \quad \text{Ec. 8}$$

2.7 Método de Thornthwaite

Este método se lo aplica normalmente en hidrogeología fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escurrentía para diversas cuencas de drenaje, es una relación empírica entre la ETp y la temperatura del aire, se lo recomienda para regiones húmedas.

$$ET_p = 0.53333 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

ET_p Evapotranspiración Potencial (mm día⁻¹)

T Temperatura media mensual (°C)

I Índice de Calor anual, es la suma de los doce índices mensuales i para cada mes

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \quad \text{Ec. 10}$$

El valor de a se lo calcula de la siguiente manera

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.79 \times 10^{-2})I + 0.49 \quad \text{Ec. 11}$$

2.8 Método usando la Evaporación

2.8.1 Tanque evaporímetro

El método del tanque evaporímetro proporciona una medida de la evaporación tomando en cuenta los efectos de la radiación, viento, temperatura, y humedad actuando de manera integral durante el proceso evaporativo de una superficie de agua y proporciona un valor similar.

Varios factores climáticos producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada, aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo. Además se debe considerar que se almacena calor dentro del tanque ya que puede causar una significativa evaporación durante la noche (FAO, 2006).

A pesar de la diferencia en los procesos ligados a la evaporación del tanque y la evapotranspiración de la superficies cultivadas, el uso de la evaporación del tanque para predecir la ET_o para períodos de 10 días puede ser considerado confiable si se usa correctamente. La evaporación del tanque será relacionada con la evaporación de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_o = K_p E_{pan} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

ET_o evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}]

K_p coeficiente del tanque evaporímetro [-]

E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro [mm día^{-1}]

Para este estudio asumiremos el tanque clase A ya que en la provincia carecemos de zona desérticas debido a la alta humedad que presenta.

2.8.2 Descripción y características del Tanque Clase A

El tanque Clase A es circular, 120.7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad. Está construido de hierro galvanizado o de láminas de metal (0,8mm). El tanque se sitúa sobre una plataforma de madera en forma de reja que se encuentra a 15cm por encima del nivel del suelo. El tanque debe estar a nivel.

Una vez Instalado, el tanque se llena con agua hasta 5 cm por debajo del borde y el nivel del agua no debe disminuir hasta más de 7.5 cm por debajo del borde. El agua debe ser regularmente cambiada, al menos semanalmente, para eliminar la turbidez. Si el tanque es galvanizado debe ser pintado anualmente con pintura de aluminio. Las mallas sobre los tanque deben evitarse. Los tanques deben ser protegidos con mallas de seguridad para evitar el acceso de los animales.

El lugar de instalación debe estar cubierto preferentemente con pasto, en un área de 20 por 20 m, abierto a todos lados para permitir la circulación del aire. Es preferible que la estación se encuentre situada en el centro o dentro de grandes campos cultivados.

Las lecturas del tanque se realizan diariamente temprano en la mañana a la misma hora que se mide la precipitación. Las mediciones se realizan dentro de un área estable situada cerca del borde del tanque. El área estable produce comúnmente un cilindro de metal de cerca de 10cm de diámetro y 20cm de profundidad con una pequeña abertura en la base para permitir el flujo de agua

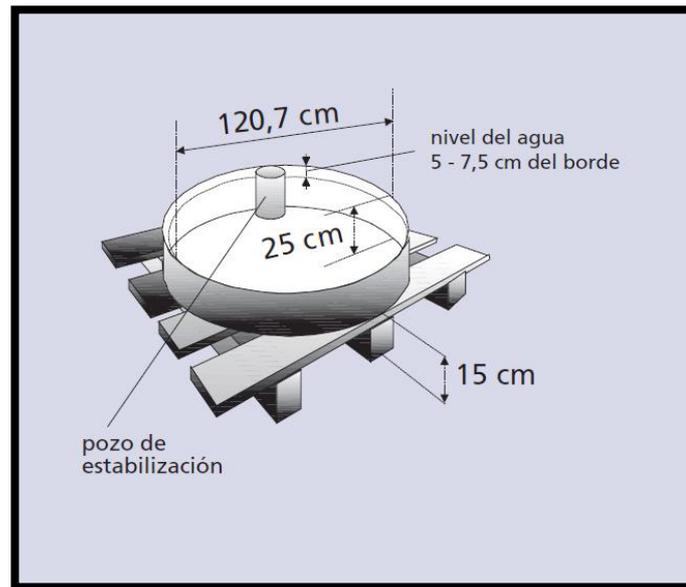


Figura 3. Tanque evaporímetro Clase A.
(FAO, 2006)

En áreas con niveles moderados de viento, temperatura y humedad relativa, los valores presentados pueden necesitar una reducción de 5-10% en climas húmedos y tibios se necesita poca o ninguna reducción de K_p . En este caso no realizaremos ninguna reducción y asumiremos que el tanque no se encuentra dentro de un cercado ni rodeado por cultivos de gran altura por lo que tendremos que incrementar el valor de K_p .

Partiendo de las suposiciones anteriores, asumiendo un valor medio de 80 de humedad relativa y valores de velocidad media de 0.555 m/s y una distancia del cultivo a barlovento de 1000 m, se obtiene el valor de $K_p=0.85$

Tabla II. Tabla de valores de K_p que dependen de velocidad y humedad relativa.

Tanque Clase A	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada				Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
HR media	Distancia del cultivo a barlovento(m)	baja <40	media 40-70	alta >70	Distancia del cultivo a barlovento(m)	baja <40	media 40-70	alta >70
Velocidad del viento (m/s)								
Baja <2	1	0.55	0.65	0.75	1	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.70	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.5	0.6	0.7
Moderada 2-5	1	0.5	0.6	0.65	1	0.65	0.75	0.8
	10	0.6	0.7	0.75	10	0.55	0.65	0.7
	100	0.65	0.75	0.8	100	0.5	0.6	0.65
	1000	0.7	0.8	0.8	1000	0.45	0.55	0.6
Alta 5-8	1	0.45	0.5	0.6	1	0.6	0.65	0.7
	10	0.55	0.6	0.65	10	0.5	0.55	0.65
	100	0.6	0.65	0.7	100	0.45	0.5	0.6
	1000	0.65	0.7	0.75	1000	0.4	0.45	0.55
Muy alta >8	1	0.4	0.45	0.5	1	0.5	0.6	0.65
	10	0.45	0.55	0.6	10	0.45	0.5	0.55
	100	0.5	0.6	0.65	100	0.4	0.45	0.5
	1000	0.55	0.6	0.65	1000	0.35	0.4	0.45

CAPITULO 3

3 ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

3.1 Determinación de Parámetros de Interés

Las estaciones utilizadas en este análisis son las 29 estaciones activas que mantiene el INAMHI dentro del área de influencia de la provincia del Guayas. De manera general los datos utilizados han sido registrados desde el año 1982 hasta el año 2011 (30años). Sin embargo no todas las estaciones presentan registros continuos en toda la serie de tiempo. Para este estudio no se consideraron estaciones climáticas con menos de 5 años de registros teniendo en mente que el Fenómeno del Niño tiene una frecuencia de entre 4 y 7 años. De este modo, se garantiza que el análisis realizado en esta tesis considerará la ocurrencia de ese fenómeno.

3.2 Método Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_{sat} - e_{act})}{\Delta + \gamma(I + 0.34u_2)}$$

Temperatura media del aire

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

T_{media} Temperatura media del aire (°C)

T_{max} Temperatura máxima del aire (°C)

T_{min} Temperatura mínima del aire (°C)

Presión atmosférica

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

z Altura sobre el nivel del mar (m)

Constante Psicométrica

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 * 10^{-3} P \quad \text{Ec. 15}$$

Donde:

γ Constante Psicométrica (kPa °C⁻¹)

P Presión Atmosférica (kPa)

λ Calor latente de vaporización, 2.45 MJ kg^{-1}

c_p Calor específico a presión constante, $1.013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

ε Cociente del peso molecular ve vapor de agua /aire seco =0.622

Presión media de vapor a saturación (es)

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde:

e_s Presión media de vapor a saturación (kPa)

$e^\circ(T_{max})$ Presión de vapor a saturación a la temperatura máxima del aire (kPa)

$e^\circ(T_{min})$ Presión de vapor a saturación a la temperatura mínima del aire (kPa)

La Presión de vapor a saturación a temperatura del aire máxima y mínima se calcula con la siguiente ecuación.

$$e^\circ(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) \quad \text{Ec. 17}$$

Presión de vapor activa

Presión de vapor derivada de datos de humedad relativa

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + e^\circ(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100}}{2} \quad \text{Ec. 18}$$

Donde

$e^\circ(T_{min})$ Presión de vapor a saturación a temperatura mínima del aire

$e^{\circ}(T_{\max})$	Presión de vapor a saturación a temperatura máxima del aire
HR_{\max}	Humedad relativa máxima
HR_{\min}	Humedad relativa Mínima

Velocidad del viento

La velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tiene valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con la altura. Por esta razón los anemómetros se colocan a una altura estándar elegida, 10m en meteorología y 2 o 3 m en agrometeorología. Para el cálculo de la evapotranspiración, se requiere la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie. Para ajustar los datos de velocidad del viento obtenido de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2m, se puede usar una relación logarítmica

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde

u_2 Velocidad del viento a 2m sobre la superficie (m s^{-1})

u_z Velocidad del viento medida a zm sobre la superficie (m s^{-1})

z Altura de medición sobre la superficie (m)

Flujo de calor en el suelo

Para periodos diarios la magnitud de flujo de calor bajo la superficie de referencia es relativamente pequeña, esta puede ser ignorada y entonces

$$G_{diario} \cong 0$$

Determinación de la Radiación Solar extraterrestre

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega] \quad \text{Ec. 20}$$

$R_a = \text{Radiación extraterrestre} [Mj m^{-2} día^{-1}]$

$G_{sc} = \text{Constante solar} = 0.082 \text{ } Mj m^{-2} min^{-1},$

$d_r = \text{distancia relativa inversa Tierra - Sol}$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad \text{Ec. 21}$$

$\delta = \text{declinación solar} [\text{rad}]$

$$\delta = 0,409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad \text{Ec. 22}$$

$\omega_s = \text{ángulo de radiación al puesta del sol} [\text{rad}]$

$$\omega_s = \arccos[-\tan \varphi \tan \delta] \quad \text{Ec. 23}$$

Determinación de la Radiación Solar (RS)

$$R_S = \left(0,25 + 0,50 \frac{n}{N}\right) R_a \quad \text{Ec. 24}$$

Donde

n Número de horas-sol que se registran en condiciones normales en un día o mes, dependiendo del período analizado

N Número máximo de horas-sol que se pueden registrar en un día o mes sin presencia de nubes, dependiendo del período analizado

R_a Radiación solar extraterrestre o que proviene del espacio exterior y que se mide en MJ/m² por día, aunque también se puede estimar el acumulado mensual.

3.2.1 Estaciones climatológicas utilizadas

De las 29 estaciones ubicadas en la provincia no todas registran los datos que se necesitan en la fórmula de Penman-Monteith.

A continuación se detallan por número de años cuantas estaciones registran los datos necesarios en la serie de tiempo analizada.

Tabla III. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de velocidad

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	4
10 a 20 años	7
20 a 30 años	4

Tabla IV. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	9
10 a 20 años	6
20 a 30 años	13

Tabla V. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de humedad relativa

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	6
10 a 20 años	12
20 a 30 años	5

Tabla VI. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de horas sol

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	1
10 a 20 años	6
20 a 30 años	3

Únicamente 10 de las 29 estaciones ubicadas en la provincia del Guayas registran los datos requeridos para evaluar la evapotranspiración mediante este método.

Tabla VII. Estaciones utilizadas en el método Penman-Monteith

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M039	Bucay	Climatológica Principal CP
M171	Camposano #2	Climatológica Principal CP
M292	Granja Sta. Inés (UTM)	Climatológica Principal CP
MA2V	Guayaquil U. Estatal (Radio Sonda)	Climatológica Ordinaria CO
MA2U	Ingenio Aztra (La Troncal)	Climatológica Principal CP
M218	Ingenio San Carlos (Batey)	Climatológica Principal CP
M185	Machala UTM	Agrometeorológica AP
M037	Milagro Ingenio Valdez	Climatológica Principal CP
M006	Pichilingue	Agrometeorológica AP
M466	Vinces Inamhi	Pluviométrica PV

3.3 Método de Hargraeves

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}R_a$$

Donde

T_{media} Temperatura media °C

T_{max} Temperatura máxima °C

T_{min} Temperatura mínima °C

R_a Radiación Extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ día^{-1}$)

Los valores de Radiación solar extraterrestre para este método están tabulados y su valor se obtiene ingresando datos del mes en estudio y de los grados de latitud sean norte o sur, la tabla se presenta en los anexos

3.3.1 Estaciones climatológicas utilizadas

A continuación se detallan por número de años cuantas estaciones registran los datos necesarios en la serie de tiempo analizada.

Tabla VIII. Distribución De estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	7
10 a 20 años	6
20 a 30 años	13

En este método podemos utilizar 26 de las 92 estaciones situadas en la provincia del guayas.

Tabla IX. Estaciones utilizadas en el método Hargreaves

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M051	Babahoyo	Agrometeorológica AP
M039	Bucay	Climatológica Principal CP
M171	Camposano #2	Climatológica Principal CP
M292	Granja Sta. Inés (UTM)	Climatológica Principal CP
MA41	Chanlud	Climatológica Ordinaria CO
M130	Chillanes	Climatológica Ordinaria CO

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M136	Chunchi	Climatológica Ordinaria CO
M141	El Labrado	Climatológica Ordinaria CO
M075	Guayaquil Inocar	Climatológica Principal CP
M056	Guayaquil Aeropuerto	Aeronáutica AR
MA2V	Guayaquil U. Estatal (Radio Sonda)	Climatológica Ordinaria CO
MA53	Hacienda Taura (Banatel)	Climatológica Principal CP
MA2U	Ingenio Aztra (La Troncal)	Climatológica Principal CP
M218	Ingenio San Carlos (Batey)	Climatológica Principal CP
M185	Machala UTM	Agrometeorológica AP
M037	Milagro Ingenio Valdez	Climatológica Principal CP
M176	Naranjal	Climatológica Ordinaria CO
M166	Olmedo-Manabí	Climatológica Principal CP
M006	Pichilingue	Agrometeorológica AP
M173	Playas Gral. Villamil	Climatológica Ordinaria CO
M175	Progreso-Guayas	Climatológica Ordinaria CO
M806	Pueblo Viejo	Climatológica Ordinaria CO
M195	Puerto Bolivar	Climatológica Ordinaria CO
M228	Puná	Climatológica Ordinaria CO
M032	Santa Isabel Inamhi	Climatológica Principal CP
M466	VincesInamhi	Pluviométrica PV

3.4 Método de Thornthwaite

$$ET_p = 0.53333 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

Donde

ET_p Evapotranspiración Potencial (mm día⁻¹)

T Temperatura media mensual (°C)

I Índice de Calor anual, es la suma de los doce índices mensuales i para cada mes

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

El valor de a se lo calcula de la siguiente manera

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.79 \times 10^{-2})I + 0.49$$

3.4.1 Estaciones climatológicas utilizadas

A continuación se detallan por número de años cuantas estaciones registran los datos necesarios en la serie de tiempo analizada.

Tabla X. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de temperatura

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	9
10 a 20 años	6
20 a 30 años	13

En este método podemos utilizar 28 de las 92 estaciones situadas en la provincia del guayas.

Tabla XI. Estaciones Utilizadas en el método Thornthwaite

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M051	Babahoyo	Agrometeorológica AP
M039	Bucay	Climatológica Principal CP
M171	Camposano #2	Climatológica Principal CP
M292	Granja Sta. Inés (UTM)	Climatológica Principal CP
MA41	Chanlud	Climatológica Ordinaria CO
M130	Chillanes	Climatológica Ordinaria CO
M136	Chunchi	Climatológica Ordinaria CO

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M141	El Labrado	Climatológica Ordinaria CO
M075	Guayaquil Inocar	Climatológica Principal CP
M056	Guayaquil Aeropuerto	Aeronáutica AR
MA2V	Guayaquil U. Estatal (Radio Sonda)	Climatológica Ordinaria CO
MA53	Hacienda Taura (Banatel)	Climatológica Principal CP
MA2U	Ingenio Aztra (La Troncal)	Climatológica Principal CP
M218	Ingenio San Carlos (Batey)	Climatológica Principal CP
M1208	La Teodomira	Climatológica Principal CP
M185	Machala UTM	Agrometeorológica AP
M037	Milagro (Ingenio Valdez)	Climatológica Principal CP
M176	Naranjal	Climatológica Ordinaria CO
M1207	Nobol	Climatológica Ordinaria CO
M166	Olmedo-Manabí	Climatológica Principal CP
M006	Pichilingue	Agrometeorológica AP
M173	Playas Gral. Villamil	Climatológica Ordinaria CO
M175	Progreso-Guayas	Climatológica Ordinaria CO
M806	Pueblo Viejo	Climatológica Ordinaria CO
M195	Puerto Bolivar	Climatológica Ordinaria CO
M228	Puná	Climatológica Ordinaria CO
M032	Santa Isabel Inamhi	Climatológica Principal CP
M466	Vinces Inamhi	Pluviométrica PV

3.5 Método usando la Evaporación

La evaporación del tanque será relacionada con la evaporación de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:

$$ET_o = K_p E_{pan}$$

Donde

ET_o evapotranspiración de referencia [mm día^{-1}]

K_p coeficiente del tanque evaporímetro [-]

E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro [$mm\ día^{-1}$]

Para este estudio asumiremos el tanque clase A ya que en la provincia carecemos de zona desérticas debido a la alta humedad que presenta.

En este caso no realizaremos ninguna reducción y asumiremos que el tanque no se encuentra dentro de un cercado ni rodeado por cultivos de gran altura por lo que no tendremos que incrementar el valor de K_p , como la provincia del Guayas se caracteriza por tener un clima cálido y húmedo el incremento del coeficiente será de un 10%.

Partiendo de las suposiciones anteriores, suponiendo un valor medio de 80% de humedad relativa y valores de velocidad media de 0.555m/s y una distancia del cultivo a barlovento de 10m, se obtiene el valor de $K_p=0.85$

3.5.1 Estaciones climatológicas utilizadas

A continuación se detallan por número de años cuantas estaciones registran los datos necesarios en la serie de tiempo analizada.

Tabla XII. Distribución de estaciones climáticas por número de años registrados en la serie de tiempo analizada para datos de evaporación del tanque A

Período de registro de datos disponibles	Número de estaciones
5 a 10 años	11
10 a 20 años	6
20 a 30 años	4

En este método podemos utilizar 23 de las 92 estaciones situadas en la provincia del guayas.

Tabla XIII. Estaciones utilizadas con el método de evaporación

ESTACIONES UTILIZADAS		
Código	Nombre de la Estación	Tipo
M051	Babahoyo	Agrometeorológica AP
M292	Granja Sta. Inés (UTM)	Climatológica Principal CP
MA41	Chanlud	Climatológica Ordinaria CO
M136	Chunchi	Climatológica Ordinaria CO
M075	Guayaquil Inocar	Climatológica Principal CP
MA2V	Guayaquil U. Estatal (Radio Sonda)	Climatológica Ordinaria CO
MA53	Hacienda Taura (Banatel)	Climatológica Principal CP
MA2U	Ingenio Aztra (La Troncal)	Climatológica Principal CP
M218	Ingenio San Carlos (Batey)	Climatológica Principal CP
M1208	La Teodomira	Climatológica Principal CP
M185	Machala UTM	Agrometeorológica AP
M037	Milagro (Ingenio Valdez)	Climatológica Principal CP
M1207	Nobol	Climatológica Ordinaria CO
M166	Olmedo-Manabí	Climatológica Principal CP
M006	Pichilingue	Agrometeorológica AP
M175	Progreso-Guayas	Climatológica Ordinaria CO
M806	Pueblo Viejo	Climatológica Ordinaria CO
M195	Puerto Bolívar	Climatológica Ordinaria CO
M228	Puná	Climatológica Ordinaria CO
M032	Santa Isabel Inamhi	Climatológica Principal CP
M466	VincesInamhi	Pluviométrica PV

3.6 Resultados obtenidos usando los diferentes métodos

Una vez evaluado cada uno de los métodos propuestos, y para la presentación de los resultados se lo hará nivel de estaciones de tal manera que se pueda apreciar la diferencia y/o similitud de los resultados, los valores de vapotranspiración corresponden a datos diarios (mm/d^{-1}) y para diferentes períodos de retorno.

La estaciones que tuvieron disponibilidad de datos para ser evaluados en los 4 métodos se presentan a continuación

Tabla XIV. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Granja Santa Inés evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Granja Sta. Inés												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.52	4.91	5.15	4.71	4.85	4.94	4.62	4.67	4.71	3.55	3.96	4.24
Febrero	4.62	5.58	5.23	4.63	4.71	4.76	4.64	4.69	4.71	3.60	4.20	4.59
Marzo	4.93	5.28	5.59	4.64	4.69	4.73	4.67	4.72	4.75	3.80	4.16	4.39
Abril	4.82	5.20	5.45	4.48	4.57	4.64	4.67	4.73	4.77	3.81	4.23	4.50
Mayo	4.22	4.56	4.79	4.03	4.22	4.34	4.60	4.67	4.72	3.12	3.46	3.68
Junio	3.56	4.00	4.30	3.54	3.78	3.94	4.43	4.53	4.60	2.32	2.65	2.87
Julio	3.45	3.87	4.16	3.43	3.66	3.81	4.36	4.45	4.51	2.18	2.50	2.71
Agosto	3.43	3.82	4.08	3.42	3.67	3.83	4.30	4.39	4.46	2.11	2.67	3.04
Septiembre	3.27	3.56	3.76	3.50	3.68	3.80	4.32	4.40	4.46	2.13	2.60	2.90
Octubre	3.24	3.51	3.68	3.56	3.80	3.95	4.32	4.40	4.46	1.97	2.41	2.71
Noviembre	3.57	3.90	4.12	3.86	4.14	4.33	4.39	4.46	4.51	2.24	2.58	2.81
Diciembre	4.21	4.58	4.82	4.47	4.63	4.73	4.52	4.59	4.63	2.99	3.29	2.39

Tabla XV. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Guayaquil Universidad Estatal evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Guayaquil Universidad Estatal												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.57	5.47	5.88	4.38	4.87	5.00	4.71	4.75	4.80	3.71	4.44	4.93
Febrero	4.26	5.23	5.10	4.69	4.47	4.53	4.65	4.71	4.73	3.09	3.47	3.71
Marzo	4.82	5.69	6.09	4.44	4.57	4.66	4.71	4.76	4.80	3.42	3.91	4.23
Abril	4.99	5.88	6.29	4.43	4.50	4.55	4.72	4.77	4.81	3.74	4.20	4.51
Mayo	5.14	6.16	6.60	4.26	4.33	4.38	4.65	4.72	4.77	3.71	4.25	4.61
Junio	4.83	5.82	6.27	4.15	4.18	4.20	4.51	4.60	4.65	3.69	3.97	4.15
Julio	4.82	5.83	6.31	4.15	4.19	4.22	4.46	4.54	4.60	3.69	3.98	4.18
Agosto	5.53	6.70	7.19	4.40	4.41	4.42	4.45	4.53	4.58	4.30	4.59	4.79
Septiembre	5.84	7.17	7.73	4.70	4.68	4.66	4.50	4.56	4.60	4.69	5.01	5.22
Octubre	5.81	7.14	7.75	4.72	4.75	4.77	4.52	4.59	4.63	4.43	4.76	4.97
Noviembre	5.77	7.07	7.61	4.88	4.86	4.84	4.55	4.61	4.64	4.47	4.92	5.23
Diciembre	5.88	7.23	7.80	4.94	5.05	5.12	4.65	4.71	4.75	4.57	5.25	5.70

Tabla XVI. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Ingenio Aztra (La Troncal) evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Ingenio Aztra (La Troncal)												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	3.65	4.11	4.29	4.48	4.64	4.74	4.52	4.59	4.64	2.64	3.27	3.68
Febrero	3.73	4.59	4.40	4.29	4.00	3.77	4.55	4.68	4.70	2.87	3.30	3.58
Marzo	4.09	4.45	4.68	4.52	4.60	4.66	4.60	4.65	4.69	3.37	3.79	4.06
Abril	4.10	4.37	4.54	4.45	4.48	4.49	4.60	4.67	4.71	3.34	3.61	3.79
Mayo	3.60	3.93	4.16	4.07	4.19	4.26	4.54	4.61	4.66	2.82	3.22	3.49
Junio	3.31	3.72	3.99	3.74	3.88	3.97	4.40	4.49	4.55	2.30	2.78	3.10
Julio	3.46	4.63	5.41	3.77	3.85	3.91	4.35	4.43	4.49	2.25	2.61	2.85
Agosto	3.40	3.85	4.05	3.97	4.02	4.05	4.33	4.40	4.45	2.27	2.68	2.95
Septiembre	3.38	3.62	3.77	4.11	4.22	4.30	4.34	4.41	4.46	2.39	2.69	2.89
Octubre	3.26	3.43	3.54	4.07	4.15	4.21	4.34	4.40	4.44	2.22	2.59	2.83
Noviembre	3.45	3.62	3.72	4.29	4.35	4.40	4.38	4.43	4.46	2.36	2.80	3.09
Diciembre	3.77	4.06	4.26	4.56	4.70	4.80	4.48	4.55	4.59	2.66	3.17	3.51

Tabla XVII. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Ingenio San Carlos evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Ingenio San Carlos												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.04	4.25	4.37	4.49	4.63	4.72	4.53	4.60	4.65	2.57	3.03	3.34
Febrero	4.10	4.89	4.59	4.49	4.61	4.69	4.56	4.63	4.66	2.74	3.08	3.29
Marzo	4.32	4.58	4.75	4.61	4.75	4.85	4.62	4.69	4.73	3.23	3.74	4.08
Abril	4.25	4.50	4.66	4.49	4.62	4.70	4.61	4.67	4.71	3.17	3.45	3.63
Mayo	3.92	4.40	4.72	4.21	4.37	4.48	4.53	4.61	4.66	2.58	2.90	3.11
Junio	3.43	3.97	4.34	3.98	4.16	4.28	4.43	4.52	4.59	2.21	2.48	2.67
Julio	3.25	3.39	3.47	3.86	4.04	4.16	4.36	4.45	4.52	2.16	2.49	2.71
Agosto	3.52	3.75	3.90	4.08	4.18	4.25	4.36	4.44	4.50	2.28	2.61	2.82
Septiembre	3.55	3.80	3.96	4.30	4.44	4.53	4.38	4.46	4.52	2.54	2.80	2.98
Octubre	3.49	3.60	3.67	4.24	4.25	4.25	4.38	4.44	4.48	2.43	2.73	2.92
Noviembre	3.70	3.95	4.11	4.44	4.50	4.54	4.42	4.50	4.56	2.52	2.94	3.22
Diciembre	4.06	4.30	4.44	4.64	4.71	4.75	4.52	4.59	4.63	2.90	3.34	3.64

Tabla XVIII. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Machala UTM evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Machala UTM												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.09	4.3	4.46	4.52	4.60	4.65	4.45	4.62	4.66	2.77	3.46	3.92
Febrero	3.99	4.72	4.37	4.52	4.55	4.57	4.58	4.63	4.65	2.70	3.18	3.49
Marzo	4.30	4.55	4.71	4.53	4.56	4.57	4.62	4.67	4.71	3.01	3.51	3.84
Abril	4.32	4.59	4.76	4.40	4.39	4.38	4.61	4.67	4.70	3.00	4.36	5.26
Mayo	3.78	4.15	4.39	3.95	4.08	4.16	4.53	4.62	4.68	2.56	2.94	3.19
Junio	3.08	3.34	3.51	3.45	3.68	3.84	4.39	4.50	4.58	1.84	2.34	2.67
Julio	3.03	3.19	3.30	3.41	3.56	3.66	4.30	4.43	4.52	1.66	2.16	2.49
Agosto	3.28	4.13	4.69	3.41	3.43	3.44	4.26	4.38	4.46	1.59	2.04	2.34
Septiembre	3.11	3.43	3.64	3.62	3.50	3.40	4.27	4.39	4.48	1.59	1.96	2.21
Octubre	3.04	3.23	3.35	3.34	3.44	3.51	4.27	4.33	4.36	1.44	1.73	1.92
Noviembre	3.37	3.75	3.98	3.84	3.98	4.07	4.33	4.42	4.49	1.77	2.12	2.36
Diciembre	3.83	4.09	4.25	4.44	4.42	4.39	4.46	4.55	4.61	2.47	2.77	2.97

Tabla XIX. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Milagro (Ingenio Valdez) evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Milagro (Ingenio Valdez)												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.37	4.77	5.01	4.62	4.73	4.80	4.57	4.65	4.70	3.36	3.87	4.20
Febrero	4.34	5.15	4.83	4.50	4.55	4.59	4.58	4.65	4.67	3.31	3.62	3.82
Marzo	4.52	4.80	4.98	4.59	4.66	4.71	4.64	4.70	4.74	3.65	4.03	4.28
Abril	4.61	4.91	5.11	4.51	4.54	4.57	4.64	4.70	4.74	3.81	4.07	4.24
Mayo	4.15	4.59	4.88	4.25	4.31	4.34	4.56	4.65	4.71	3.25	3.55	3.75
Junio	3.69	4.08	4.34	3.98	4.11	4.19	4.43	4.53	4.59	2.74	3.08	3.30
Julio	3.64	3.97	4.18	3.93	4.02	4.08	4.37	4.46	4.52	2.62	2.88	3.04
Agosto	3.85	4.18	4.38	4.13	4.19	4.23	4.37	4.45	4.50	2.92	3.26	3.48
Septiembre	3.96	4.33	4.58	4.40	4.46	4.50	4.41	4.48	4.53	3.28	3.67	3.92
Octubre	3.92	4.16	4.31	4.36	4.40	4.42	4.43	4.49	4.53	3.23	3.45	3.59
Noviembre	4.28	4.61	4.81	4.61	4.67	4.70	4.46	4.53	4.58	3.39	3.80	4.07
Diciembre	4.33	4.46	4.51	4.78	4.85	4.90	4.55	4.62	4.67	3.58	4.05	4.35

Tabla XX. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Pichilingue evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

Pichilingue												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.00	4.40	4.65	4.51	4.70	4.83	4.53	4.60	4.64	2.49	2.83	3.06
Febrero	4.21	5.06	4.80	4.57	4.71	4.81	4.57	4.63	4.66	2.75	3.10	3.33
Marzo	4.55	5.07	5.38	4.67	4.80	4.88	4.62	4.67	4.71	3.02	3.32	3.51
Abril	4.44	4.76	4.97	4.50	4.63	4.72	4.61	4.66	4.69	2.83	3.10	3.29
Mayo	3.85	4.21	4.45	4.17	4.34	4.46	4.54	4.61	4.66	2.39	2.68	2.87
Junio	3.45	3.90	4.19	3.90	4.10	4.23	4.42	4.50	4.57	1.95	2.43	2.75
Julio	3.46	3.85	4.10	3.99	4.11	4.19	4.37	4.45	4.51	2.06	2.33	2.51
Agosto	3.68	3.98	4.17	4.24	4.33	4.39	4.37	4.44	4.49	2.30	2.63	2.85
Septiembre	3.87	4.24	4.48	4.56	4.68	4.77	4.44	4.51	4.55	2.70	3.15	3.45
Octubre	3.76	4.03	4.20	4.55	4.64	4.70	4.45	4.51	4.54	2.68	3.01	3.23
Noviembre	3.92	4.22	4.40	4.73	4.88	4.98	4.49	4.54	4.59	2.88	3.25	3.49
Diciembre	3.96	4.31	4.53	4.65	4.80	4.89	4.52	4.58	4.63	2.70	3.04	3.27

Tabla XXI. Resultados de evapotranspiración diaria obtenidos a partir de datos climáticos de la estación Vines Inamhi evaluados en cada uno de los cuatro métodos propuestos.

VinesInamhi												
	Penmna-Monteith			Hargreaves			Thornthwaite			Evaporación		
	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10	TR2	TR5	TR10
Enero	4.27	4.62	4.84	5.09	5.05	5.01	4.47	4.61	4.71	3.43	3.98	4.34
Febrero	4.41	5.30	4.99	4.88	4.68	4.53	4.48	4.59	4.61	3.28	3.63	3.87
Marzo	4.91	5.27	5.50	5.04	4.89	4.77	4.53	4.65	4.74	3.76	4.27	4.61
Abril	4.78	5.13	5.36	4.93	4.72	4.56	4.52	4.64	4.73	3.82	4.18	4.42
Mayo	4.21	4.57	5.11	4.63	4.49	4.38	4.46	4.59	4.68	3.14	3.88	4.37
Junio	3.72	4.23	4.55	4.39	4.29	4.21	4.35	4.48	4.58	3.08	3.48	3.74
Julio	3.70	4.11	4.36	4.44	4.37	4.30	4.30	4.43	4.52	3.28	3.58	3.79
Agosto	3.99	4.39	4.64	4.69	4.57	4.47	4.31	4.43	4.52	3.58	4.03	4.32
Septiembre	4.56	4.94	5.17	5.02	4.93	4.87	4.37	4.47	4.54	4.29	4.84	5.21
Octubre	4.41	4.70	4.87	5.08	4.99	4.92	4.38	4.48	SD	4.52	4.94	5.21
Noviembre	4.54	4.93	5.17	5.29	5.11	4.96	4.40	4.53	4.62	4.62	5.11	5.44
Diciembre	4.46	4.93	5.23	5.29	5.29	5.29	4.50	4.51	4.69	4.25	4.87	5.28

3.7 Comparación y Análisis

Tomando en cuenta que el método más confiable y aceptado por la Fao es el de Penman-Monteith, se realizará el análisis comparativo teniendo como base y muestra a los valores que fueron resultado de evaluar el método de PM. Las tablas presentadas a continuación tienen como finalidad determinar en qué zona que método alternativo al de Penman-Monteith presenta el menor porcentaje de error de evapotranspiración en comparación con los resultados del método de Penman, (los mismos que han sido sombreados de color amarillo), para luego definir que estaciones serán utilizadas en el modelo zonificado.

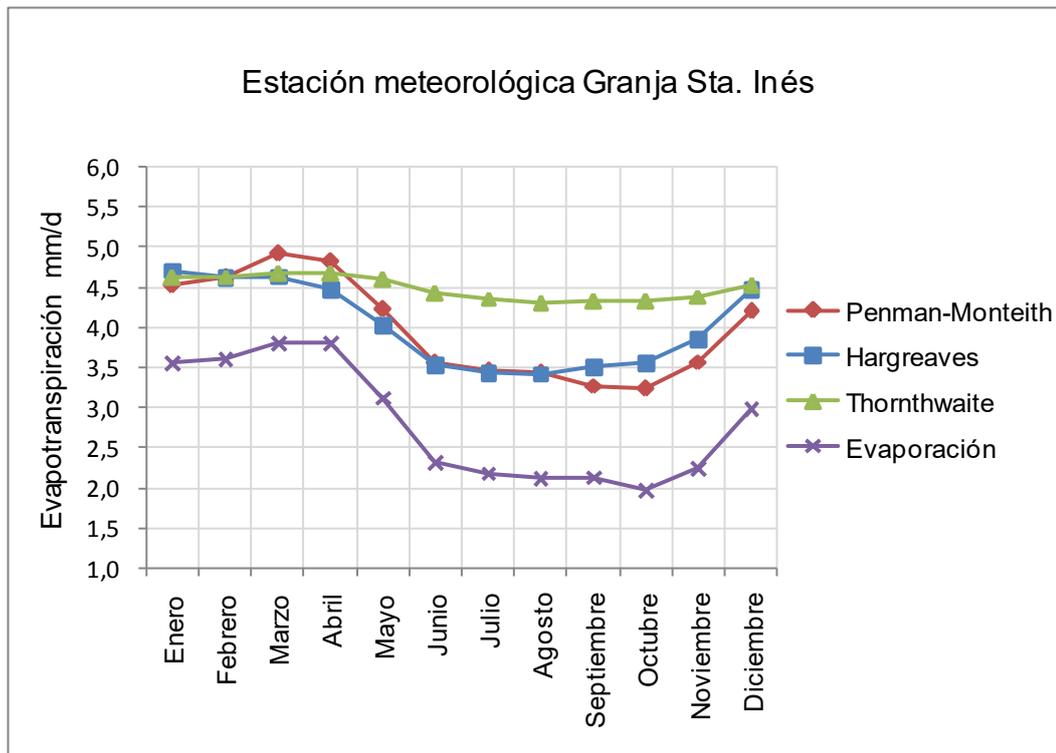


Figura 4. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Granja Sta. Inés para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	10%	33%	39%
Min	0%	0%	21%
Prom	4%	16%	30%

Como se aprecia en la tabla XXII el menos porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 4%

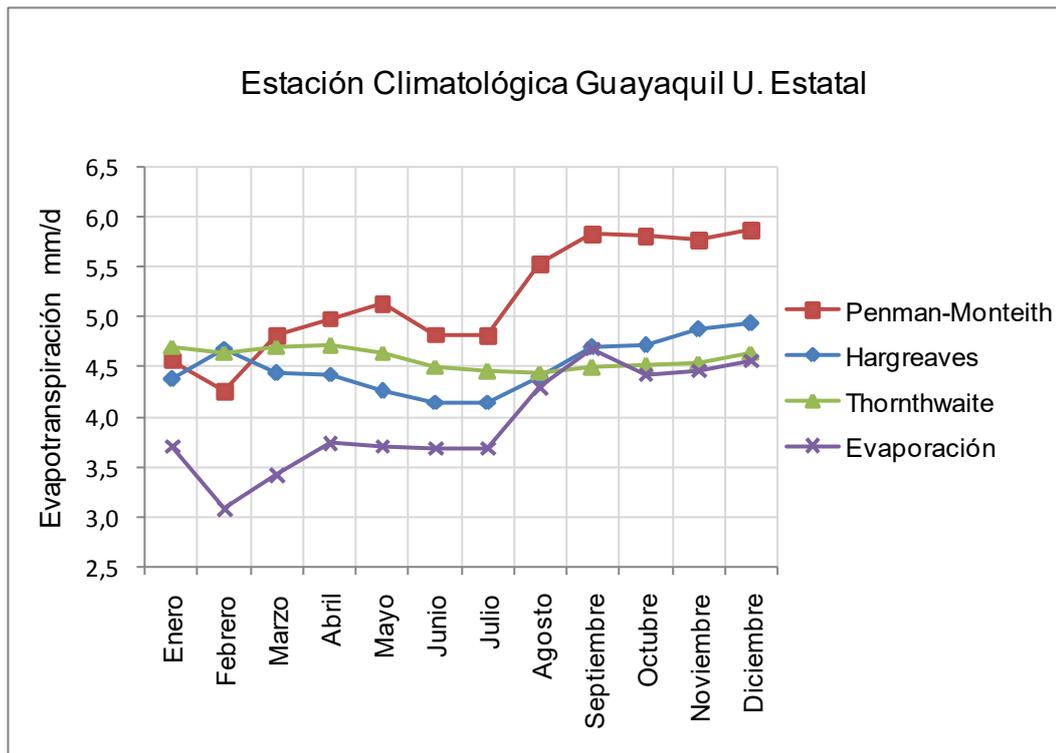


Figura 5. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Guayaquil U. Estatal para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXIII. Diferencia en porcentaje que existe luego de compararlos resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	20%	23%	29%
Min	4%	2%	19%
Prom	14%	13%	24%

Como se aprecia en la tabla XXIII el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Thornthwaite, que es del 13%

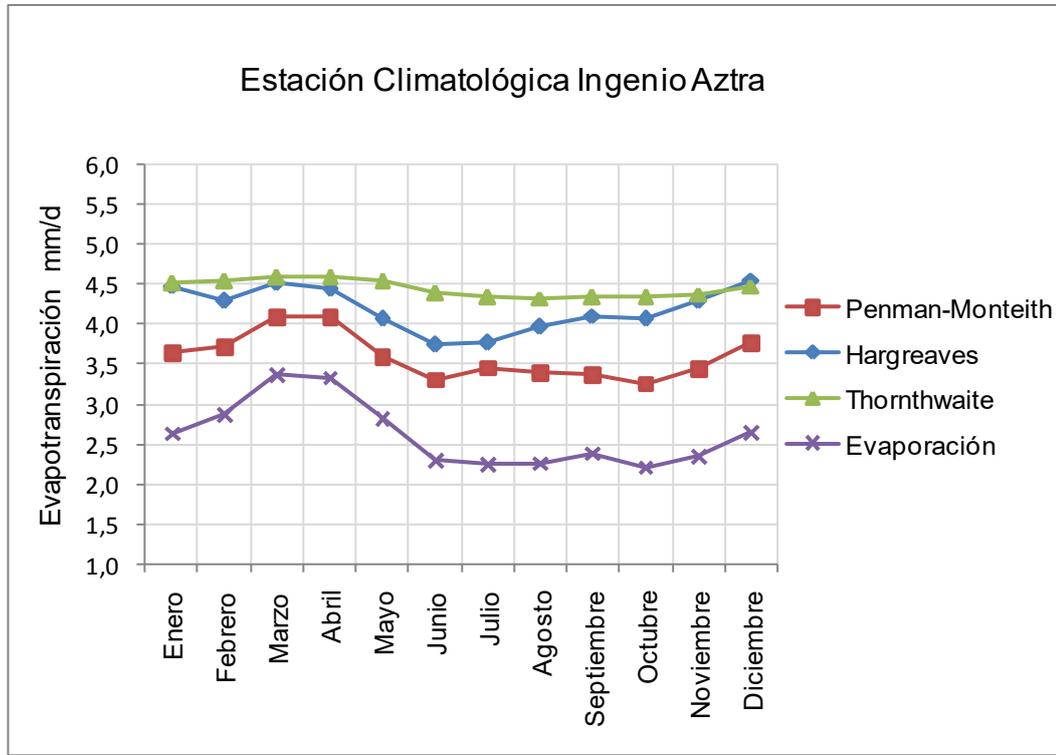


Figura 6. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Ingenio Aztra para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXIV. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	25%	33%	35%
Min	9%	12%	18%
Prom	17%	24%	27%

Como se aprecia en la tabla XXIV el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 17%

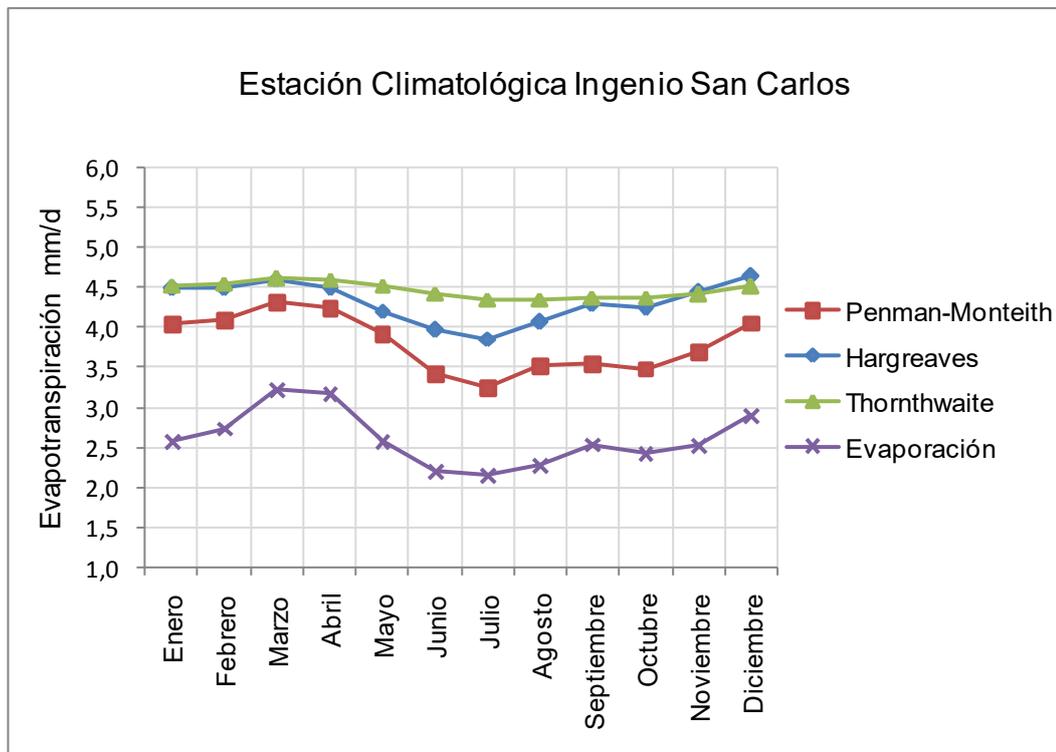


Figura 7. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Ingenio San Carlos para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXV. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	21%	34%	36%
Min	6%	7%	25%
Prom	14%	18%	32%

Como se aprecia en la tabla XXV el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 14%

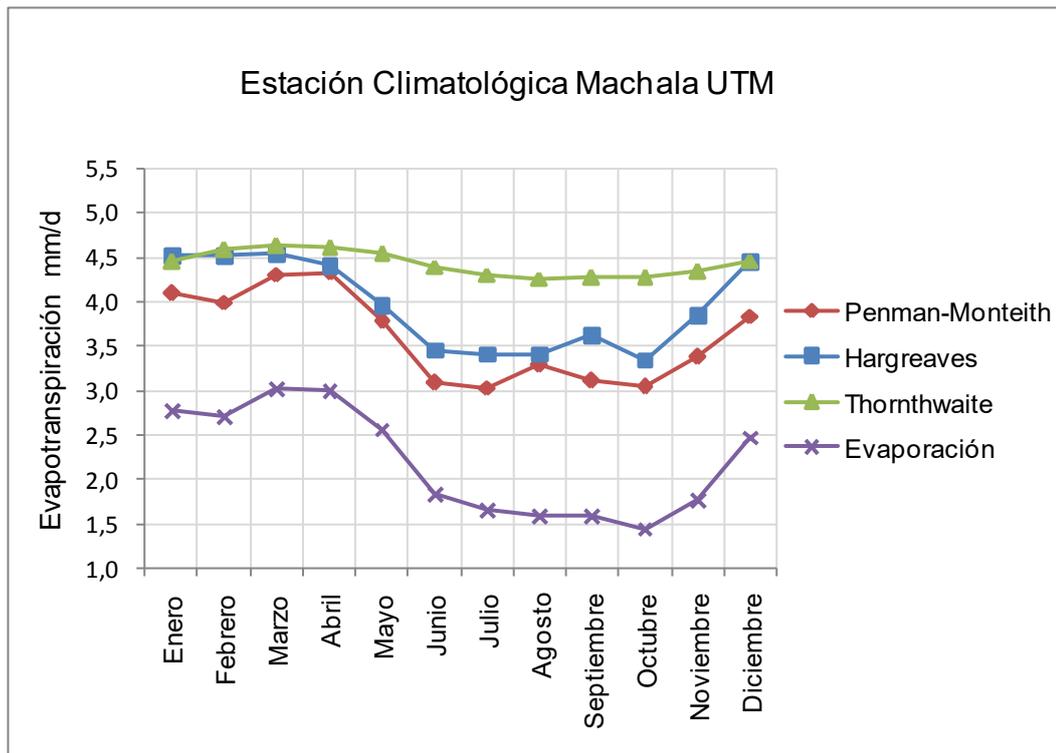


Figura 8. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Machala UTM para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXVI. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	16%	43%	53%
Min	2%	7%	30%
Prom	10%	25%	40%

La tabla XXVI refleja que el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 10%

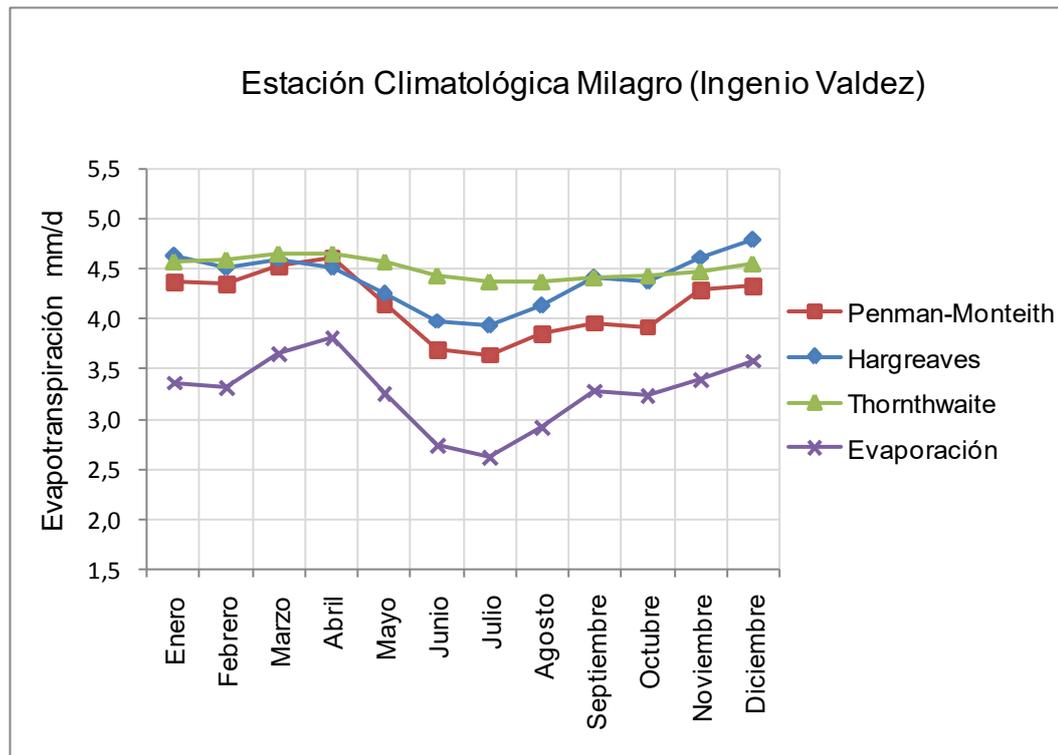


Figura 9. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Milagro para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXVII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	11%	20%	28%
Min	2%	1%	17%
Prom	7%	9%	21%

Como se aprecia en la tabla XXVII el menos porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 7%

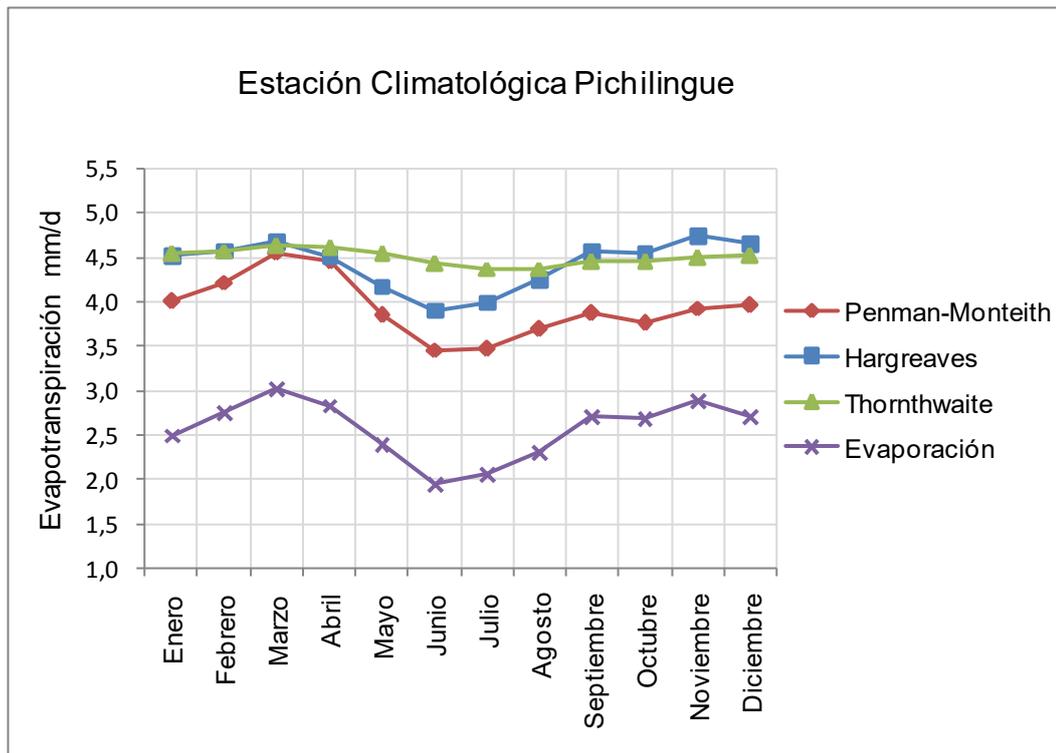


Figura 10. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica Pichilingue para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXVIII. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	21%	28%	43%
Min	1%	2%	27%
Prom	13%	15%	35%

Como se aprecia en la tabla XXVIII el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 13%

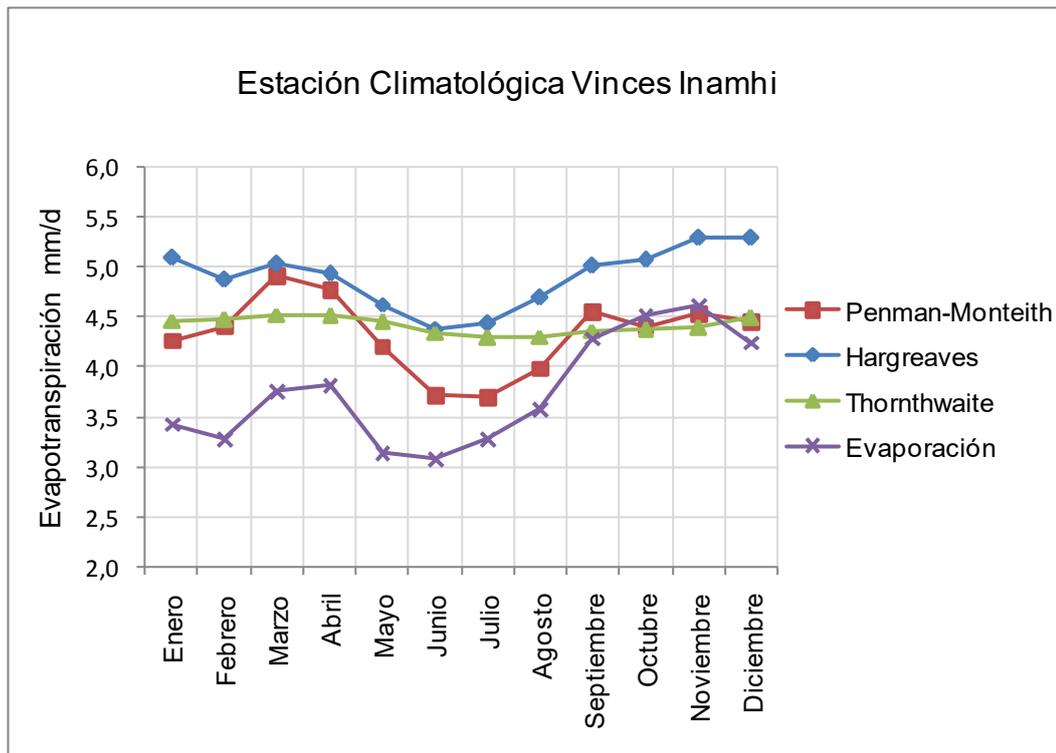


Figura 11. Representa el resultado de la evapotranspiración calculado mediante diversos métodos, con datos de la estación meteorológica VincesInamhi para un período de retorno de 2 años.

Tabla XXIX. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	20%	17%	26%
Min	3%	1%	2%
Prom	13%	6%	14%

A diferencia de los resúmenes anteriores el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Thornthwaite, que es del 6%, tal como se observa en la tabla XXIX.

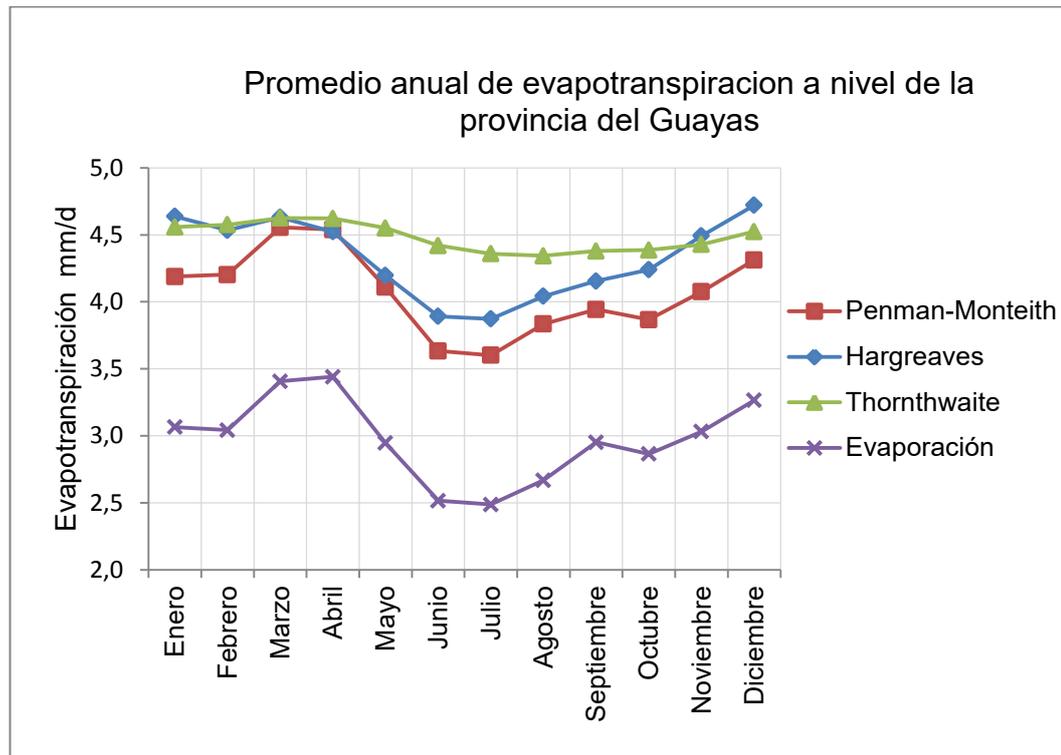


Figura 12. Promedio anual de evapotranspiración a nivel provincial

Tabla XXX. Diferencia en porcentaje que existe luego de comparar los resultados de evapotranspiración de cada método expuesto con el de Penman-Monteith

	Hargreaves	Thornthwaite	Evaporación
Max	11%	22%	31%
Min	0%	2%	1%
Prom	6%	10%	24%

A diferencia de los resúmenes anteriores el menor porcentaje de diferencia lo presenta el resultado obtenido con el método de Hargreaves, que es del 6%, tal como se observa en la Tabla XXX

3.8 Elaboración de mapas

Para presentar los resultados de manera gráfica se realizaron mapas raster, para ello se utilizó la metodología de interpolación de datos a partir de la información procesada estadísticamente de las estaciones climáticas. El proceso de interpolación fue realizado en las herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica): ARCGIS

Existen múltiples métodos de interpolación que producen diversos resultados. En el caso de datos climáticos, se recomienda el uso de los métodos THIN – PLATE SPLINE (Zheng and Basher, 1995; Boer et al, 2001; Hancock and Hutchinson, 2006) e INVERSE DISTANCE WEIGHTING (Hartkamp et al, 1999; Drešković and Đug, 2012). En el presente caso, se utilizaron ambos métodos de interpolación, para luego realizar una validación de modelos con la ayuda de los coeficientes de "Bondad de Ajuste" que indicó que para el presente estudio es viable utilizar cualquiera de los dos métodos de interpolación a nivel raster. Sin embargo no se presenta el método de interpolación IDW ya que genera círculos de interpolación en la vecindad de las estaciones meteorológicas a los que se los conoce como "Bull Eyes" y podrían no ser característicos del comportamiento climático en la región analizada.

Coeficiente de determinación:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n [O_i - \bar{O}] [Y_i - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [O_i - \bar{O}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}]^2}} \right)^2 \quad \text{Ec. 25}$$

Donde:

O Datos observados

\bar{O} Promedio de datos observados

Y Datos interpolados

\bar{Y} Promedio de datos interpolados

Eficiencia del modelo:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [O - Y_i]^2}{\sum_{i=1}^n [O_i - \bar{O}]^2} \quad \text{Ec. 26}$$

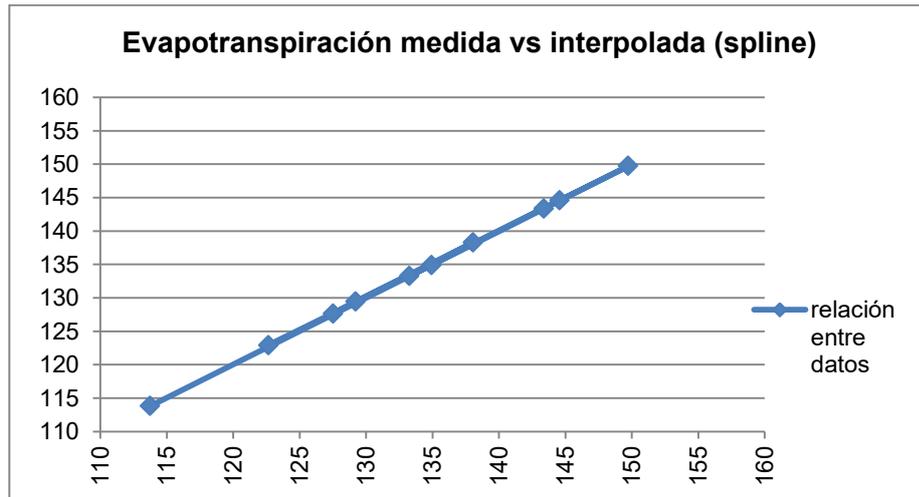
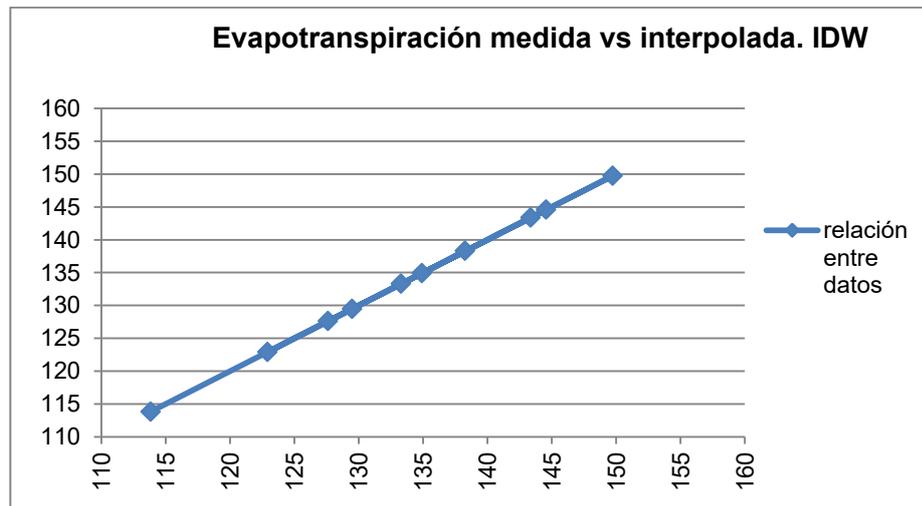
Índice de acuerdo:

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [O - Y_i]^2}{\sum_{i=1}^n [|Y_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|]^2} \quad \text{Ec. 27}$$

La bondad de ajuste de modelos indica que mientras más cercano a uno sea el resultado del coeficiente de determinación, índice de eficiencia del modelo e índice de acuerdo, se interpretará que el modelo es válido.

Tabla XXXI. Bondad de ajuste del modelo por interpolación IDW y Spline

Bondad de ajuste del modelo	Evapotranspiración (mm)		
	r^2	NS	W
Interpolación IDW	0.999998	0.999998	0.999763
Interpolación Spine	0.999913	0.999838	0.999724

**Figura 13:** Relación entre datos de ET medida y ET interpolada. Spline**Figura 14:** Relación entre datos de ET medida y ET interpolada. IDW

La tabla XXI presenta que el modelo resultado de la interpolación efectuada con el método IDW arroja valores muy cercanos a uno de la misma manera que el método Spline, lo que se refleja en las figuras 13 y 14 donde se observa que los datos de ET medidos y los de ET interpolados se relacionan linealmente. Sin embargo en este estudio se considera el método Spline para evitar los errores de interpolación que puedan generarse por el efector “Bull eyes”.

De la misma manera se realizó el cálculo de los coeficientes de bondad de ajuste para los métodos alternos como son: Hargreaves, Thornthwaite y Evaporación para datos de evapotranspiración y precipitación que serán utilizados en el cálculo de balance hídrico presentado en el capítulo 4, pero no se muestran ya que la diferencia de errores son del orden de 1×10^{-5} , lo cual nos permite concluir que es válido utilizar el modelo resultado de la interpolación utilizando el método Spline. Los datos presentados de evapotranspiración en esta sección corresponden al mes de abril, se consideró ese mes ya que es cuando la provincia tiene mayores precipitaciones, lo cual ayuda a la visualización a nivel raster, sin embargo se realizó mapas raster para cada mes.

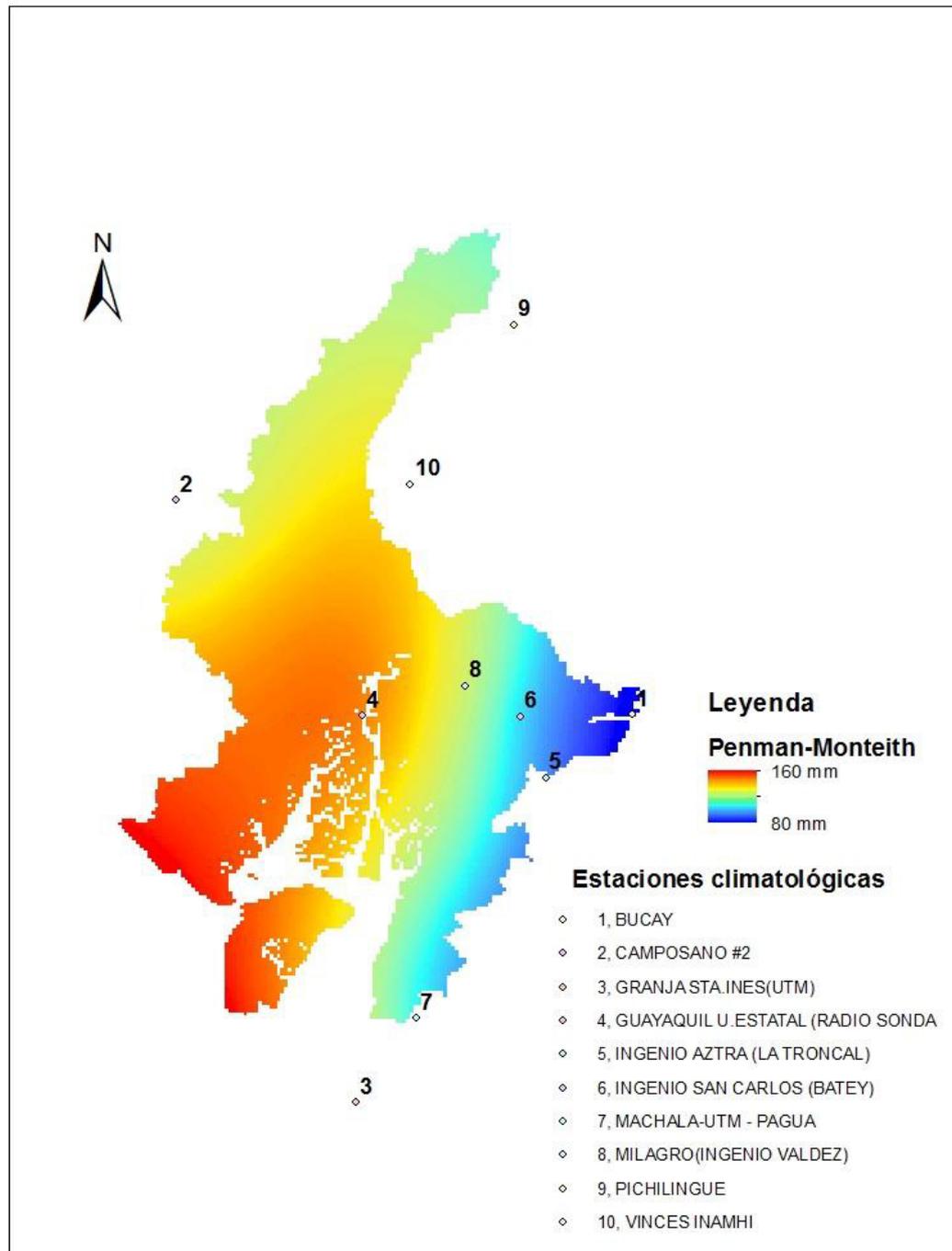


Figura 15. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Penman-Monteith para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.

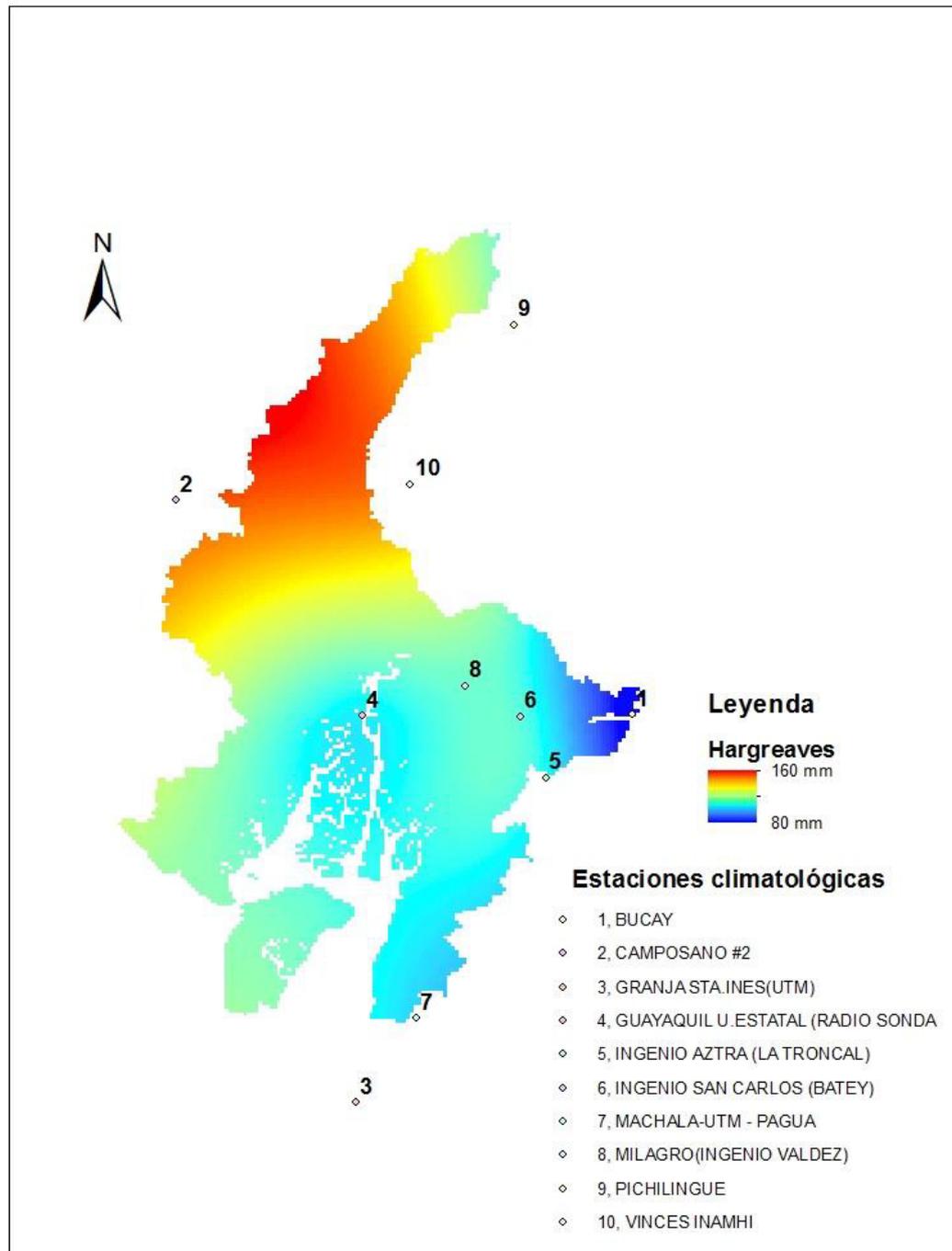


Figura 16. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Hargreaves para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.

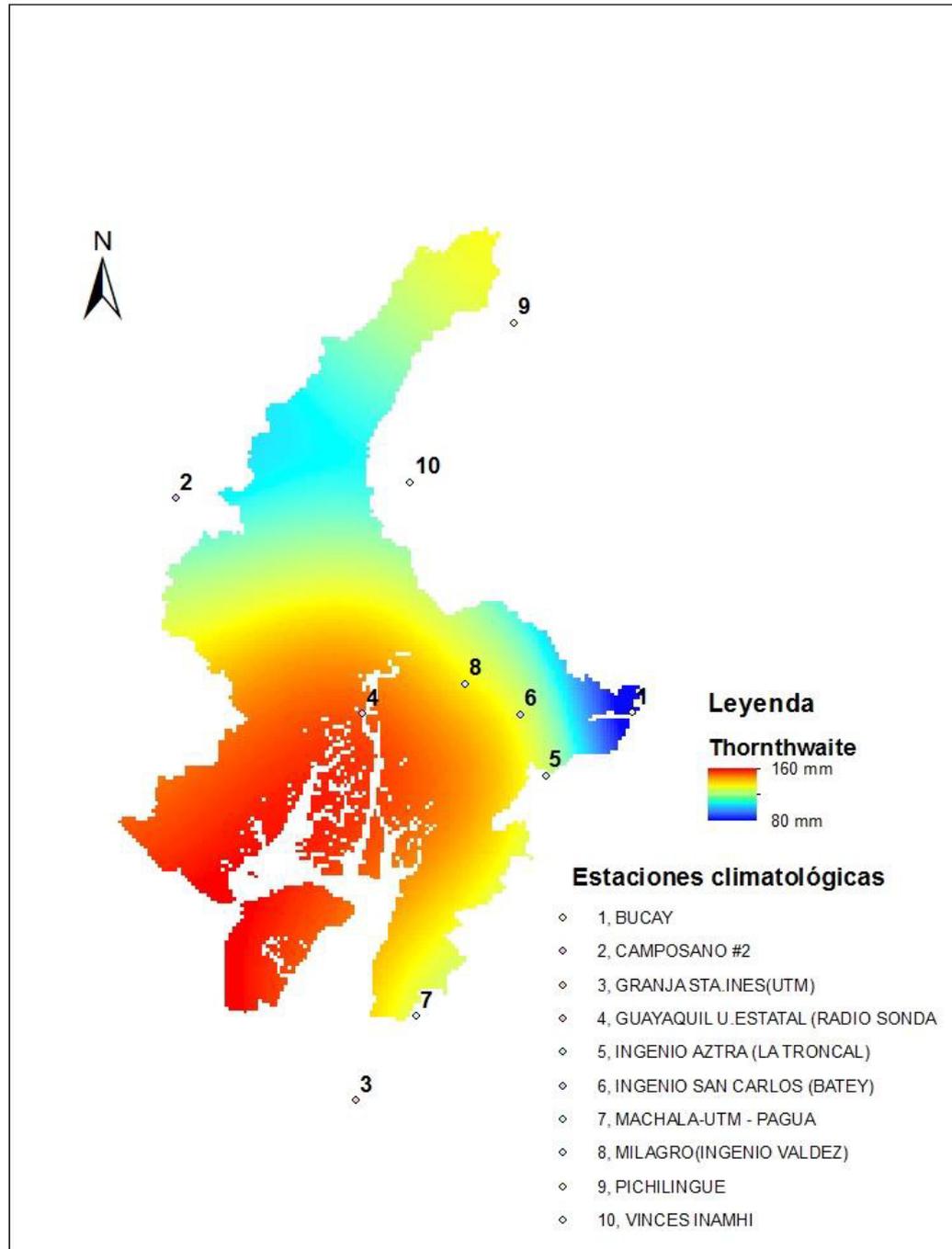


Figura 17. Mapa provincial de evapotranspiración evaluado con el método Thornthwaite para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.

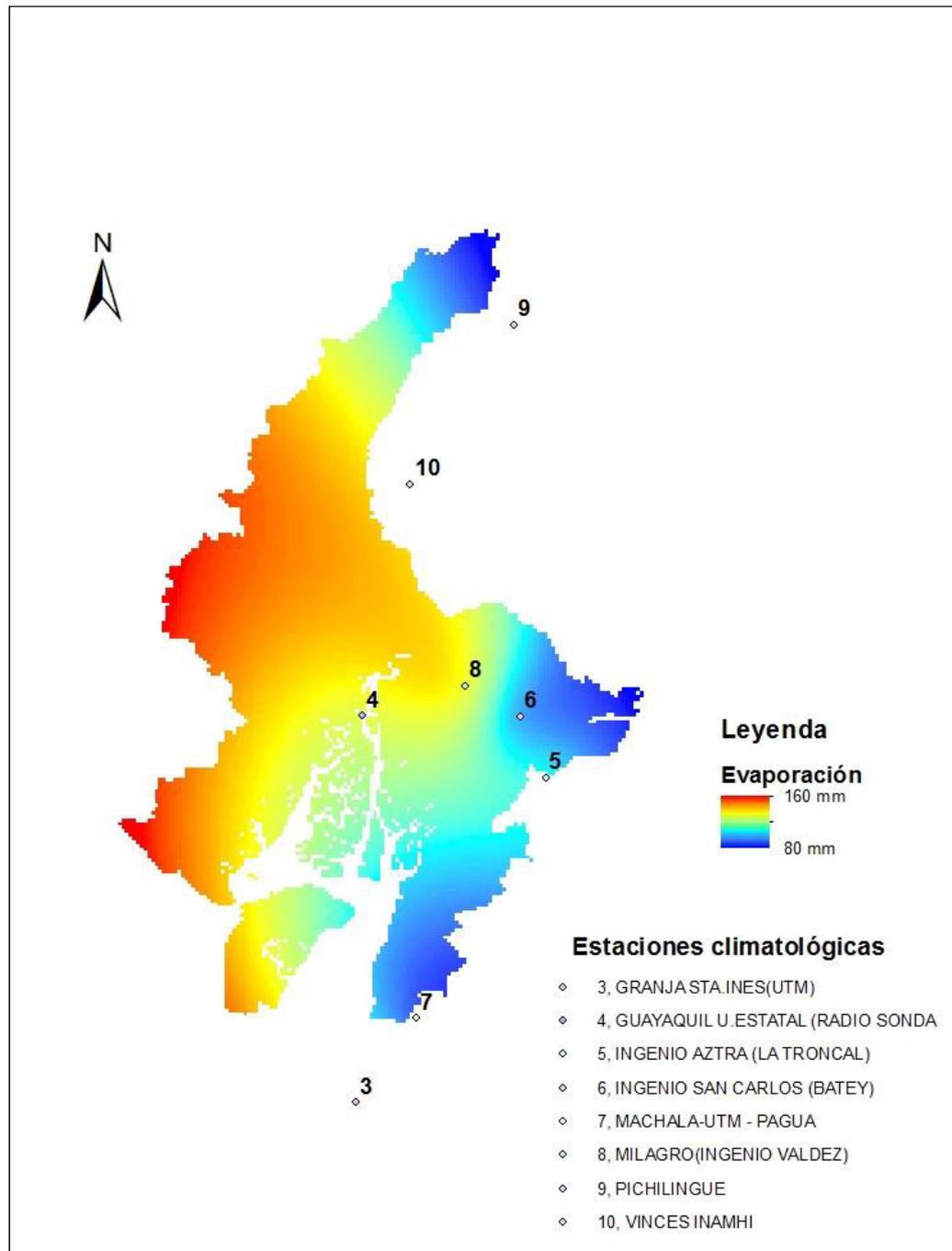


Figura 18. Mapa provincial de evapotranspiración usando la evaporación para el mes de abril y un período de retorno de 2 años.

CAPITULO 4

4 MODELO DE BALANCE HIDRICO

4.1. Datos Utilizados

El balance hídrico es muy importante para el ciclo hidrológico y para evaluar el recurso agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. Con los datos del balance hídrico es posible comparar recursos específicos de agua en un sistema en diferentes períodos de tiempo, y establecer el grado de influencia en las variaciones del régimen natural.

Para este capítulo analizaremos los resultados de evapotranspiración por 3 métodos:

- ✓ Penman-Monteith
- ✓ Hargreaves
- ✓ Thornwaite

Debido a que presentan cierto grado de similitud, lo cual hace más fácil el análisis.

Las estaciones utilizadas fueron mostradas en el capítulo anterior, se ha añadido el dato de precipitación para cada estación y para diferentes períodos de retorno.

4.2. Modelo Conceptual

El balance hídrico se basa en el principio de conservación de masas mejor conocido como el principio de la continuidad, para cualquier zona, cuenca natural o masa de agua. En general las entradas en la ecuación comprenden la precipitación en forma de lluvia o nieve y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la masa de la tierra, por otra parte las salidas incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de de agua y la salida de corriente de agua superficial y subterránea desde la masa de agua considerada en el estudio. De forma resumida para la provincia del Guayas tenemos la siguiente expresión.

$$**BH = Precipitación (mm) – Evapotranspiración (mm) Ec. 28**$$

A continuación se muestra promedio mensual de Balance hídrico a nivel de la provincia del Guayas determinada a partir de evapotranspiración resultado

de evaluar tres métodos. Es decir en la tabla XXX se tomaron se consideraron 10 estaciones ya que fueron las únicas que registraron los datos necesarios para evaluar la expresión de PM, para el cálculo del balance hídrico a partir de evapotranspiración utilizando en método HG se tomaron en cuenta 26 estaciones climáticas

Tabla XXXII. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas.Penman-Monteith

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Período de retorno (TR) de 2 años con una probabilidad del 50% de que los datos sean excedidos (condiciones normales)											
112	231	185	117	-31	-81	-45	-109	-103	-94	-93	-102
Período de retorno (TR) de 5 años con una probabilidad del 20% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Leve)											
253	369	347	282	77	-26	-27	-108	-73	-43	-36	-6
Período de retorno (TR) de 10 años con una probabilidad del 10% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Moderado)											
348	484	456	392	139	11	5	-105	-52	-8	2	60

Tabla XXXIII. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas.Hagreaves

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Período de retorno (TR) de 2 años con una probabilidad del 50% de que los datos sean excedidos (condiciones normales)											
43	137	106	68	-51	-88	-100	-113	-112	-113	-107	-75
Período de retorno (TR) de 5 años con una probabilidad del 20% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Leve)											
172	271	254	213	45	-34	-64	-105	-87	-98	-40	30
Período de retorno (TR) de 10 años con una probabilidad del 10% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Moderado)											
258	360	352	310	109	2	-41	-100	-71	-87	4	99

Tabla XXXIV. Promedio mensual de Balance Hídrico (mm) a nivel de la provincia del Guayas. Thornthwaite

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Período de retorno (TR) de 2 años con una probabilidad del 50% de que los datos sean excedidos (condiciones normales)											
44	132	100	57	-65	-103	-114	-122	-115	-116	-105	-72
Período de retorno (TR) de 5 años con una probabilidad del 20% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Leve)											
171	263	244	199	25	-51	-80	-114	-92	-101	-41	29
Período de retorno (TR) de 10 años con una probabilidad del 10% de que los datos sean excedidos (potencialmente coincide con un evento de Fenómeno del Niño Moderado)											
254	351	339	292	85	-16	-58	-108	-77	-91	1	96

4.3. Determinación de áreas de influencia de cada método de utilizado para la determinación de Evapotranspiración en la provincia del Guayas

Los modelos para determinar el balance hídrico a nivel hídrico fueron validados con los índices de “bondad de ajuste de modelos”.

Tabla XXXV. Bondad de ajuste del modelo por interpolación IDW y Spline

Bondad de ajuste del modelo	Precipitación (mm)		
	r^2	NS	W
Interpolación IDW	0.9999932	0.999979976	0.999993445
Interpolación Spine	0.999839511	0.999807303	0.999950025

La tabla XXXIV y la figura 17 presentan que tanto el modelo realizado con la interpolación IDW y Spline son válidos, ya que se relacionan linealmente por lo cual en esta sección se optó la utilizar el método Spline para evitar el efecto “bull eyes” que resultan dela interpolación IDW. De esa manera se

muestran los mapas obtenidos con la interpolación raster utilizando el método de interpolación Spline.

Método Penman-Monteith

Tabla XXXVI: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Penman-Monteith

Penman-Monteith		
Balance Hídrico	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)
Déficit Hídrico	126780000	84.52
Superávit Hídrico	23220000	15.48
Total	1500000	100

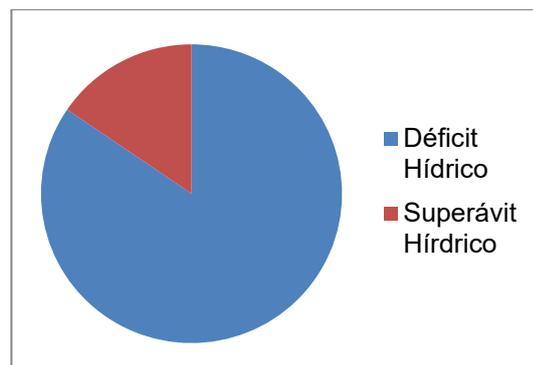


Figura 19: Proporción del balance hídrico provincial

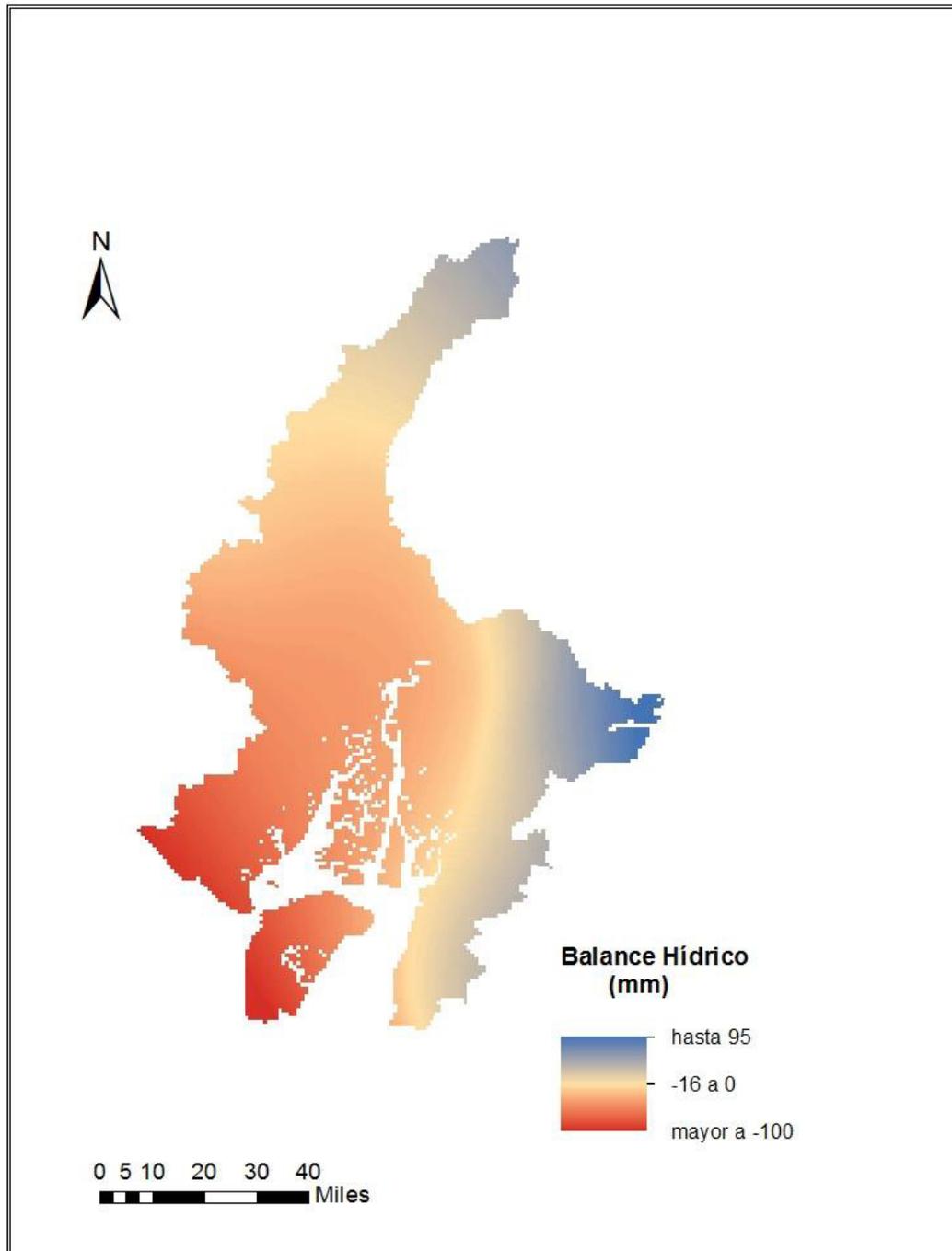


Figura 20: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Penman-Monteith

Método Hargreaves

Tabla XXXVII: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Hargreaves

Hargreaves		
Balance Hídrico	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)
Déficit Hídrico	125970000	83.98
Superávit Hídrico	24030000	16.02
Total	1500000	100

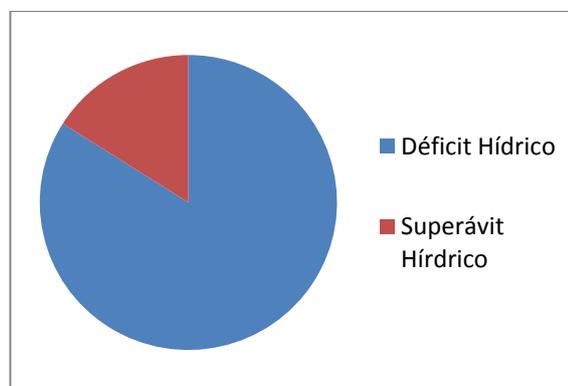


Figura 21: Proporción del balance hídrico provincial

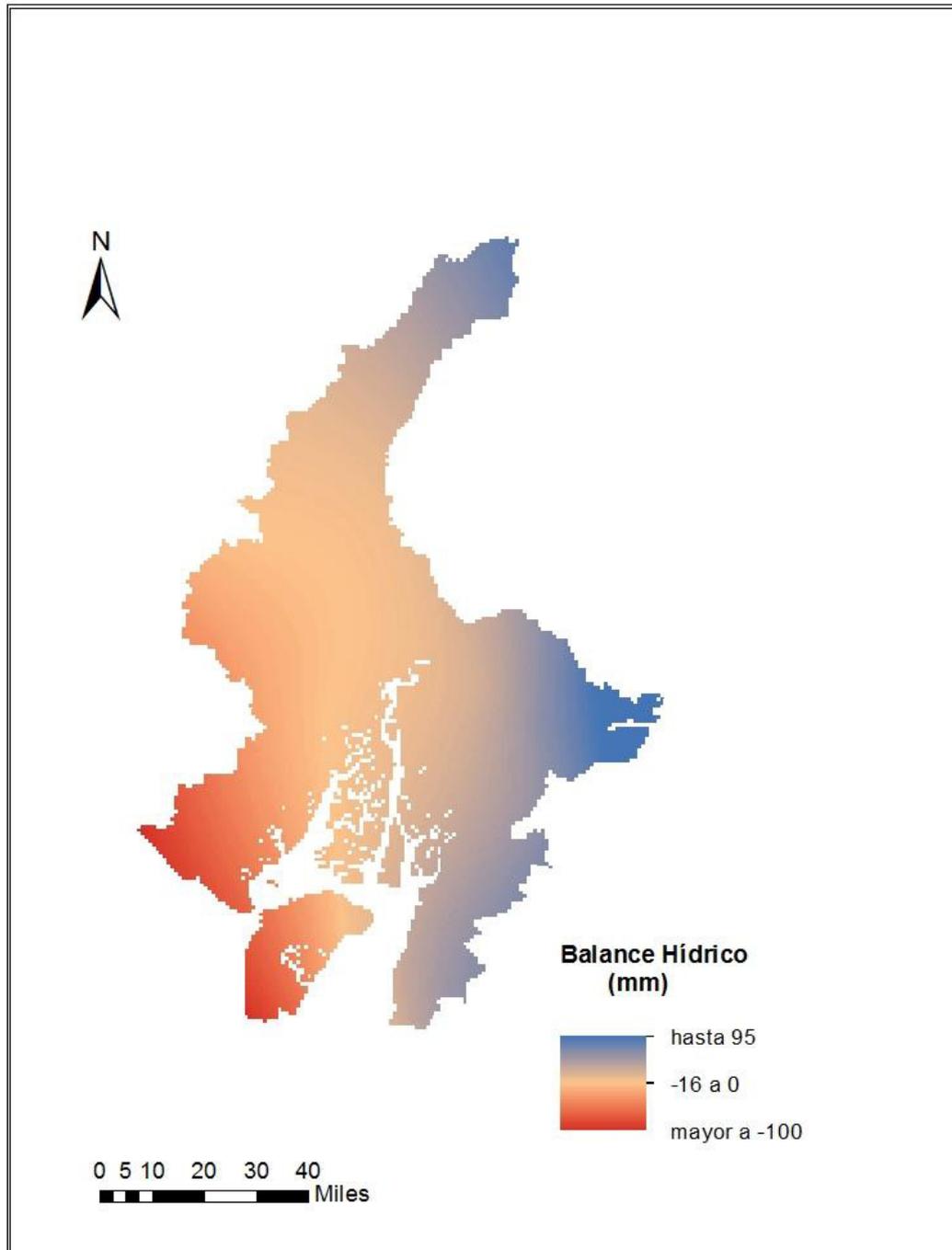


Figura 22: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Hargreaves

Método Thornthwaite

Tabla XXXVIII: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas según Thornthwaite

Thornthwaite		
Balance Hídrico	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)
Déficit Hídrico	129195000	86.13
Superávit Hídrico	20805000	13.87
Total	1500000	100

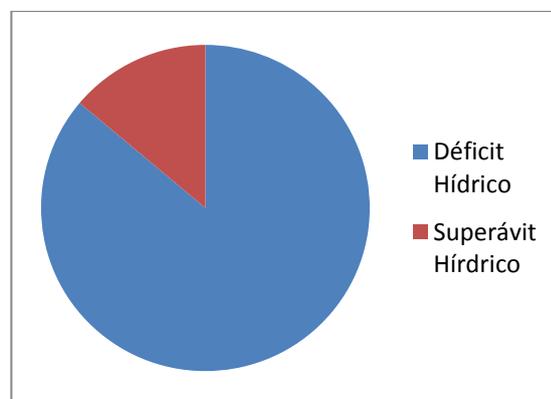


Figura 23: Proporción del balance hídrico provincial

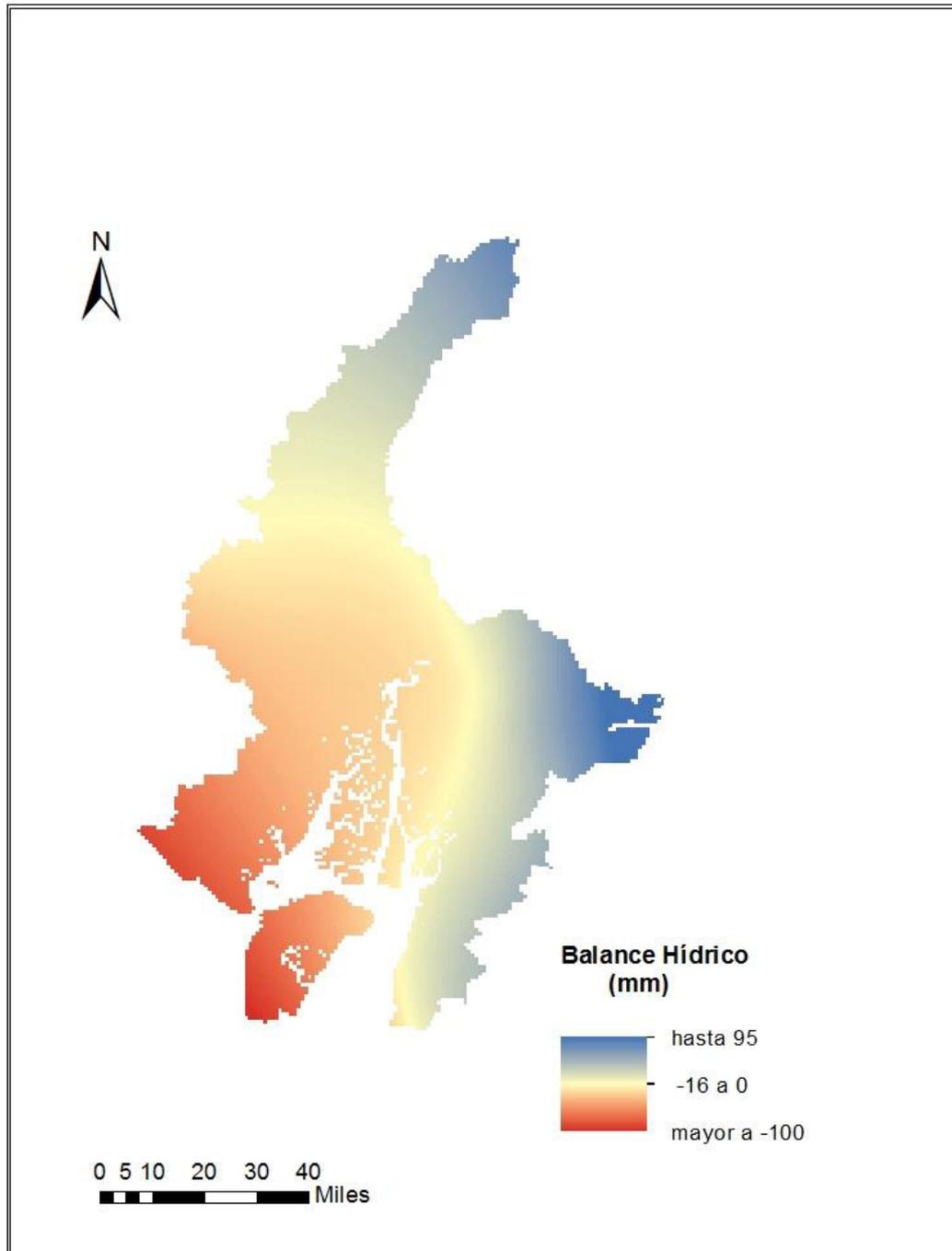


Figura 24: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Método Thornthwaite

Modelo Zonificado

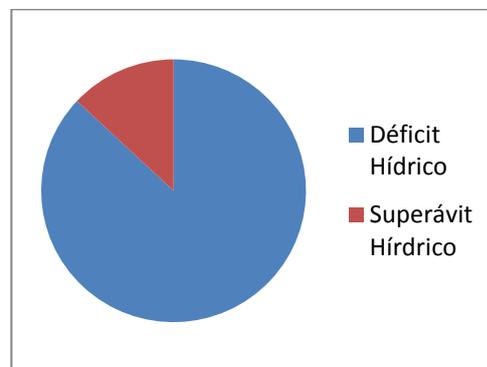
En esta parte del capítulo se expone un modelo alternativo donde se identificó que método se ajusta mejor a cada zona por estaciones a nivel provincial, es decir: partiendo de las 10 estaciones utilizadas en PM se determinó que promedio mensual de evapotranspiración evaluada ya sea con Hargreaves o Thornthwaite se ajusta mejor o tiene menor diferencia con el resultado de PM. El análisis fue presentado en el capítulo 3

Tabla XXXIX. Método utilizado para modelo zonificado a nivel provincial

Estaciones	Método Hargreaves	Método Thornthwaite
1.-Bucay	✓	
2.-Camposano 2		✓
3.-Granja Sta Ines		✓
4.-Guayaquil U Estatal		✓
5.-Ingenio Aztra La Troncal	✓	
6.-Ingenio San Carlos	✓	
7.-Machala UTM	✓	
8.-Milagro Ingenio Valdez		✓
9.-Pichilingue	✓	
10.-Vinces Inamhi	✓	

Tabla XL: Resumen de Déficit y Superávit hídrico en la provincia del Guayas.

Modelo zonificado		
Balance Hídrico	Superficie (Ha)	Porcentaje (%)
Déficit Hídrico	130455000	86.97
Superávit Hídrico	19545000	13.03
Total	1500000	100

**Figura 26:** Proporción del balance hídrico provincial

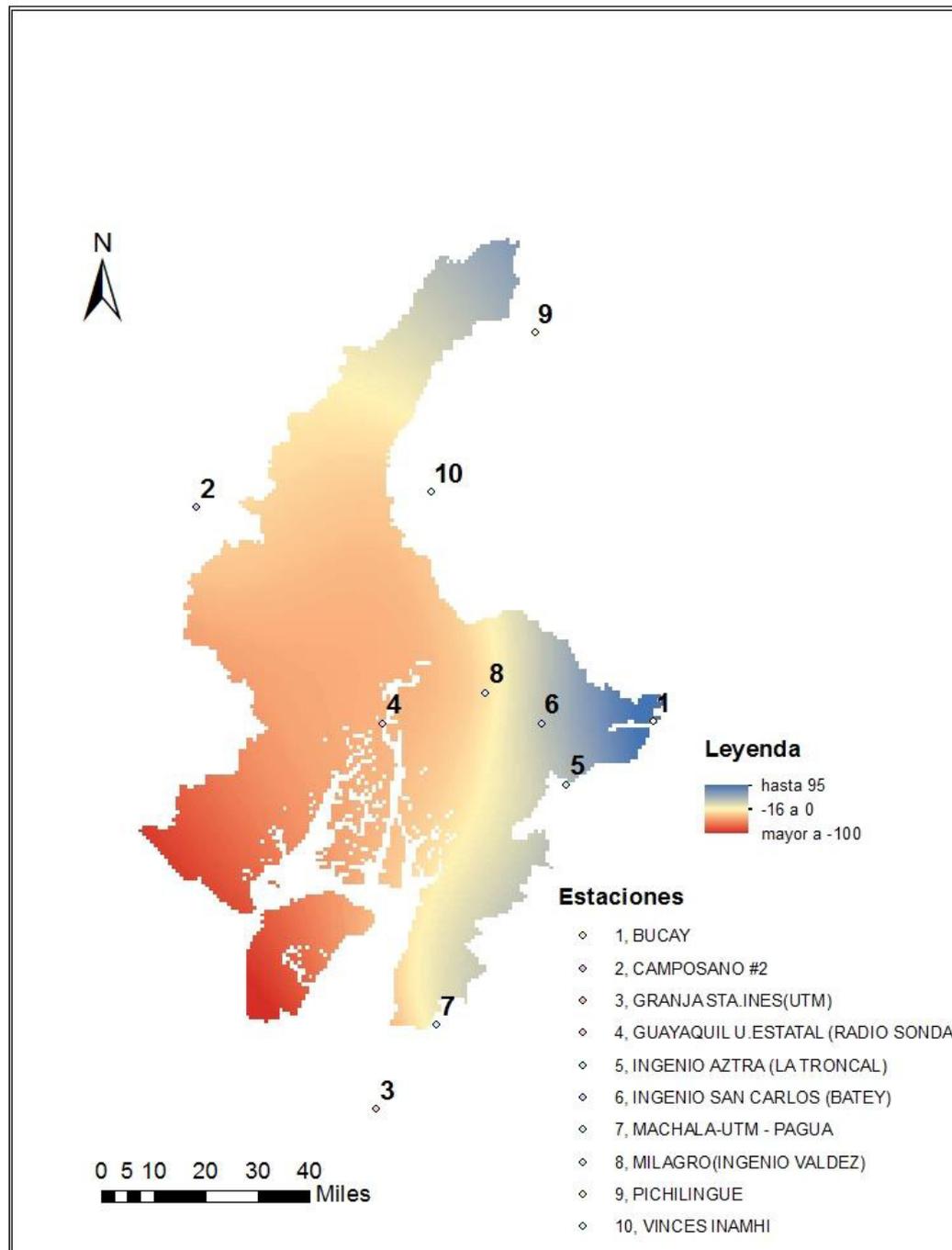


Figura 27: Balance Hídrico a nivel de la provincia del Guayas. Mapa zonificado

4.4. Análisis de resultados obtenidos en el Balance Hídrico

1. Se determinó el balance hídrico a partir de datos de evapotranspiración PM, el modelo presentado fue definido luego realizar una interpolación raster con la ayuda del método de Spline, de los cual se reflejan valores de déficit hídrico de -133mm lo que corresponde al 85% de la superficie total de la provincia del guayas por otra parte el 15% restante presenta valores de exceso hídrico que van desde 1mm a 95mm.
2. Los métodos alternos, Hargreaves y Thornthwaite presenta valores similares de porcentaje de déficit hídrico a nivel de la provincia del Guayas, en el orden del 84% y el 86% respectivamente.
3. Se propone un modelo zonificado a fin de minimizar errores en los métodos alternos el que luego de ser validado refleja valores de déficit hídrico desde -120mm que corresponde al 87% de la provincia y el 13% restante presenta exceso hídrico con valores máximos de 88mm.
4. En general los 3 método evaluados presenta el déficit hídrico se presenta en los meses de Mayo y Diciembre para un período de retorno de 2 años, desde Junio hasta Noviembre para un período de

retorno de 5 años y desde Julio a Octubre para un período de retorno de 10 años.

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. La evapotranspiración constituye un factor muy importante para realizar un correcto uso del recurso agua, para mejorar modelos hidráulicos e hidrodinámicos ampliamente utilizados en Ingeniería civil.
2. De acuerdo a la publicación realizada por la Fao donde expone al método Penman-Monteith como el único método aceptado para el cálculo de evapotranspiración del cultivo, se determinó cada de uno de las variables necesarias para así evaluar expresión general, debido a

que no todas las estaciones registran los datos climáticos importantes para PM solo se utilizaron diez estaciones climatológicas.

3. Se evaluaron métodos alternos para determinar la evapotranspiración tales como: Hargreaves, Thornthwaite el método usando la evaporación, debido a que en sus expresiones requieren datos que si son registrados en las estaciones climáticas ubicadas dentro de la provincia del guayas y en sus alrededores, en este caso se utilizaron 26, 28 y 21 estaciones climatológicas respectivamente.
4. En el análisis comparativo realizado a nivel de estaciones (cap. 3) teniendo en cuenta las ocho estaciones en común utilizadas en el método PM y los tres alternos HG, T y E, se aprecia que los valores de evapotranspiración resultado de evaluar las ecuaciones de Hargreaves y Thornthwaite presentan diferencia de entre el 4% al 17% respecto de los valores de evapotranspiración de PM.
5. Además se realizó el análisis comparativo a nivel provincial utilizando datos de promedio anuales en el cual el resultado de Evapotranspiración resultado de evaluar el método Hargreaves presenta una diferencia del 6% respecto del dato de PM, seguidamente esta Thornthwaite con el 10% y el método de la evaporación con el 24%.

6. Tomando en cuenta el modelo zonificado para la provincia del Guayas, en las zonas costeras el método utilizar es el de Thornthwaite y en las cercanías de las zonas montañosas resulta utilizar el método de Hargreaves.

5.2. Recomendaciones

1. Es importante determinar la cantidad de datos registrados en cada estación a lo largo del tiempo de análisis ya que pocos datos registrados serían no ser representativos. En este estudio solo se consideraron a las estaciones que cuentan con más de 5 registros durante el período 30 años.
2. El Inamhi y otras instituciones afines deberían implementar la instrumentación necesaria en cada o en la mayoría de las estaciones ubicadas dentro y/o en las zonas adyacentes al perímetro provincial para de esa manera contar con registros suficientes para determinar la evapotranspiración utilizando el método PM.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aparicio. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Distrito Federal, Mexico: Limusa.
2. G.Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración de Cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56.
3. Galeazzi, J., & Lutz, C. (2008). Distribución de Frecuencias de la evapotranspiración en el alto valle de Río Negro . Facultad de Ciencias Agrarias Universidad Nacional del Comahue , :233-234.
4. Ghamarnia, H., Rezvani, V., Khodaei, E., & Mirzaei, H. (2011). Time and Place Calibration Of the Hargreaves Equation for Estimating Monthly Reference Evapotranspiration under Different Climatic Conditions . Ciencias Agrícolas , :111-115.
5. Instituto de Hidrología de España; Organización de las naciones unidas para la educación, la ciencia y la cultura. (1981). Metodos de Cálculo de Balance Hidrico. Guía Internacional de investigación y métodos . Paris: Unesco.

6. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología -INAMHI-. (2014). Anuarios Meteorológicos desde el año 1982 al 2011. INAMHI ANUARIOS METEOROLÓGICOS , :19-119.
7. Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). Principles of Soil Physics. New York: Marcel Dekker Inc.
8. Maeffe, M. (2012). Desempeño de la ecuación de Hargreaves en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona de páramo en Trujillo, Venezuela. Rev. Fac. Agron. , :380-381.
9. Manzanares, E. P. (2014). Evaluación de Métodos para estimar evapotranspiración en dos diferentes condiciones climáticas en el noroeste de México. Texcoco: Institucion de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas .
10. Martínez, M. S. (03 de Octubre de 2001). Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Revisata de Geografía Norte Grande , :4-8.
11. Martínez, M. S. (2002). Modelos y Aproximaciones para la estimación de la evapotranspiracion con información satelital. Revista de Geografía Norte Grande , :107-108.

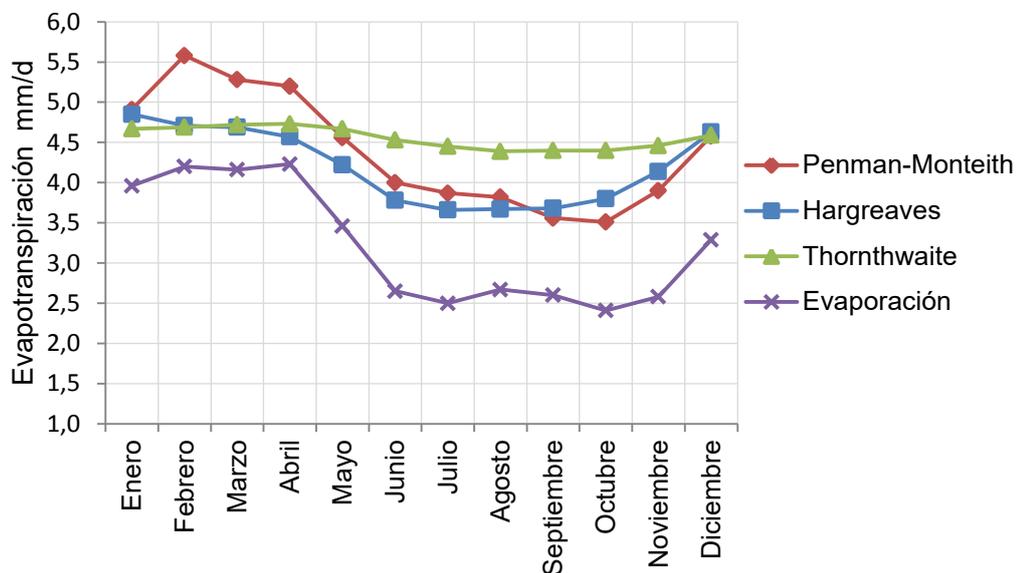
- 12.** Román, F. J. (01 de Octubre de 2010). Hidrogeología Hidrología Universidad de Salamanca España. Recuperado el 19 de 01 de 2015, de <http://hidrologia.usal.es/temas/Evapotransp.pdf>
- 13.** Román, F. J. (01 de Octubre de 2010). Hidrogeología Hidrología Universidad de Salamanca España. Recuperado el 27 de 01 de 2016, de http://hidrologia.usal.es/practicas/ET/ET_Hargreaves.pdf
- 14.** Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método Utilizar? Biagro, 20 (2), :90-91.
- 15.** Zotarelli, L., Dukes, M. D., Consuelo C Romero, K. W., & Morgan, K. T. (01 de Diciembre de 2009). Univerity of Florida IFAS EXTENSION . Recuperado el 31 de 01 de 2015, de <http://edis.ifas.ufl.edu/ae459>

ANEXOS

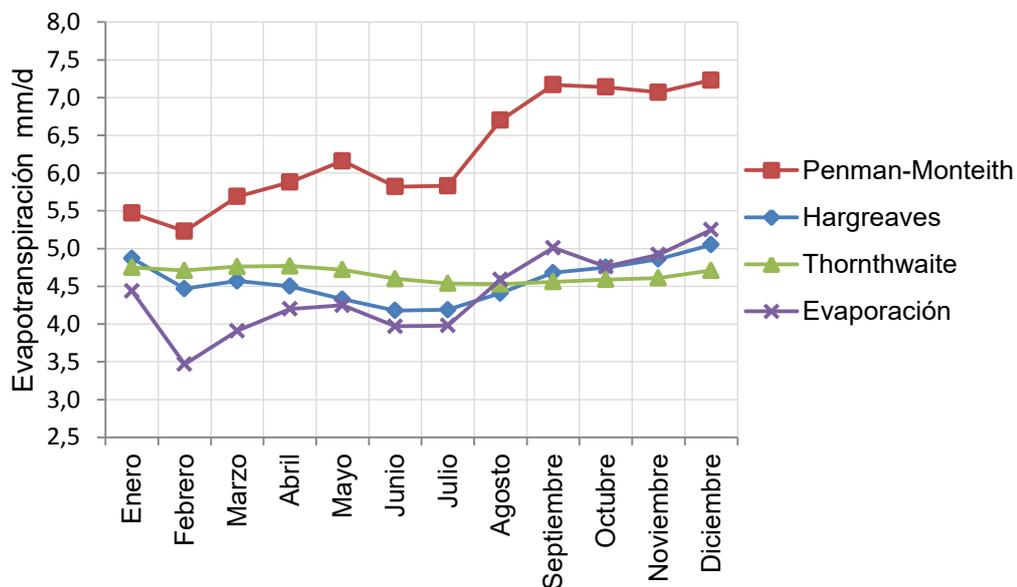
ANEXO A

**RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN MM/D
A NIVEL DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS PARA
PERÍODOS DE RETORNO DE 5 AÑOS.**

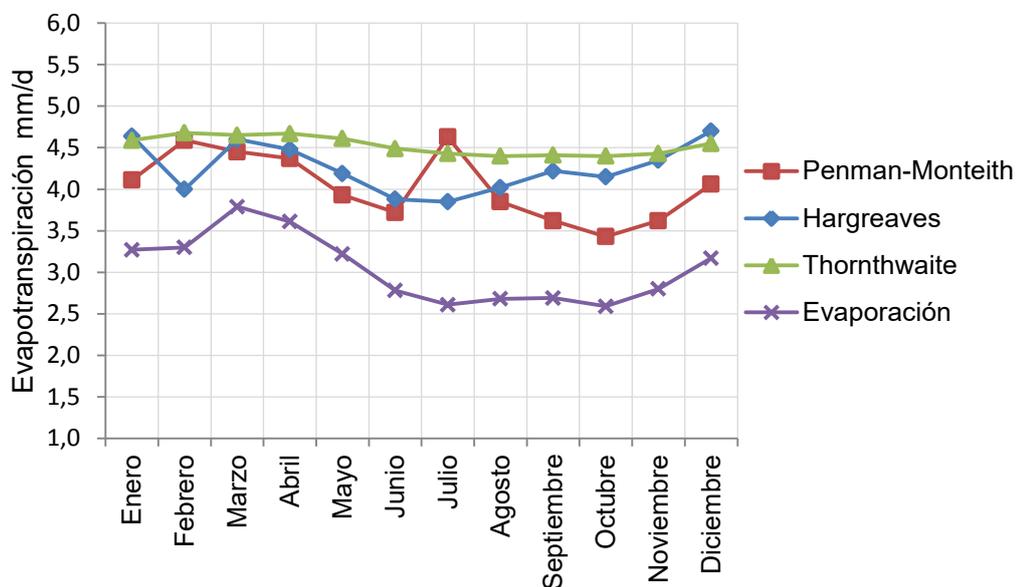
Estación meteorológica Granja Sta. Inés



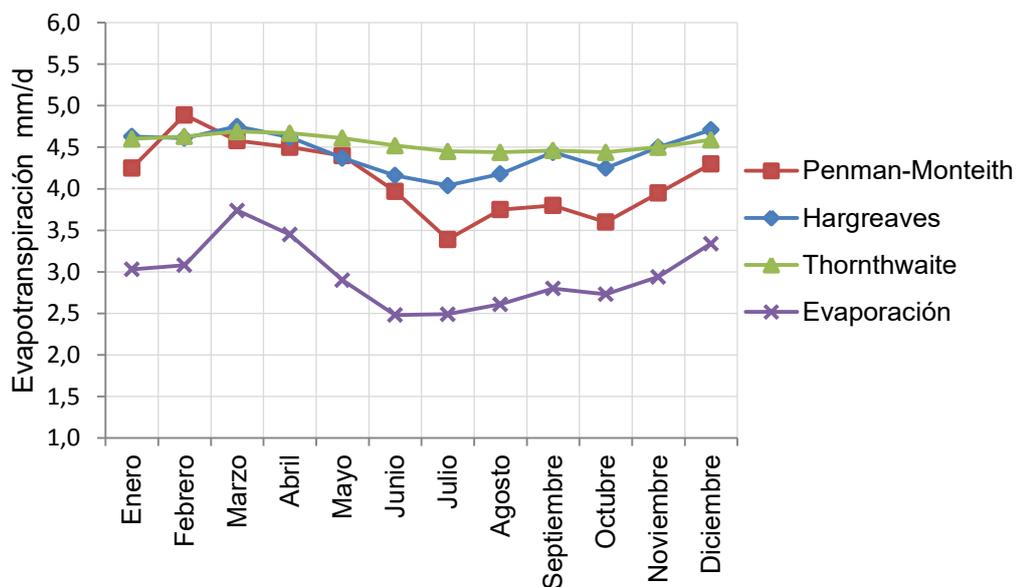
Estación Climatológica Guayaquil U. Estatal



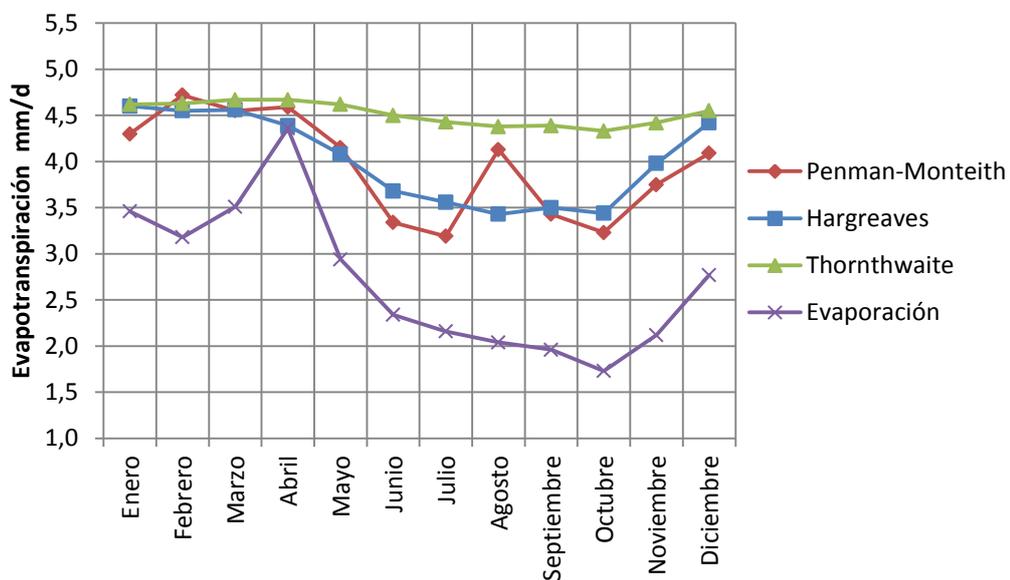
Estación Climatológica Ingenio Aztra



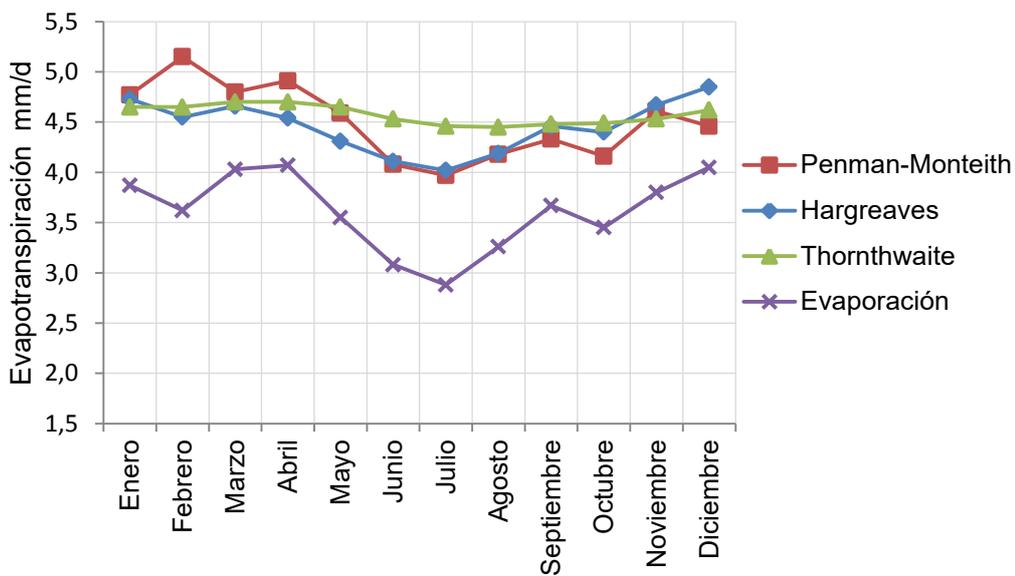
Estación Climatológica Ingenio San Carlos



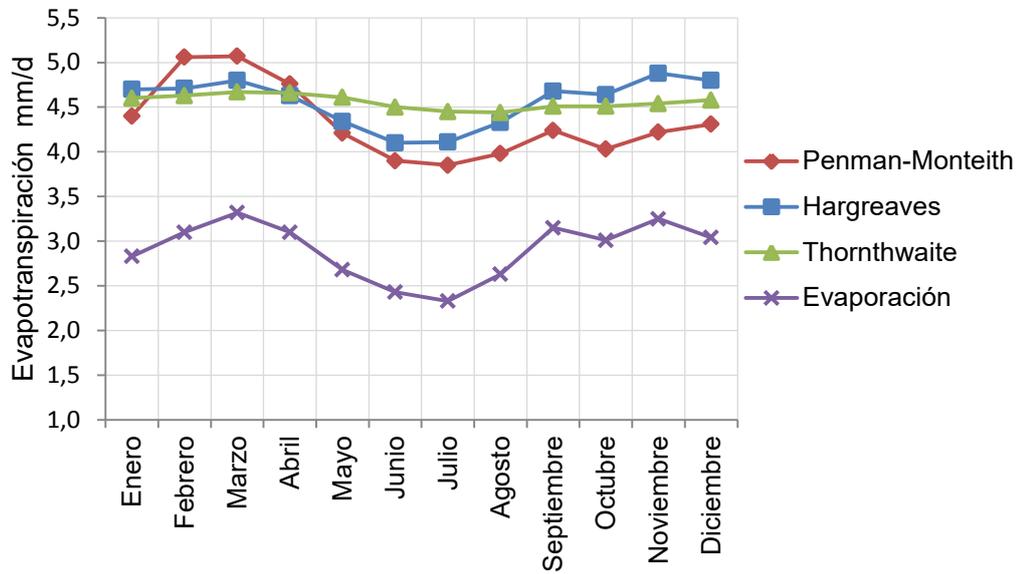
Estación Climatológica Machala UTM



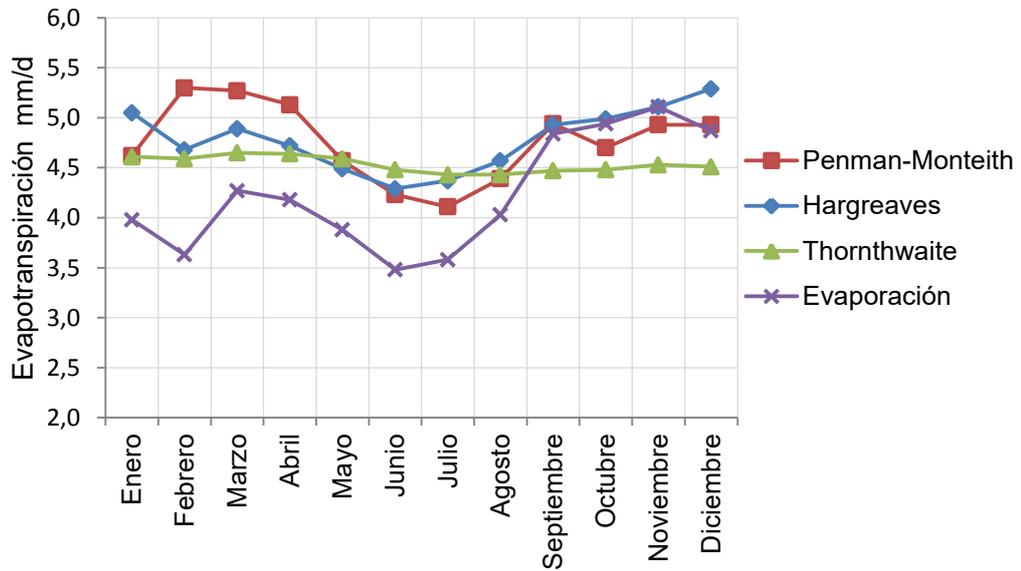
Estación Climatológica Milagro (Ingenio Valdez)



Estación Climatológica Pichilingue



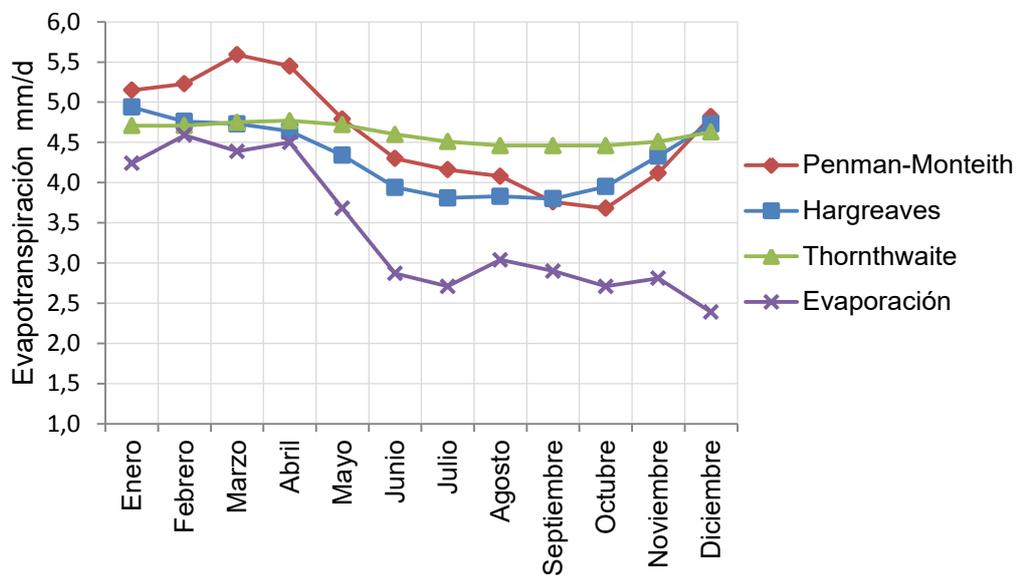
Estación Climatológica Vinces Inamhi



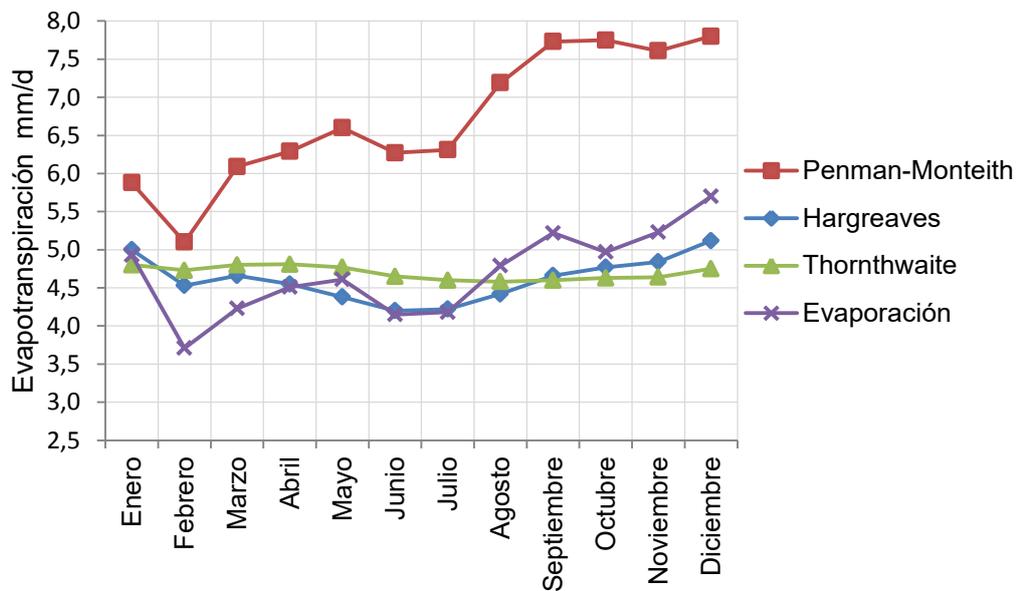
ANEXO B

**RESULTADOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EN MM/D
A NIVEL DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS PARA
PERÍODOS DE RETORNO DE 10 AÑOS.**

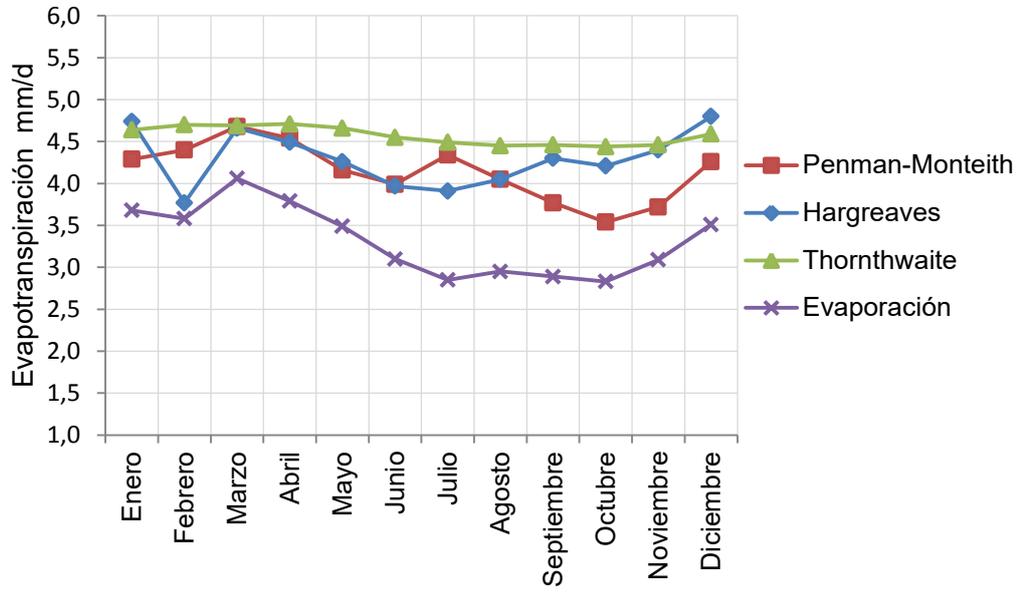
Estación meteorológica Granja Sta. Inés



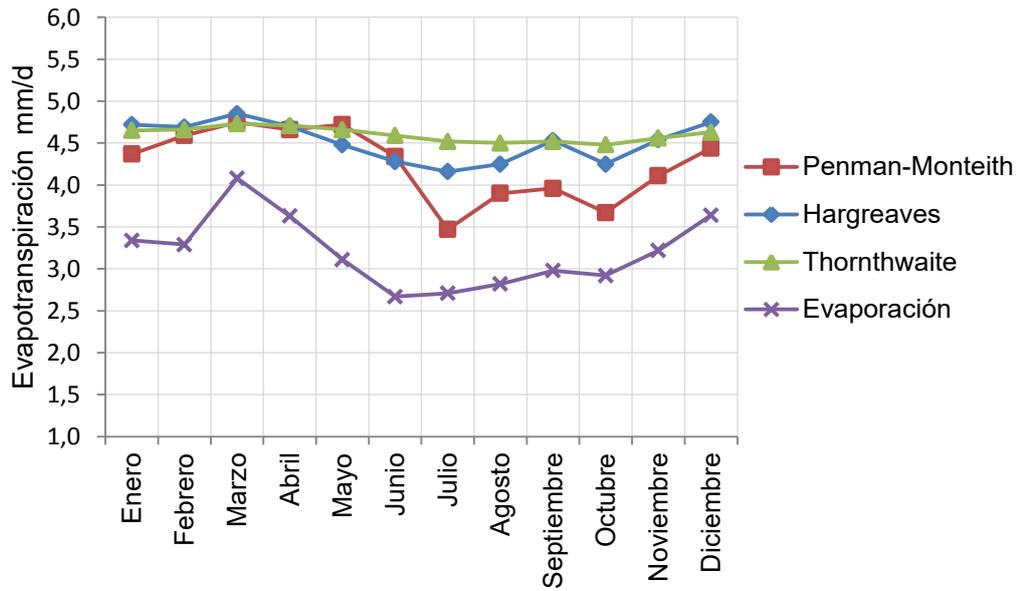
Estación Climatológica Guayaquil U. Estatal



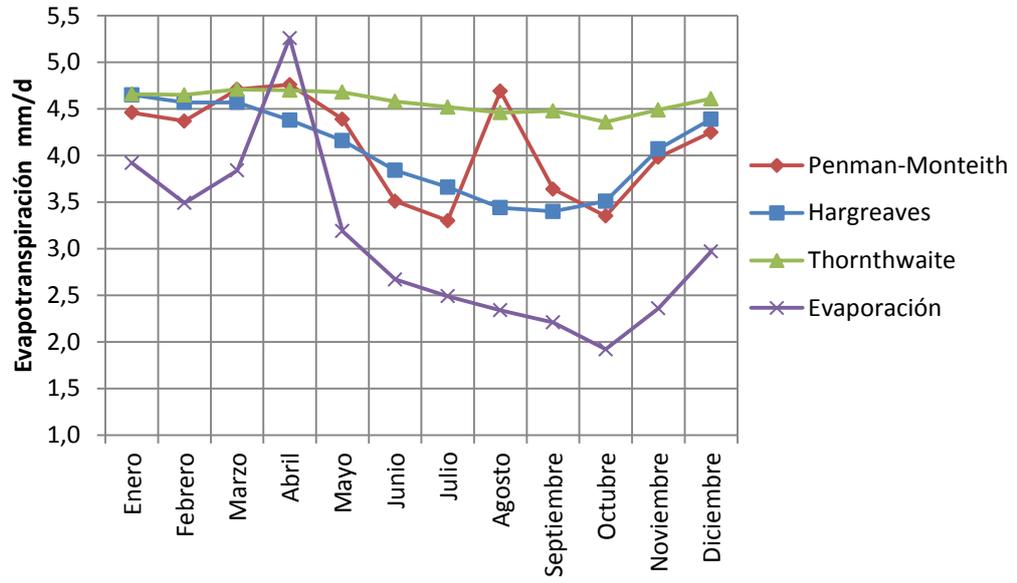
Estación Climatológica Ingenio Aztra



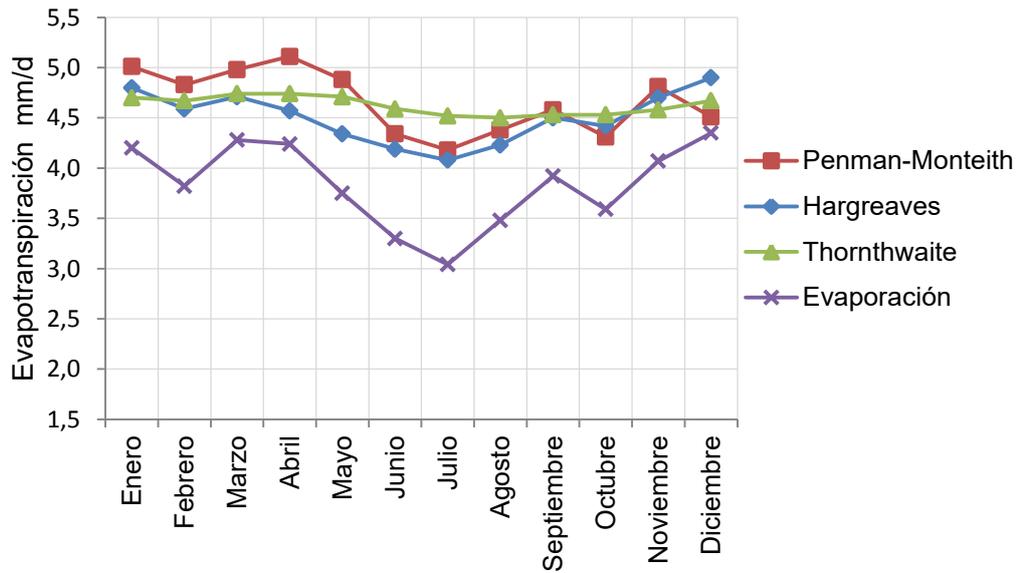
Estación Climatológica Ingenio San Carlos



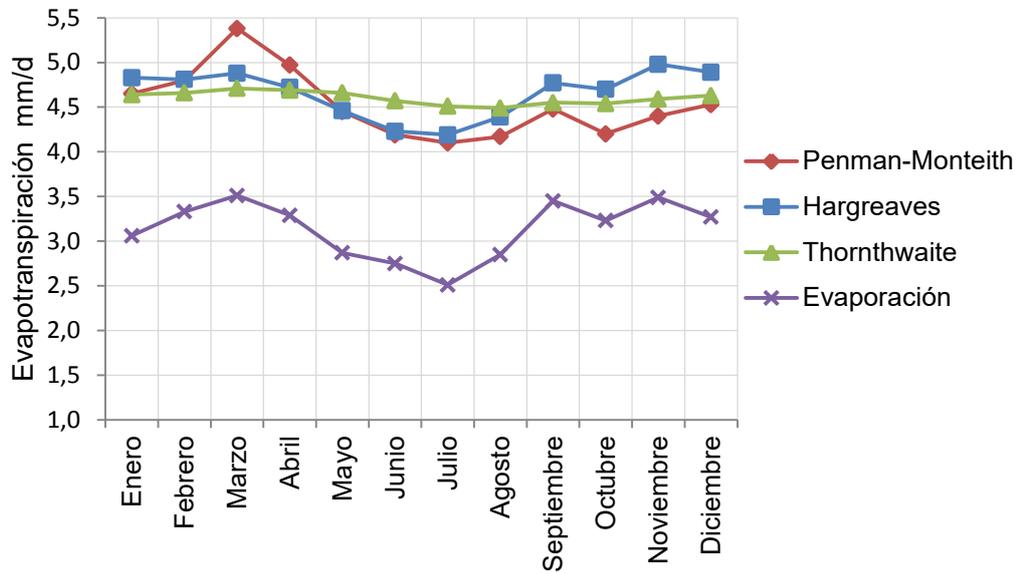
Estación Climatológica Machala UTM



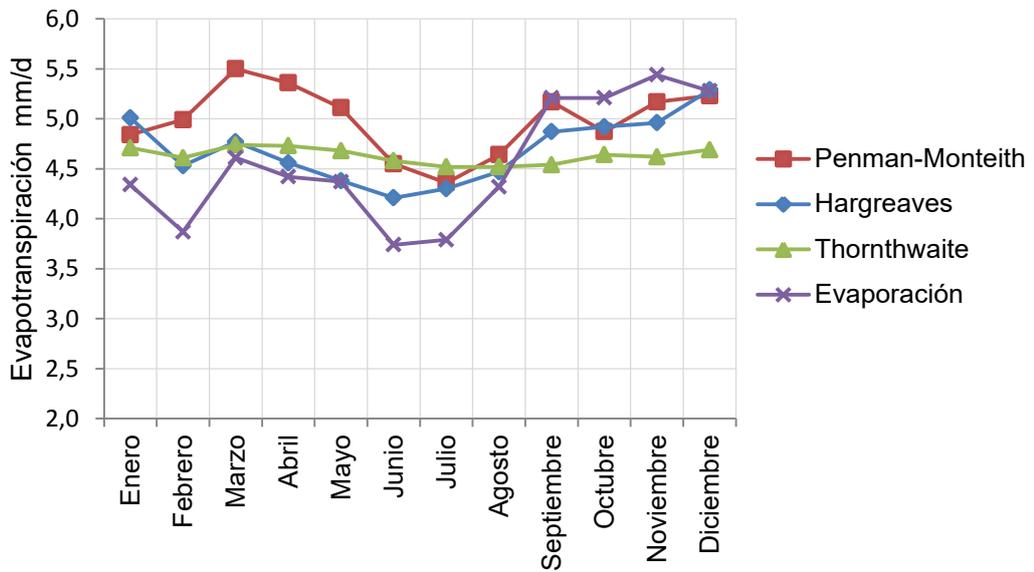
Estación Climatológica Milagro (Ingenio Valdez)



Estación Climatológica Pichilingue



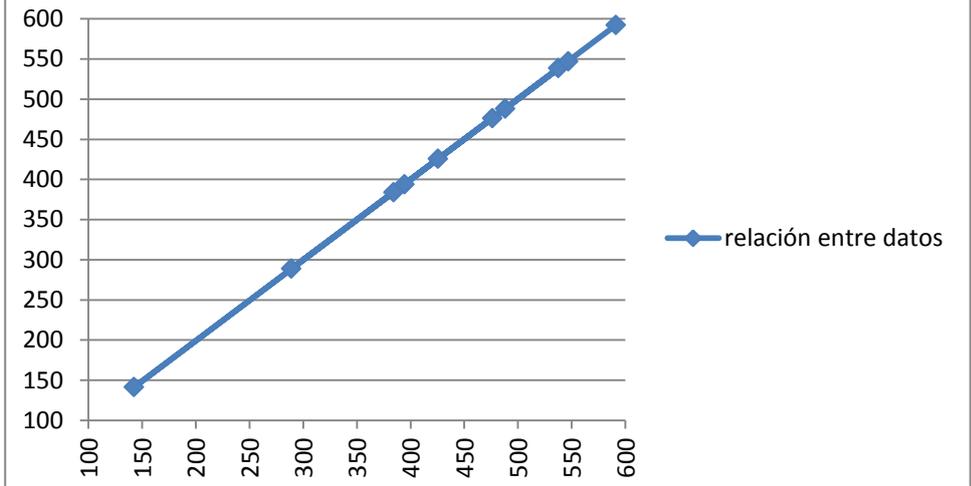
Estación Climatológica Vines Inamhi



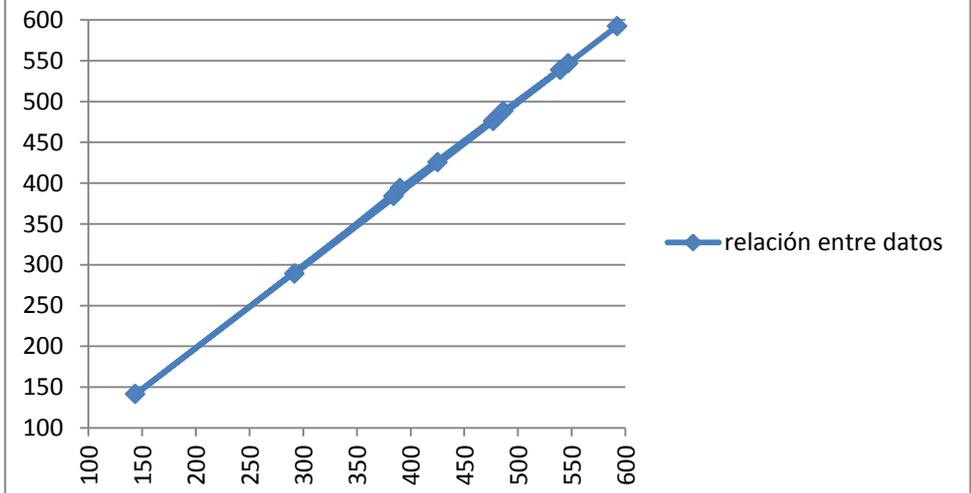
ANEXO C

BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO POR INTERPOLACIÓN IDW Y SPLINE

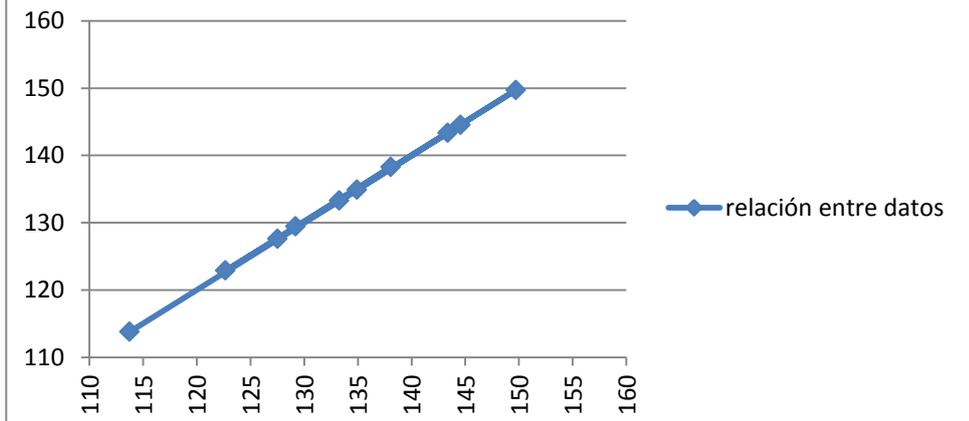
Precipitación medida vs Interpolada -IDW



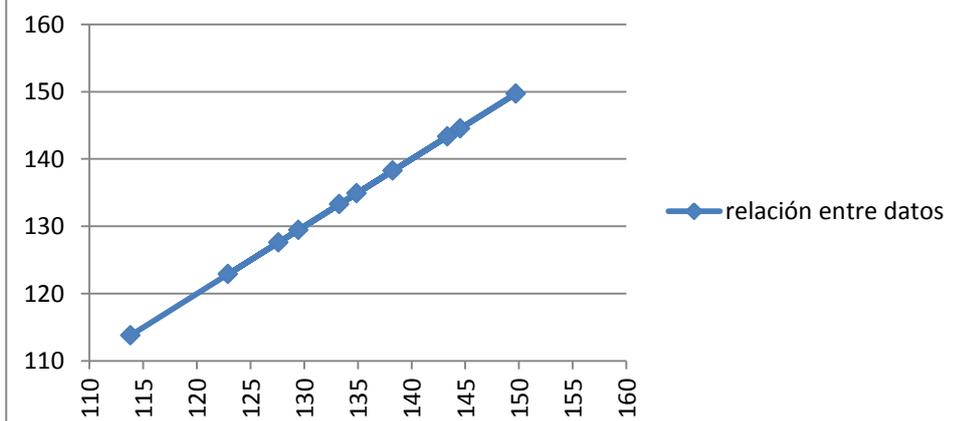
Precipitación medida vs Interpolada-Spline



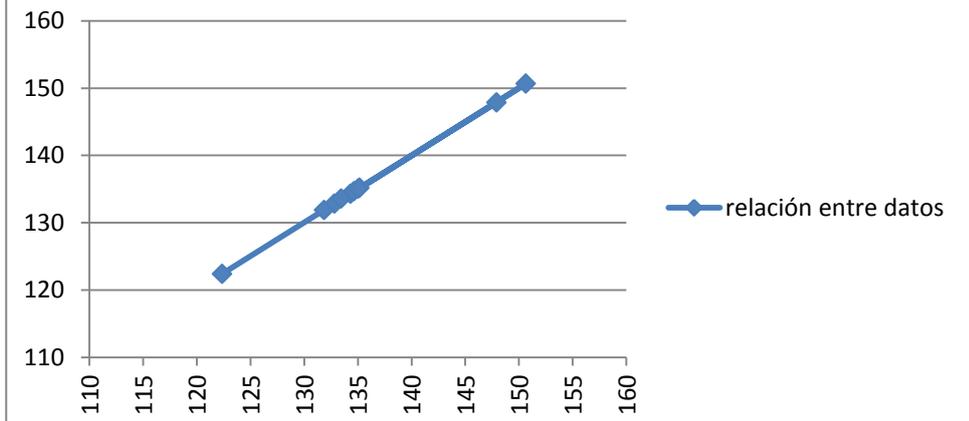
ETp medida vs ETp Interpolada- PM Spline



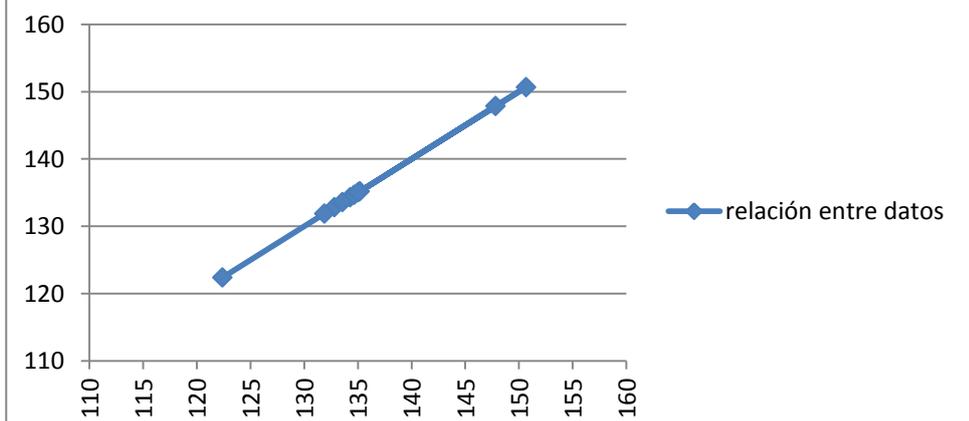
ETp medida vs ETp Interpolada- PM IDW



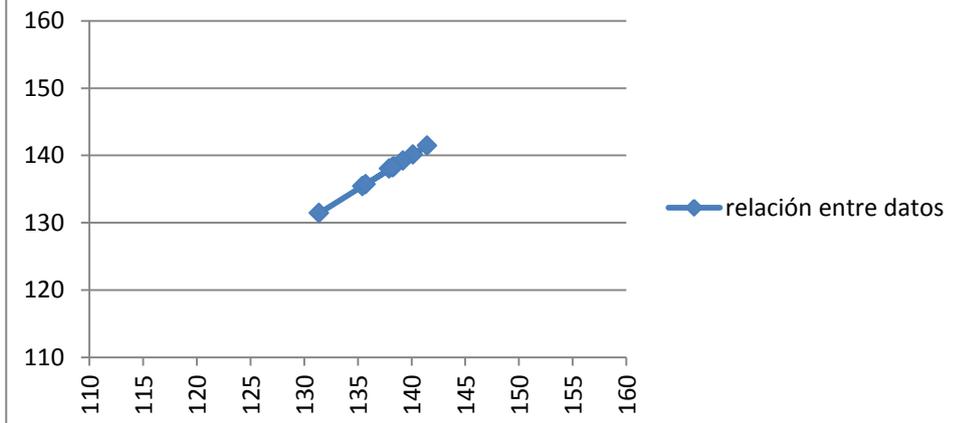
ETp medida vs ETp Interpolada- HG Spline



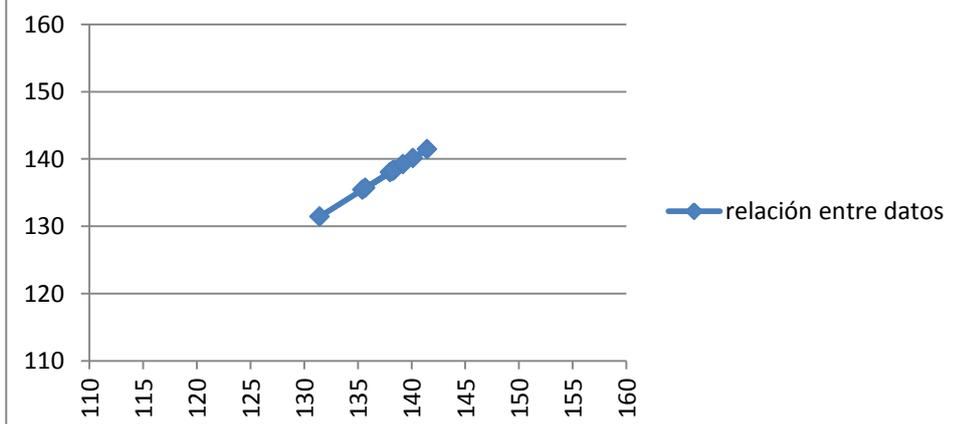
ETp medida vs ETp Interpolada- HG IDW



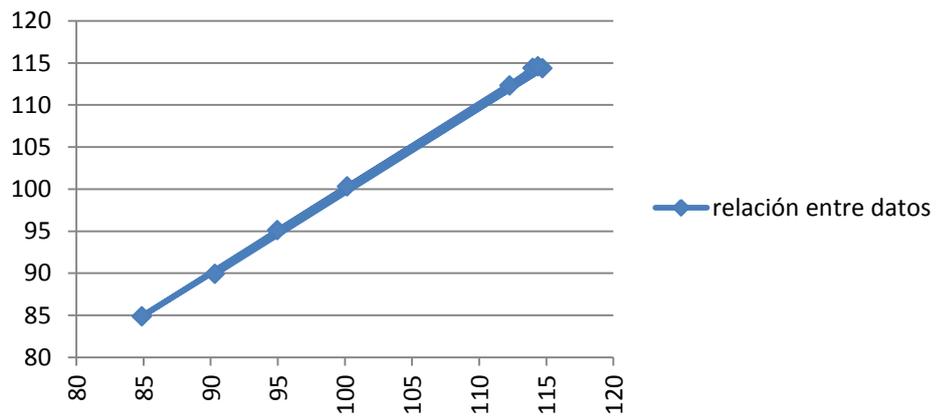
ETp medida vs ETp Interpolada- Thornthwaite Spline



ETp medida vs ETp Interpolada- Thornthwaite IDW



ETp medida vs ETp Interpolada- Evaporación Spline



ETp medida vs ETp Interpolada- Evaporación IDW

