



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**TITULACIÓN DE INGENIERÍA CIVIL**

Implementación de los algoritmos de evapotranspiración y balance hídrico en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB)

TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN

AUTOR: Jara Paltin, Danny Javier

Director: Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, Ph.D.

LOJA – ECUADOR

2013

## **Certificación**

Ph.D.

Fernando Oñate Valdivieso.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN**

**C E R T I F I C A:**

Que el presente trabajo, denominado: "Implementación de los algoritmos de evapotranspiración y balance hídrico en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB)" realizado por: Danny Javier Jara Paltin; cumple con los requisitos establecidos en las normas generales para la Graduación en la Universidad Técnica Particular de Loja, tanto en el aspecto de forma como de contenido, por lo cual me permito autorizar su presentación para los fines pertinentes.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Loja, 17 de julio de 2013

f) .....

Ph.D. Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso

**DIRECTOR DE TESIS**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo Danny Javier Jara Paltin declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f. ....  
Danny Javier Jara Paltin  
1103698880

## DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mis padres por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor, por los ejemplos de perseverancia y constancia que me han infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, su sacrificio y apoyo en toda mi vida de estudiante, ya que sin su guía no me hubiera sido posible culminar uno de mis sueños más preciados.

A mis queridos hermanos, por ser mi gran compañía, por su cariño y cuidado; han sabido brindarme su apoyo moral, cariño y confianza para conseguir mis metas.

A todos mis amigos y amigas por creer y confiar en mí en ofrecerme su amistad y compañerismo que siempre han estado a mi lado animándome.

*Danny Javier Jara Pallin*

## AGRADECIMIENTO

A mi director de proyecto de fin de titulación Fernando Oñate Valdivieso, PhD le expreso mis sinceros sentimientos de respeto y admiración, por su generoso asesoramiento y colaboración para la culminación del presente proyecto.

A mis queridos padres, quienes con su esfuerzo, amor y sacrificio supieron guiarme y apoyarme en todos los momentos de mi vida y además de ser mi ejemplo de principios y valores morales.

A mis queridos hermanos Paulo, Adrian, Rommel y Oscar por ser mi apoyo en los malos ratos y en todas las actividades realizadas en mi carrera.

A mis queridos abuelitos quienes me supieron guiar y apoyarme incondicionalmente.

A mis compañeros, amigos y a quienes directa o indirectamente me ayudaron a culminar mi investigación.

*Danny Javier Jara Pallín*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN .....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
MATERIALES Y MÉTODOS .....	5
METODO DE THORWAITE	
Definiciones y Generalidades .....	5
MÉTODO DE BLANEY CRIDDLE	
Definiciones y Generalidades .....	7
METODO DE TURC	
Definiciones y Generalidades .....	14
MÉTODO DE HARGREAVES	
Definiciones y Generalidades .....	15
METODO DE PENMAN	
Definiciones y Generalidades .....	18
MÉTODO DE BALANCE HÍDRICO	
Definiciones y Generalidades .....	23
CASO DE ESTUDIO .....	27
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	28
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	44
BIBLIOGRAFÍA .....	45



## RESUMEN

El HydroVLab pretende proporcionar una herramienta virtual, para el estudio y comprensión de los fenómenos hidrológicos, que sirva como un apoyo didáctico para estudiantes de las Universidades a nivel de pregrado en las áreas de la hidrología, hidráulica, recursos hídricos, ingeniería fluvial, etc. En el ciclo del agua la forma en que es devuelta a la atmósfera es la evaporación, que involucra también la evaporación de carácter biológico que es realizada por los vegetales conocida como transpiración, aunque los dos mecanismos son diferentes y se realizan independientemente no resulta fácil separarlos, pues ocurren por lo general de manera simultánea; de este hecho deriva la utilización del concepto más amplio de evapotranspiración.

En la evapotranspiración interviene el balance calorífico y la redistribución de energía mediante los traspasos que de ella se producen con los cambios de estado del agua, permitiendo así un equilibrio entre la energía recibida y la pérdida. El conocimiento de las pérdidas de agua mediante el proceso permite tener un acercamiento a las disponibilidades del recurso y consecuentemente puede realizarse una mejor distribución y manejo del mismo.

Se desarrollo herramientas que permitan evaluar la evapotranspiración por distintos métodos tales como Blaney Criddle, Penman, Thorwaite, Hargreaves y Turc asi como Balance Hídrico para diferentes escenarios.

**Palabras Claves:** Hidrología, evaporación, transpiración, evapotranspiración potencial, uso consuntivo.



## ABSTRACT

The HydroVLab aims to provide a virtual tool for the study and understanding of hydrological phenomena to serve as a teaching aid for students of the universities at the undergraduate level in the areas of hydrology, hydraulics, water resources, river engineering, etc.. In the water cycle, how it is returned to the atmosphere is the evaporation, which also involves the evaporation of a biological nature is carried out by known as transpiration of plants, though the two mechanisms are different and do not easily separate independently because usually occur simultaneously; derives from this fact the use of larger evapotranspiration.

Intervenes in the heat balance evapotranspiration and redistribution of energy by which it transfers occur with changes in water status, allowing a balance between the energy input and loss. Knowledge of water loss through the process to have an approach to the availability of the resource and therefore can be a better distribution and handling.

We developed tools to evaluate evapotranspiration by different methods such as Blaney Criddle, Penman, Thorwaite, Hargreaves and Turc well as water balance for different scenarios.

**Keywords:** Hydrology, evaporation, transpiration, evapotranspiration potential consumptive use.





## INTRODUCCIÓN

Se inicia el desarrollo de esta investigación con previa revisión de ciertos conceptos de la hidrología y la programación en Microsoft Visual Studio.net que son de vital importancia para llevar a cabo su desarrollo.

En HydroVLab en la sección de simulación de procesos, que permiten estudiar cada una de las fases del ciclo hidrológico y el efecto de la variación de sus parámetros, se implemento las herramientas de evapotranspiración y balance hídrico.

Con la estructura de la plataforma ya elaborada se procedió a desarrollar la herramienta para la simulación de la evapotranspiración.

Se trata de implementar herramientas en el laboratorio virtual HydroVLab dedicado al estudio de la hidrología y los recursos hídricos, con la finalidad de facilitar el estudio de los fenómenos hidrológicos de una manera operativa que enriquezca el aprendizaje de la hidrología y sus aplicaciones, sin importar la localización geográfica ni el instante.

Este laboratorio virtual le permite al usuario hacer uso de herramientas como: analizar, simular y optimizar su diseño con las bondades de la Web.

El laboratorio virtual de hidrología (HydroVLab) es una iniciativa académica que mediante un entorno virtual, proporciona a estudiantes y profesionales un medio para observar, experimentar y comprender el comportamiento de un sistema hidrológico y la interrelación de las variables que estén involucradas.

El HydroVLab se encuentra en [www.hydrovlab.utpl.edu.ec](http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec)

Los condicionantes físicos, biológicos de suelos y cultivos afectan al movimiento, retención y uso del agua, y han de ser considerados por el técnico que estudia, proyecta o dirige.



Desarrollar herramientas en Visual Basic.net que permitan evaluar la evapotranspiración de una cuenca para diferentes escenarios de precipitación, duración, uso y tipo de suelo.

Desarrollar herramientas que permitan evaluar la evapotranspiración por distintos métodos tales como Blaney Criddle, Penman, Thorwaite, Hargreaves y Turc así como Balance Hídrico para diferentes escenarios.

Visual Basic .NET (VB.NET) es un lenguaje de programación orientado a objetos que se puede considerar una evolución de Visual Basic implementada sobre el framework.NET, facilitando así el desarrollo de aplicaciones más avanzadas con herramientas modernas.



## MATERIALES y MÉTODOS

### 2.1 MÉTODO DE THORNWAITE

Según Aparicio (2001):

Calcula el uso consuntivo utilizando la expresión:

$$U_j = 1.6 K a \left( \frac{10 T_j}{I} \right)^a \quad (2.1)$$

: Donde:

$U_j$	uso consuntivo en el mes j, en cm
$T_j$	temperatura media en el mes j, en °C
$a, I$	constantes
$Ka$	constante que depende de la latitud y el mes del año (tabla 1)

Las constantes a e I se calculan aplicando

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij \quad (2.2)$$

$$ij = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad (2.3)$$

Donde:

j número del mes

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492 \quad (2.4)$$



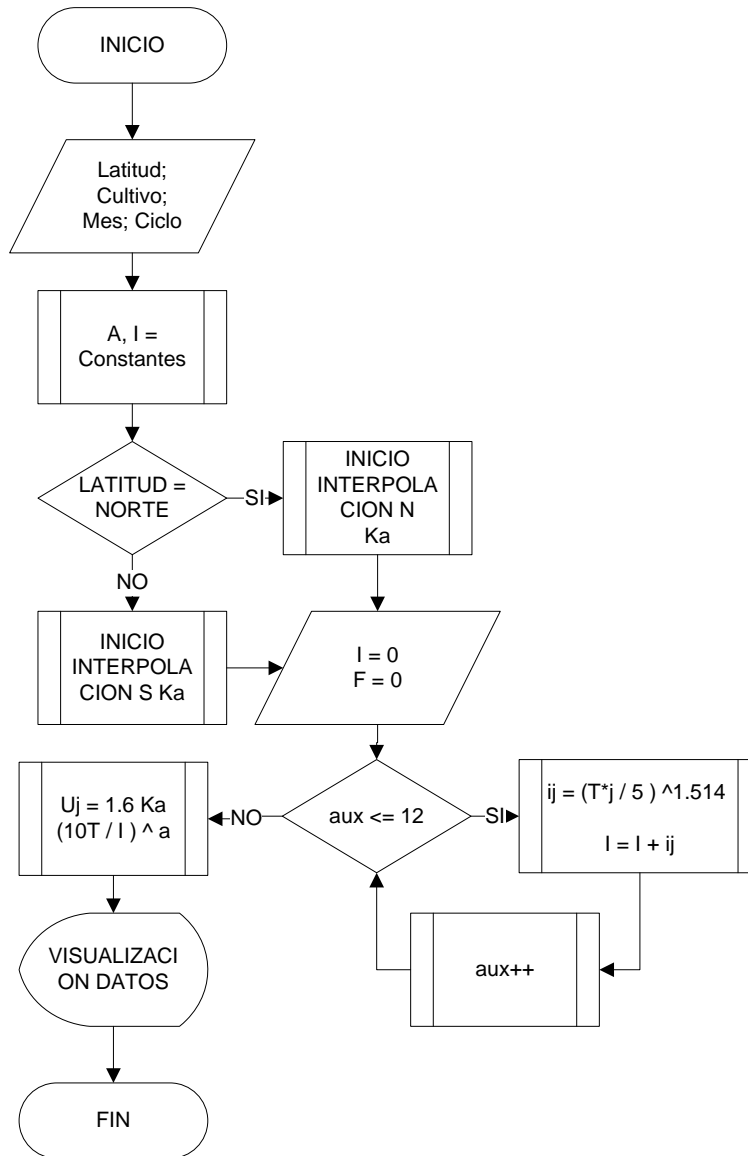
Tabla 1. Valores Ka

	Latitud Grados	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Norte	50	0,74	0,78	1,02	1,15	1,33	1,36	1,37	1,25	1,06	0,92	0,76	0,70
Norte	45	0,80	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
Norte	40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
Norte	35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
Norte	30	0,90	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	0,89	0,88
Norte	20	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,91
Norte	15	1,00	0,91	1,03	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97
Norte	10	1,00	0,91	1,03	1,03	1,08	1,05	1,08	1,07	1,02	1,02	0,98	0,99
Norte	5	1,02	0,93	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02
Ecuador	0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
Sur	5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
Sur	10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
Sur	15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
Sur	20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,91	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
Sur	22	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,90	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
Sur	24	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,89	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
Sur	25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
Sur	26	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
Sur	28	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
Sur	30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
Sur	31	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
Sur	33	1,22	1,04	1,06	0,94	0,90	0,83	0,88	0,95	1,00	1,13	1,16	1,23
Sur	34	1,22	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,16	1,24
Sur	35	1,23	1,04	1,06	0,94	0,89	0,82	0,87	0,94	1,00	1,13	1,17	1,25
Sur	36	1,24	1,04	1,06	0,94	0,88	0,81	0,86	0,94	1,00	1,13	1,17	1,26
Sur	37	1,25	1,05	1,06	0,94	0,88	0,80	0,86	0,93	1,00	1,14	1,18	1,27

Fuente: Hidrología En La ingeniería, Germán Monsalve Sáenz, Pág. 177



### Flujograma N°1 para cálculo de evapotranspiración por el método de Thornwaite



FUENTE: Elaboración propia

## 2.2 MÉTODO DE BLANEY-CRIDDLE:

Según Aparicio (2001):

En este método se toma en cuenta, además de la temperatura y las horas de sol diarias, el tipo de cultivo, la duración del de su ciclo vegetativo, la temporada de siembra y la zona. El ciclo vegetativo de un cultivo es el tiempo que transcurre entre la siembra y la cosecha y varía de cultivo a cultivo. En la tabla N°2 se presenta los ciclos vegetativo de algunos cultivos comunes.



Si se desea estimar la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo se puede emplear la fórmula:

$$Et = Kg \times F \quad (2.5)$$

Donde:

Et	evapotranspiración durante el ciclo vegetativo en cm
F	factor de temperatura y luminosidad
Kg	coeficiente global de desarrollo

El coeficiente Kg varía entre 0.5 y 1.2 y en la tabla N° 2 se muestran algunos valores. El factor F se calcula como:

$$F = \sum_{i=1}^n fi \quad (2.6)$$

En donde n = número de meses que dura el ciclo vegetativo

$$fi = Pi \left\{ \frac{(Ti+17.8)}{21.8} \right\} \quad (2.7)$$

Pi	porcentaje de horas sol del mes i con respecto al año (tabla N°3)
Ti	temperatura media del mes i en °C

Cuando la zona en cuestión es árida los valores de fj se multiplican por un factor de corrección kti que se calcula como:

$$Kti = 0.03114 \times Ti + 0.2396 \quad (2.8)$$

Cuando se desea determinar valores de evapotranspiración para períodos más cortos que un ciclo vegetativo, por ejemplo un mes, se usa la fórmula:

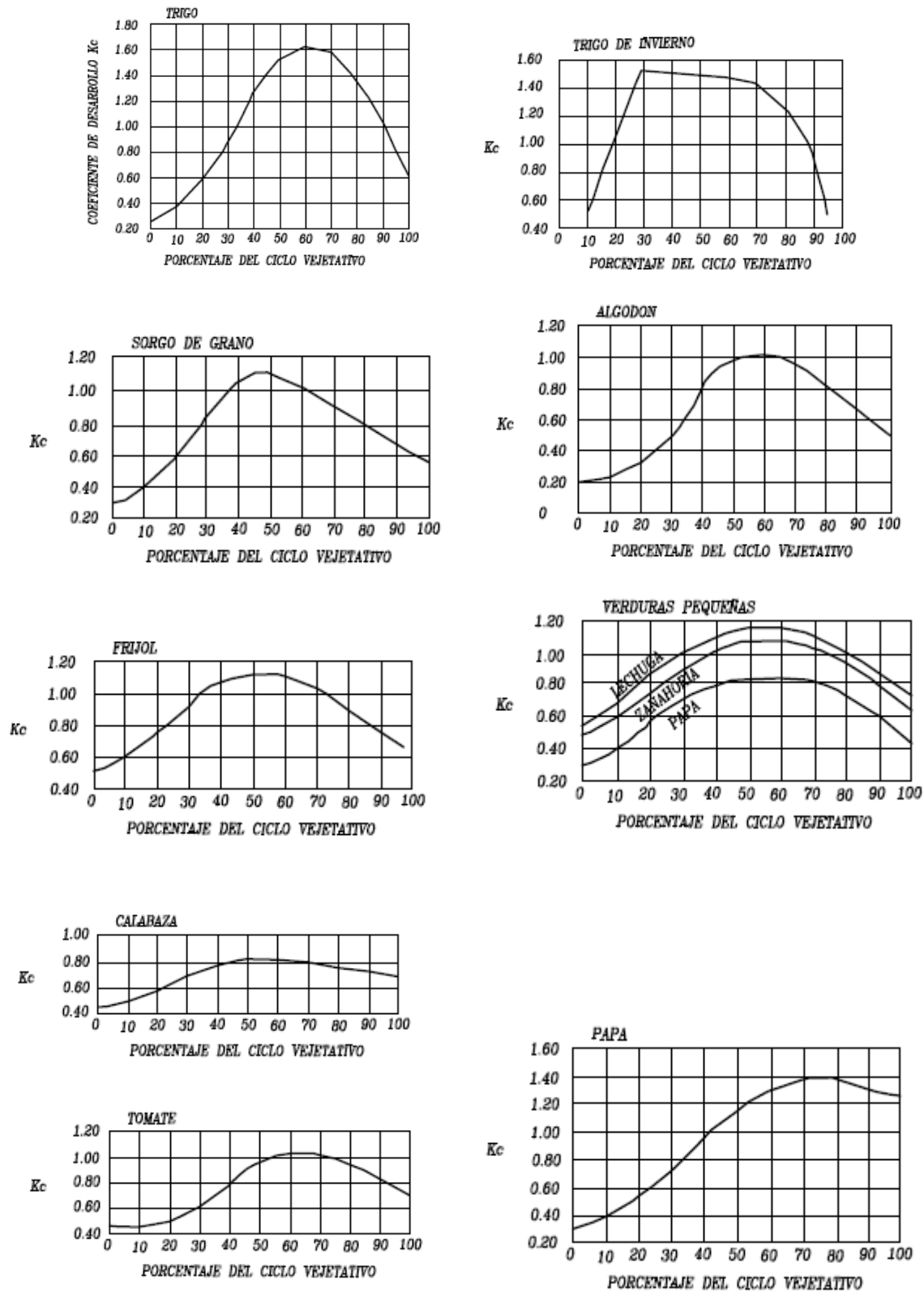
$$Eti = Kci \times fi \quad (2.9)$$

Donde Eti es la evapotranspiración durante el período i; fi se calcula con la fórmula, con Pi y Ti correspondientes al período considerado y Kci es un coeficiente de desarrollo parcial que



puede determinarse mediante parcelas experimentales o en base a los datos dados en la

Figura N°1



FUENTE: Aparicio 2001



Tabla N° 2 Coeficiente Kg

Cultivo	Ciclo vegetativo	Coeficiente global Kg
Aguacate	Perenne	0.50 - 0.55
Ajonjolí	3 a 4 meses	0,80
Alfalfa	Entre heladas	0.80 - 0.85
	En invierno	0,60
Algodón	6 a 7 meses	0.60 - 0.65
Arroz	3 a 5 meses	1.00 - 1.20
Cacahuete	5 meses	0.60 - 0.65
Cacao	Perenne	0.75 - 0.80
Café	Perenne	0.75 - 0.80
Camote	5 a 6 meses	0,60
Caña de azúcar	Perenne	0.75 - 0.90
Cártamo	5 a 8 meses	0.55 - 0.65
Cereales de grano pequeño (alpiste, avena, cebada, centeno, trigo)	3 a 6 meses	0.75 - 0.85
Cítricos	7 a 8 meses	0.50 - 0.65
Chile	3 a 4 meses	0,60
Espárrago	6 a 7 meses	0,60
Fresa	Perenne	0.45 - 0.60
Frijol	3 a 4 meses	0.60 - 0.70
Frutales de hueso y pepita (hoja caduca)	Entre heladas	0.60 - 0.70
Garbanzo	4 a 5 meses	0.60 - 0.70
Girasol	4 meses	0.50 - 0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0,60
Haba	4 a 5 meses	0.60 - 0.70
Hortalizas	2 a 4 meses	0,60
Jitomate	4 meses	0,70
Lechuga y col	3 meses	0,70
Lenteja	4 meses	0.60 - 0.70
Maíz	4 meses	0.60 - 0.70
Maíz	4 a 7 meses	0.75 - 0.85
Mango	Perenne	0.75 - 0.80
Melón	3 a 4 meses	0,60
Nogal	Entre heladas	0,70
Papa	3 a 5 meses	0.65 - 0.75
Palma datílera	Perenne	0.65 - 0.80
Palma cocotera	Perenne	0.80 - 0.90
Papaya	Perenne	0.60 - 0.80
Plátano	Perenne	0.80 - 1.00
Pastos de gramíneas	Perenne	0,75
Remolacha	6 meses	0.65 - 0.75
Sandía	3 a 4 meses	0,60
Sorgo	3 a 5 meses	0,70
Soya	3 a 5 meses	0.60 - 0.70
Tabaco	4 a 5 meses	0.70 - 0.80
Tomate	4 a 5 meses	0.70 - 0.80
Trébol ladino	Perenne	0.80 - 0.85
Zanahoria	2 a 4 meses	0,60

Fuente: Fundamentos De Hidrología De superficie, Francisco Javier Aparicio Mijares, Pág 58





Tabla N° 3 Porcentaje de horas sol mensual

Latitud Norte	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	8,50	7,66	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50
5	8,32	7,57	8,47	8,29	8,65	8,41	8,67	8,66	8,23	8,42	8,07	8,30
10	8,13	7,47	8,45	8,37	8,81	8,60	8,86	8,71	8,25	8,34	7,91	8,10
15	7,94	7,36	8,43	8,44	8,98	8,80	9,05	8,83	8,28	8,20	7,75	7,88
20	7,74	7,25	8,41	8,52	9,15	9,00	9,25	8,96	8,30	8,18	7,58	7,66
22	7,66	7,21	8,40	8,56	9,22	9,09	9,33	9,00	8,30	8,13	7,50	7,55
24	7,58	7,17	8,40	8,60	9,30	9,20	9,44	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
26	7,49	7,12	8,40	8,64	9,38	9,30	9,49	9,10	8,31	8,06	7,36	7,31
28	7,40	7,00	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
30	7,30	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	8,67	9,22	8,33	7,99	7,19	7,15
32	7,20	6,97	8,37	8,76	9,62	9,59	9,77	9,27	8,34	7,95	7,11	7,05
34	7,10	6,91	8,36	8,80	9,72	9,70	9,88	9,33	8,36	7,90	7,02	6,92
36	6,99	6,85	8,35	8,85	9,82	9,82	9,09	9,40	8,37	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,90	9,92	9,95	10,10	9,47	8,38	7,80	6,82	6,66
40	6,76	6,72	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,57	8,39	7,75	6,72	7,52
42	6,63	6,65	8,31	9,00	10,14	10,22	10,35	9,62	8,40	7,69	6,62	6,37
44	6,49	6,58	8,30	9,06	10,26	10,38	10,49	9,70	8,41	7,63	6,49	6,21
46	6,34	6,50	8,29	9,12	10,39	10,54	10,64	9,79	8,42	7,57	6,36	6,04
48	6,17	6,41	8,27	9,18	10,53	10,71	10,80	9,89	8,44	7,51	6,23	5,86
50	5,98	6,30	8,24	9,24	10,68	10,91	10,90	10,00	8,46	7,45	6,10	5,65
52	5,77	6,19	8,21	9,29	10,85	11,13	11,20	10,12	8,49	7,39	5,93	5,43
54	5,55	6,08	8,18	9,36	11,03	11,38	11,43	10,26	8,51	7,30	5,74	5,18
56	5,30	5,95	8,15	9,45	11,22	11,67	11,69	10,40	8,52	7,21	5,54	4,89
58	5,01	5,81	8,12	9,55	11,46	12,00	11,98	10,55	8,51	7,10	4,31	4,56
60	4,67	5,65	8,08	9,65	11,74	12,39	12,31	10,70	8,51	6,98	5,04	4,22



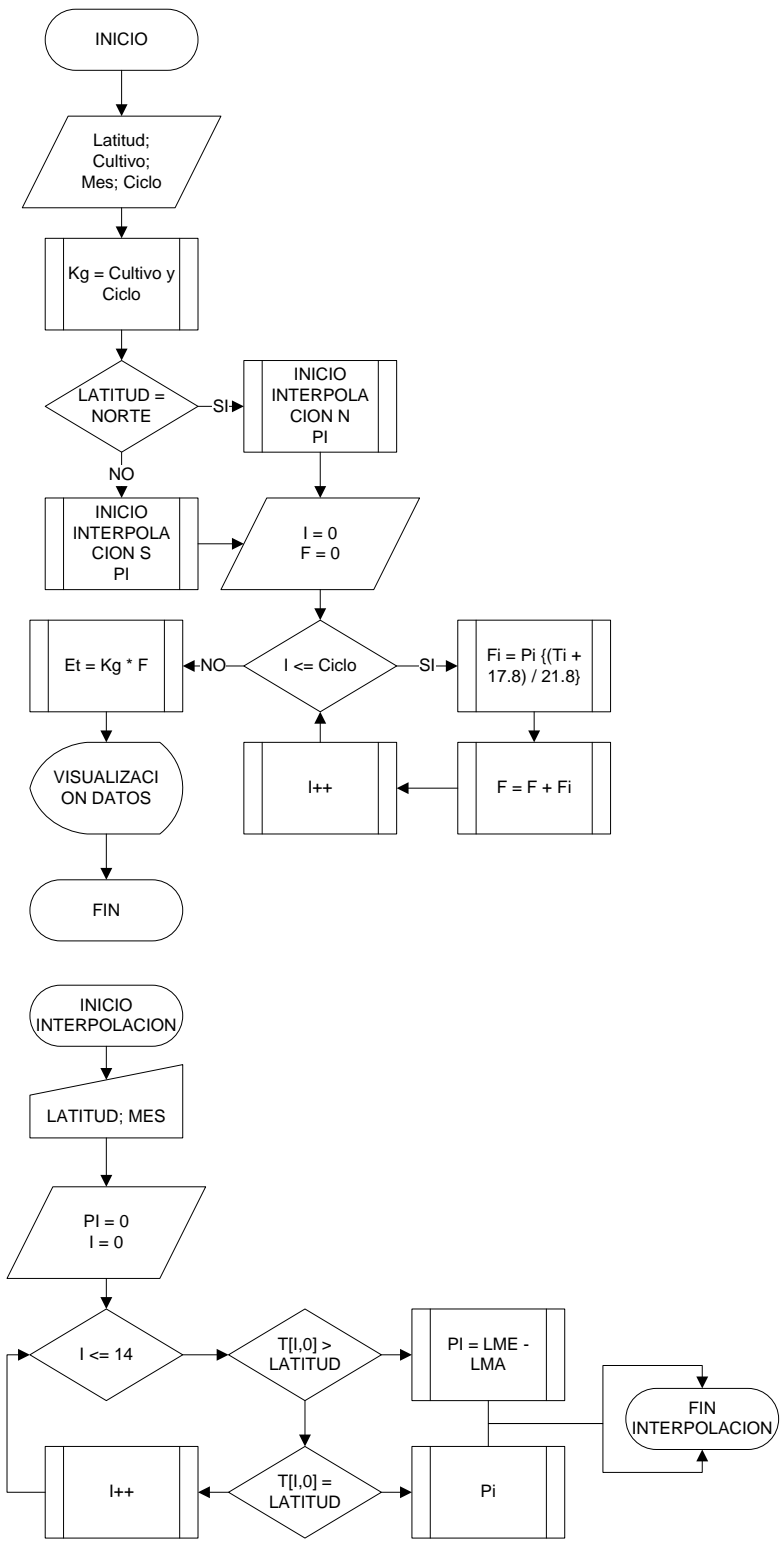
Tabla N° 3 Porcentaje de horas sol mensual

Latitud Sur	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	8,50	7,66	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50	8,49	8,21	8,50	8,22	8,50
5	8,68	7,76	8,51	8,15	8,34	8,05	8,33	8,38	8,19	8,56	8,37	8,68
10	8,86	7,87	8,53	8,09	8,18	7,86	8,14	8,27	8,17	8,62	8,53	8,88
15	9,05	7,98	8,55	8,02	8,02	7,65	7,95	8,15	8,15	8,68	8,70	9,10
20	9,24	8,09	8,57	7,94	7,85	7,43	7,76	8,03	8,13	8,76	8,87	9,33
25	9,46	8,21	8,60	7,94	7,66	7,20	7,54	7,90	8,11	8,86	9,04	9,58
30	9,70	8,33	8,62	7,73	7,45	6,96	7,31	7,76	8,07	8,97	9,24	9,35
32	9,81	8,39	8,63	7,69	7,36	6,85	7,21	7,70	8,96	9,01	9,33	9,96
34	9,92	8,45	8,64	7,64	7,27	6,74	7,10	7,63	8,05	9,06	9,42	10,08
36	10,03	8,51	8,65	7,59	7,18	6,62	6,99	7,56	8,04	9,11	9,51	10,21
38	10,15	8,57	8,66	7,54	7,08	6,50	6,87	7,49	8,03	9,16	9,61	10,34
40	10,27	8,63	8,67	7,49	6,97	6,37	6,76	7,41	8,02	9,21	9,71	10,49
42	10,40	8,70	8,68	7,44	6,85	6,23	6,64	7,33	8,01	9,26	9,82	10,64
44	10,54	8,78	8,69	7,38	6,73	6,08	6,51	7,25	7,99	9,31	9,94	10,80
46	10,69	8,86	8,70	7,32	6,61	5,02	6,37	7,16	7,96	9,37	10,07	10,97

Fuente: Fundamentos De Hidrología de Superficie, Francisco Javier Aparicio Mijares, Págs. 60-61.



### Flujograma N°2 para cálculo de evapotranspiración por el método de Blaney-Criddle



FUENTE: Elaboración propia



## 2.3 FÓRMULA DE TURC

Según Monsalve (2006)

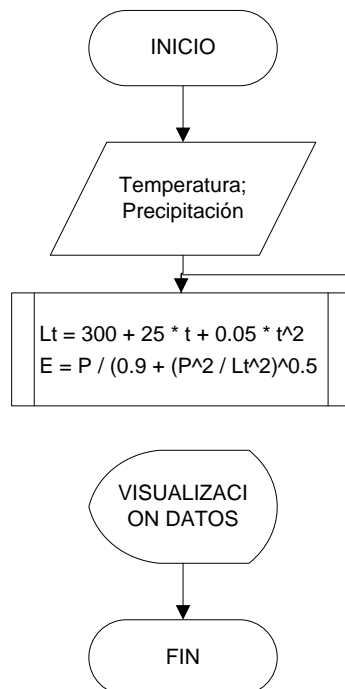
Turc estudió datos de 254 hojas hidrográficas de todo el mundo. De acuerdo con Turc:

$$\bar{E} = \frac{\dot{P}}{\left(0.9 + \frac{\dot{P}^2}{[L(t)]^2}\right)^{0.5}} \quad (2.10)$$

En donde:

$\bar{E}$	evapotranspiración media anual (mm)
$\dot{P}$	precipitación media anual (mm)
$L(t)$	$300 + 25t + 0.05t^2$
$T$	temperatura media anual (°C)

Flujograma N°3 para cálculo de evapotranspiración por la formula de Turc





## 2.4 MÉTODO DE HARGREAVES

Según Monsalve 2006

Este método permite determinar la evapotranspiración potencial con base en datos climatológicos.

### 2.4.1 Ecuación básica

$$ETP = 17.37 \times D \times T \times (1.0 - 0.01 \times H_n) \quad (2.11)$$

En donde:

ETP	evapotranspiración potencial media mensual, en mm
D	coeficiente de luz solar
T	promedio mensual de temperatura, en °C
H <sub>n</sub>	humedad relativa media mensual al mediodía, en porcentaje

### 2.4.2 Ecuación modificada

La ecuación modificada para el cálculo de evapotranspiración potencial del método de Hargreaves, basada en más parámetros climatológicos, se expresa así:

$$ETP = 17.37 D T F_h C_w C_I C_A \quad (2.12)$$

En donde:

ETP	evapotranspiración potencial media mensual
D	coeficiente de luz solar

$$D = 0.12 \times P \quad (2.13)$$

P	porcentaje teórico de horas de brillo solar respecto al año. Tabla N° 3
T	temperatura media mensual del aire, en °C



$$F_h = (1.0 - 0.01) H_N \quad (2.14)$$

$H_N$  humedad relativa media mensual al mediodía, en porcentaje.

$$H_N = ((H_{RM})^2 \times 0.004) + (0.4 \times H_{RM}) + 1.0 \quad (2.15)$$

$H_{RM}$  humedad relativa promedio mensual

$C_w$  coeficiente de viento

$$C_w = 0.75 + 0.0255 (W_2)^{1/2} \quad (2.16)$$

$W_2$  velocidad media del viento, en Km/día, a una altura de 2 m

$C_I$  coeficiente de brillo solar.

$$C_I = 0.478 + (0.58 S) \quad (2.17)$$

$S$  (brillo solar actual mensual / brillo solar teórico mensual).

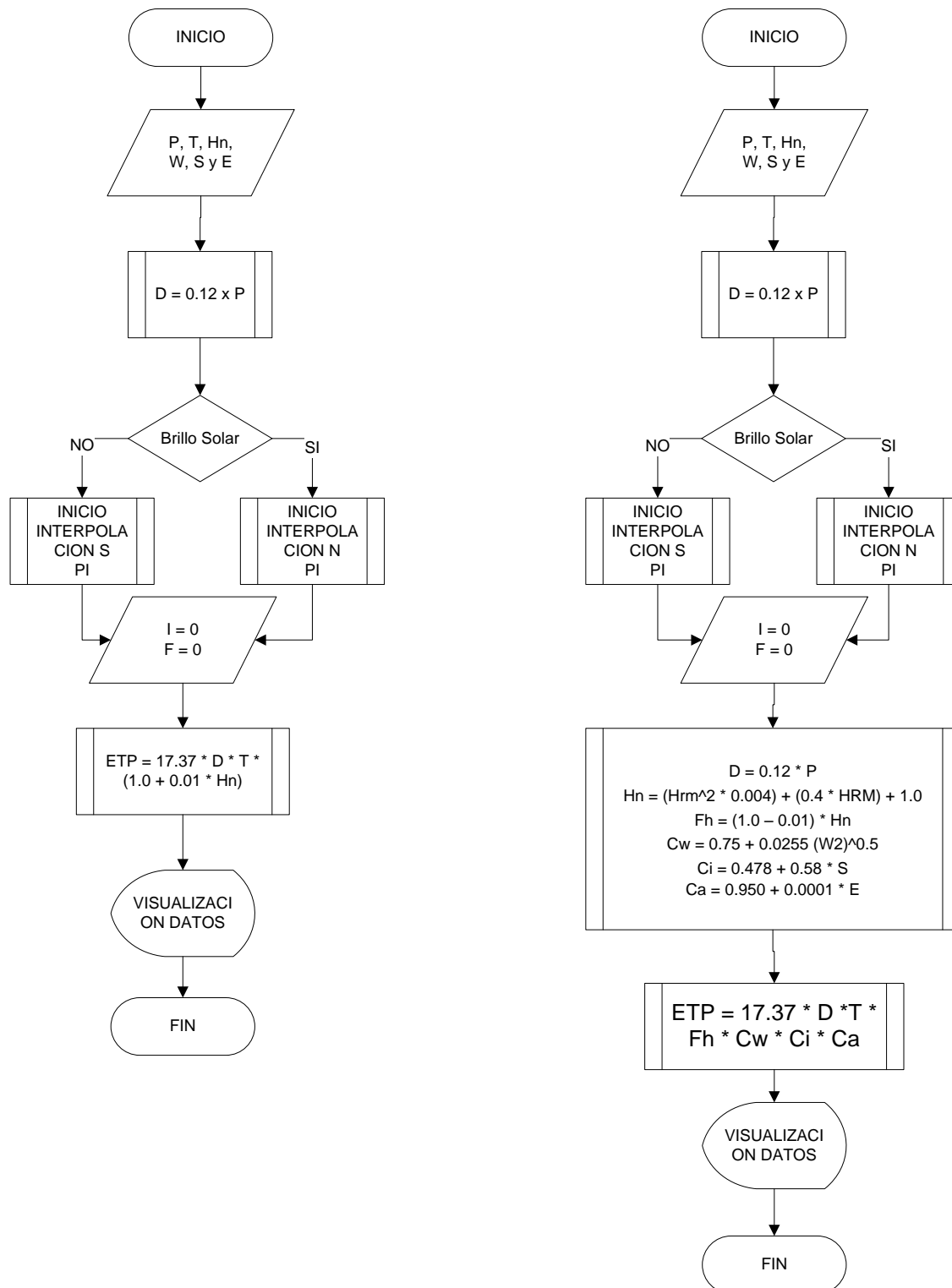
$C_A$  coeficiente de elevación.

$$C_A = 0.950 + (0.0001 E) \quad (2.18)$$

$E$  elevación promedio de la zona, msnm.



### Flujograma N°4 para cálculo de la evapotranspiración por el método de Hargreaves



FUENTE: Elaboración propia



## 2.5 MÉTODO DE PENMAN

Según Monsalve 2006

Penman propuso combinar los métodos de balance de energía y el aerodinámico. Penman planteó también que el flujo de calor en el suelo puede ser despreciado en relación con los demás términos cuando son aplicados para períodos de un día o más.

$$R_c = R_a \left( 0.20 + 0.48 \frac{n}{D} \right) \quad (2.19)$$

En donde:

- $R_a$  es la cantidad de energía que alcanza el límite exterior de la atmósfera. Tabla N° 4
- $n$  número actual de horas de sol por día
- $D$  máximo número posible de horas de sol por día. Tabla N° 5

$$R_I = R_c (1 - r) = R_a \left( 0.20 + 0.48 \frac{n}{D} \right) \quad (2.20)$$

En donde:

- $R_I$  cantidad neta de radiación de onda corta retenida en la superficie de la tierra
- $r$  albedo de la superficie

$$r = \frac{\text{energía reflejada}}{\text{energía incidente}} \quad (2.21)$$

$$R_B = \sigma T_a^4 (0.47 - 0.077 \sqrt{e_a}) \left( 0.20 + 0.80 \frac{n}{D} \right) \quad (2.22)$$

En donde:

- $T_a$  temperatura absoluta del aire, en °K
- $e_a$  presión de vapor a la temperatura del aire, en mm de Hg





$\sigma T_a^4$  presión de cuerpos negros de Stefan-Boltzmann, en donde  $\sigma$  es constante de Lummer y Pringsheim

$$\sigma = 117.4 \times 10^{-9} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ día } ^\circ\text{K}^4} \quad (2.23)$$

Cantidad de energía remanente sobre la superficie terrestre y disponible para varios fenómenos, H

$$H = R_I - R_B; H \text{ en } ((\text{cal}/\text{cm}^2)/\text{día}) \quad (2.24)$$

$$E'_a = 21 (e - e_a)(0.50 + 0.54U_2) \text{ en } ((\text{cal}/\text{cm}^2)/\text{día}) \quad (2.25)$$

$E'_a$  evaporación de la superficie libre de agua correspondiente al caso hipotético en que las temperaturas del agua y del aire sean iguales, en  $((\text{cal}/\text{cm}^2)/\text{día})$

$e$  presión de saturación de vapor a la temperatura  $t_a$  del aire, en mm de Hg

$e_a$  presión actual de vapor a la temperatura  $t_a$  del aire, en mm de Hg

$U_2$  velocidad promedio del viento, en m/s, a una altura de 2 metros sobre la superficie del terreno

*Nota:* En los estudios de evaporación es importante anotar que la evaporación de 1 mm de altura de agua sobre un área superficial de 1  $\text{cm}^2$  requiere aproximadamente 60 calorías.

Finalmente:

$$E'_o = \frac{\Delta H + \Gamma E'_a}{\Delta + \Gamma} \quad (2.26)$$

En  $(\text{cal}/\text{cm}^2)/\text{día}$  para los valores de  $E'_a$ , H,  $E'_o$ ;  $\Delta$  y  $\Gamma$  en  $(\text{mm de Hg}/^\circ\text{C})$ . Dividiendo los valores de  $E'_o$   $((\text{cal}/\text{cm}^2)/\text{día})$  entre 60 se obtiene los valores de  $E'_o$   $(\text{mm}/\text{día})$ .



Tabla N° 4: Presión de saturación de vapor de agua (es), para 1000 milibares (0 a 323m de altitud). En mm de mercurio como una función de la temperatura t en °C (por debajo de 0°C las presiones se refieren a condiciones de agua). 1 milibar = 0.750 mm de Hg (mercurio)

t	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	t
-10	2,15										-10
-9	2,32	2,30	2,29	2,27	2,26	2,24	2,22	2,21	2,19	2,17	-9
-8	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,41	2,40	2,38	2,36	2,34	-8
-7	2,71	2,69	2,67	2,65	2,63	2,61	2,59	2,57	2,55	2,53	-7
-6	2,93	2,91	2,89	2,86	2,84	2,82	2,80	2,77	2,75	2,73	-6
-5	3,16	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04	3,01	2,99	2,97	2,95	-5
-4	3,41	3,39	3,37	3,34	3,32	3,29	3,27	3,24	3,22	3,18	-4
-3	3,67	3,64	3,62	3,59	3,57	3,54	3,52	3,49	3,46	3,44	-3
-2	3,97	3,94	3,91	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70	-2
-1	4,26	4,23	4,20	4,17	4,14	4,11	4,08	4,05	4,03	4,00	-1
-0	4,58	4,55	4,52	4,49	4,46	4,43	4,40	4,36	4,33	4,29	-0
0	4,58	4,62	4,65	4,69	4,71	4,75	4,78	4,82	4,86	4,89	0
1	4,92	4,96	5,00	5,03	5,07	5,11	5,14	5,18	5,21	5,25	1
2	5,29	5,33	5,37	5,40	5,44	5,48	5,53	5,57	5,60	5,64	2
3	5,68	5,72	5,76	5,80	5,84	5,89	5,93	5,97	6,01	6,06	3
4	6,10	6,14	6,18	6,23	6,27	6,31	6,36	6,40	6,45	6,49	4
5	6,54	6,58	6,63	6,68	6,72	6,77	6,82	6,86	6,91	6,96	5
6	7,01	7,06	7,11	7,16	7,20	7,25	7,31	7,36	7,41	7,46	6
7	7,51	7,56	7,61	7,67	7,72	7,77	7,82	7,88	7,93	7,98	7
8	8,04	8,10	8,15	8,21	8,26	8,32	8,37	8,43	8,48	8,54	8
9	8,61	8,67	8,73	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,14	9
10	9,20	9,26	9,33	9,39	9,46	9,52	9,58	9,65	9,71	9,77	10
11	9,84	9,90	9,97	10,03	10,10	10,17	10,24	10,31	10,38	10,45	11
12	10,52	10,58	10,66	10,72	10,79	10,86	10,93	11,00	11,08	11,15	12
13	11,23	11,30	11,38	11,45	11,53	11,60	11,68	11,76	11,83	11,91	13
14	11,98	12,06	12,14	12,22	12,30	12,38	12,46	12,54	12,62	12,70	14
15	12,78	12,86	12,95	13,03	13,11	13,20	13,28	13,37	13,45	13,54	15
16	13,63	13,71	13,80	13,90	13,99	14,08	14,17	14,26	14,35	14,44	16
17	14,53	14,62	14,71	14,80	14,90	14,99	15,09	15,17	15,27	15,38	17
18	15,46	15,56	15,66	15,76	15,86	15,96	16,06	16,16	16,26	16,36	18
19	16,46	16,57	16,68	16,79	16,90	17,00	17,10	17,21	17,32	17,43	19
20	17,53	17,64	17,75	17,86	17,97	18,08	18,20	18,31	18,43	18,54	20
21	18,65	18,77	18,88	19,00	19,11	19,23	19,35	19,46	19,58	19,70	21
22	19,82	19,94	20,06	20,19	20,31	20,43	20,58	20,69	20,80	20,93	22
23	21,05	21,19	21,32	21,45	21,58	21,71	21,84	21,97	22,10	22,23	23
24	22,37	22,50	22,63	22,76	22,91	23,05	23,19	23,31	23,45	23,60	24
25	23,75	23,90	24,03	24,20	24,35	24,49	24,64	24,79	24,94	25,08	25
26	25,31	25,45	25,60	25,74	25,89	26,03	26,18	26,32	26,46	26,60	26
27	26,74	26,90	27,05	27,21	27,37	27,53	27,69	27,85	28,00	28,16	27
28	28,32	28,49	28,66	28,83	29,00	29,17	29,34	29,51	29,68	29,85	28
29	30,03	30,20	30,38	30,56	30,74	30,92	31,10	31,28	31,46	31,64	29
30	31,82	32,00	32,19	32,38	32,57	32,76	32,95	33,14	33,33	33,52	30
t	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	t

Fuente: Hidrología En La Ingeniería, Germán Monsalve Sáenz, Pág. 65



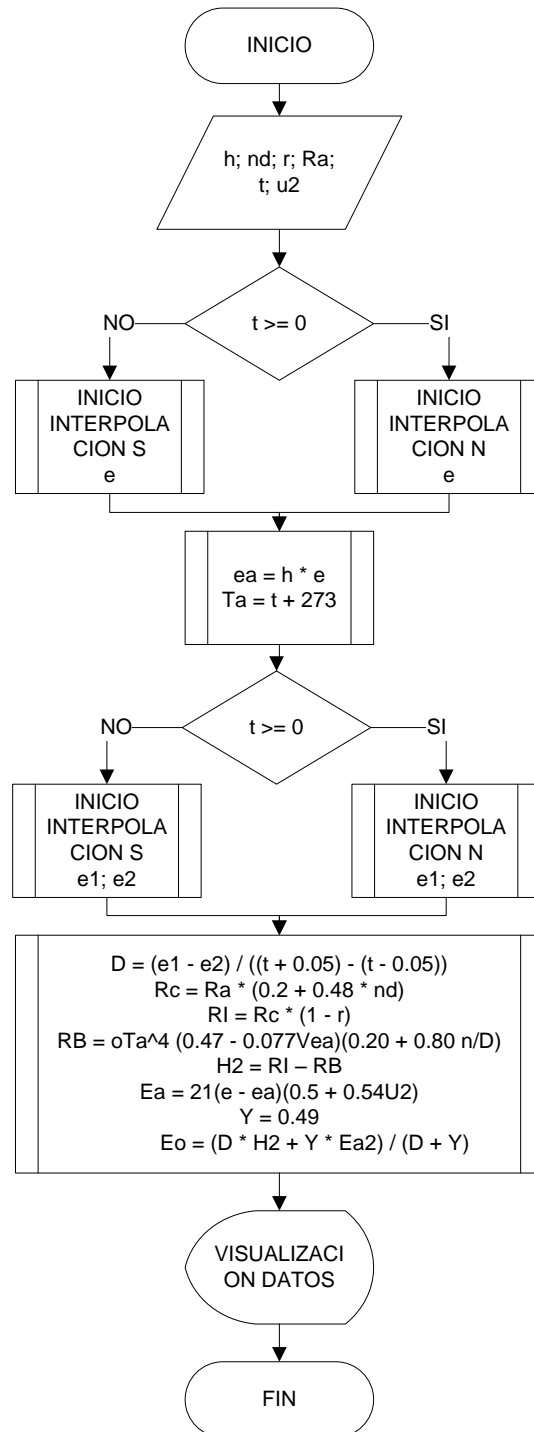
Tabla N° 5: Flujo de radiación de onda corta en la parte superior de la atmosfera terrestre en (cal/cm<sup>2</sup>)/día, como una función del mes, del año y de la latitud.

M E S	Latitud geográfica (grados)																			
	Norte										Sur									
	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
Ene	0	0	0	90	225	380	520	660	780	885	965	1020	1050	1055	1035	1000	1000	1035	1055	
Feb	0	0	70	215	360	505	630	750	840	915	960	975	965	925	865	785	695	645	660	
Mar	40	125	275	425	555	675	775	850	900	925	915	885	830	740	640	510	375	225	135	
Abr	470	480	565	670	750	845	895	920	925	900	840	765	665	545	415	280	130	15	0	
May	900	890	855	890	930	965	975	960	915	850	755	650	525	390	250	110	10	0	0	
Jun	1085	1075	1025	1000	1010	1020	1000	965	900	820	710	590	460	315	180	55	0	0	0	
Jul	1010	995	945	945	970	985	990	960	905	830	730	615	480	345	205	75	0	0	0	
Ago	670	660	685	770	830	895	925	935	915	870	795	705	595	465	325	190	55	0	0	
Sep	170	255	385	510	640	740	820	875	905	905	875	820	750	650	525	390	250	100	15	
Oct	0	25	145	285	435	565	685	785	865	910	935	930	900	840	760	660	550	450	440	
Nov	0	0	15	120	265	415	560	685	800	890	955	1000	1020	995	975	920	885	905	920	
Dic	0	0	0	60	190	335	490	630	760	875	960	1025	1065	1080	1075	1060	1190	1140	1160	

Tomada de datos publicados por N. Robinson, "Solar Radiation", 1966, y Sir Napier Shaw, "Manual of Metereology", vol II, "Comparative Meteorology", 1928.



### Flujograma N°5 para cálculo de la evapotranspiración por el método de Penman



FUENTE: Elaboración propia



## 2.6 Balance Hídrico

Oñate Valdivieso 2008

Partiendo del conocimiento de las precipitaciones medias mensuales y de la precipitación mensual estimada, podemos estudiar el balance del agua en el suelo a lo largo del año. Conocer el balance de humedad en el suelo es importante para evaluar la disponibilidad de agua para los cultivos, estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de recuperación de suelos salinos, de repoblación forestal, o el establecimiento del régimen de humedad de los suelos o de criterios de diferencia climática.

El balance hídrico consiste en definir mes a mes los siguientes parámetros (en mm ó l/m<sup>2</sup>, ambos valores son iguales):

P	precipitación media mensual
ET	evapotranspiración potencial o de referencia
P-ET	diferencia entre P y la ET
R	reserva
VR	variación de la reserva
ETR	evapotranspiración real
D	déficit
Ex	exceso

- P – ET

Es el balance mensual de entradas y salidas de agua del suelo. La diferencia nos clasifica los meses en secos ( $P-ET < 0$ ) y en húmedos ( $P-ET > 0$ ) según las entradas superen o no a las salidas.

- R, reserva del suelo

Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas, ( $P > ET$ ) el agua sobrante pasará a engrosar las reservas del suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas se reducirá la reserva del suelo.



Sin embargo, el, suelo no es un “pozo sin fondo” y cuando se alcance la capacidad de retención del suelo, el agua añadida en “exceso” escurrirá superficialmente o en profundidad. Por tanto debemos exponer el concepto de reserva máxima o cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar en su perfil.

Se toma el valor de 100 mm (100 litros/metro cuadrado) como referencia climática sirve así el balance hídrico para comparaciones entre distintas zonas (independientemente de suelo y vegetación). Si queremos modelizar la realidad, desde un punto de vista edafológico, podemos calcular para cada horizonte del suelo (y para la suma de todos) la capacidad de retener agua como diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitamiento. Si consideramos también la vegetación, la profundidad del suelo donde tiene lugar las pérdidas por evapotranspiración viene definida por la profundidad del sistema radicular de la vegetación y, por tanto, la reserva máxima será la capacidad del suelo para retener agua hasta esa profundidad.

Pasando al cálculo del balance hídrico, la reserva del mes “i” (en función de la del mes anterior “i-1”) será:

$$R = R_{i-1} + (P_i - ET_i) \text{ si } 0 < R_{i-1} + (P_i + ET_i) < R_{m\acute{a}x}$$

$$R_i = : R_{m\acute{a}x} \text{ si } R_{i-1} + (P_i - ET_i) > R_{m\acute{a}x}$$

$$: 0 \text{ si } 0 > R_{i-1} + (P_i - ET_i)$$

Los valores de la reserva se irán acumulando mes a mes en el período húmedo, según los incrementos  $P-ET > 0$ , y disminuirán al llegar al periodo seco, decreciendo mes a mes según los valores mensuales  $P-ET < 0$ . Como hemos visto, la reserva nunca tendrá como valor uno mayor que la reserva máxima, ni un número negativo.

Como se aprecia en la fórmula, necesitamos la reserva del mes anterior para comenzar el cálculo de la reserva, por ello, asignamos un valor hipotético a un mes y realizamos ciclos anuales de cálculo (aunque el cuadro del balance hídrico tenga un mes inicial y otro final) hasta que la hipótesis de que partimos se confirme al final del ciclo. Se suele suponer que después del período seco la reserva del suelo es nula, en consecuencia se empieza el cálculo de “R”



con el primer mes húmedo y se asigna al mes anterior una reserva nula. Si, después de los cálculos, al final del período seco quedase agua en el suelo se deberán recalcular las reservas agregando la reserva existente al final del período seco a las reservas del período húmedo. Si de nuevo se modificase la reserva del último mes seco se recalcularían otra vez.

Si todos los meses son húmedos podemos utilizar los supuestos anteriores, pero en todo caso llegaremos a que la reserva es igual a la reserva máxima para todos los meses. Si por el contrario, todos los meses fueran secos, la reserva en todos los meses sería nula.

- VR: variación de la reserva

Es la diferencia entre la reserva del mes y la del mes anterior.  $VR_i = R_i - R_{i-1}$

- ETR: evapotranspiración real

Es el volumen de agua que realmente se evapotranspira en el mes dependiendo de que haya suficiente agua disponible para evaporar y así llegar a la ET potencial o de referencia o no (por tanto, la  $ET_i$  es siempre mayor o igual a la ETR<sub>i</sub>). El agua disponible para evaporar será la que cae como precipitación en el mes considerado y la que mantenemos en el suelo. En el período húmedo, al cubrir la precipitación la demanda potencial la ET real es igual a la potencial; es decir,  $ETR_i = P_i + |VR_i|$

- D: déficit de agua

Es el volumen de agua que falta para cubrir las necesidades potenciales de agua (para evaporar y transpirar). Por tanto, la falta de agua es:  $D_i = ET_i - ETR_i$

- Ex: exceso de agua

Es el agua que excede de la reserva máxima ya que se habrá perdido por escorrentía superficial o profunda. Por tanto:

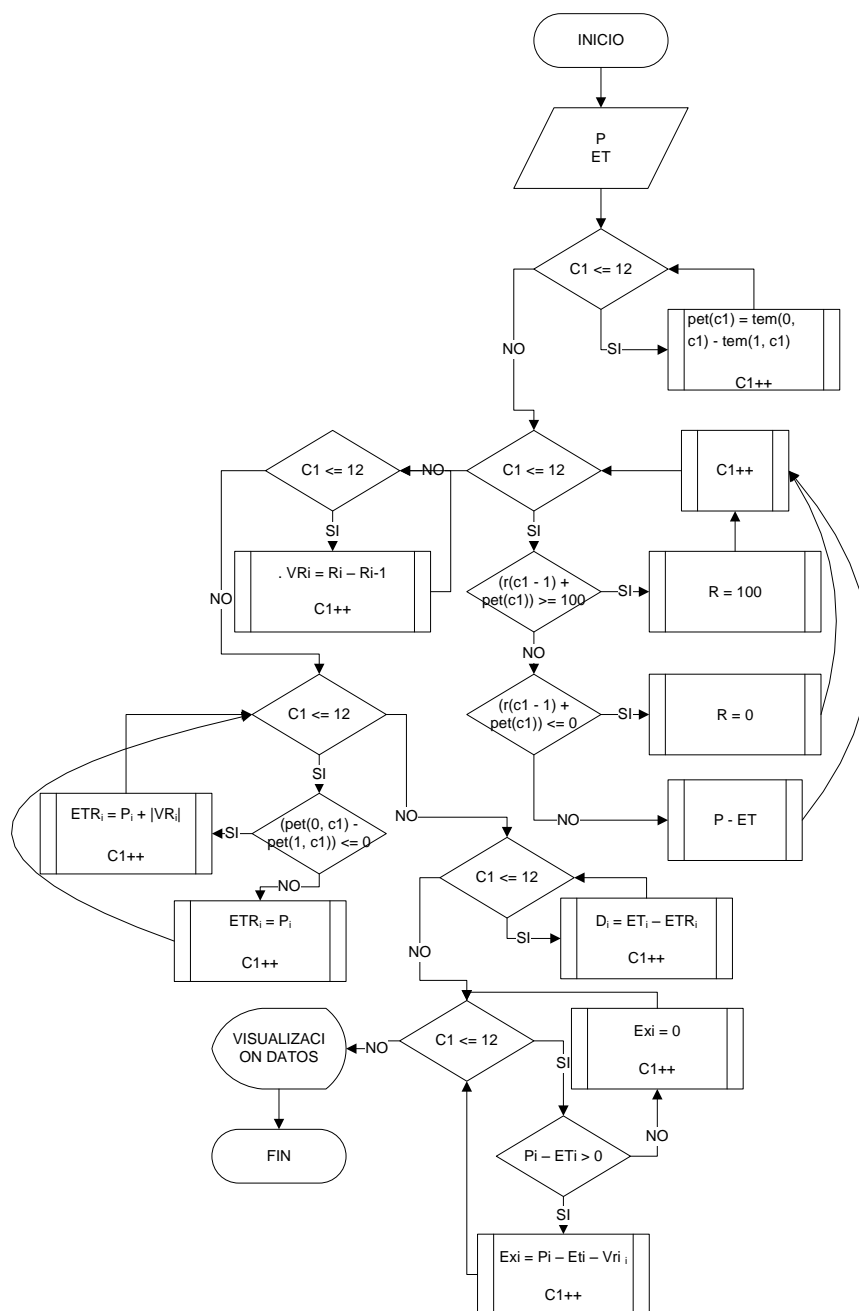
$$Ex_i = [P_i - ET_i - VR_i] \text{ si } (P_i - ET_i) > 0$$



$$Ex_i = 0 \quad \text{si} \quad (P_i - ET_i) < 0$$

Como es lógico sólo puede haber exceso si la precipitación ha compensado previamente la ET, es decir, en los meses húmedos.

Flujograma N°6 para cálculo del balance hídrico



FUENTE: Elaboración propia





## CASO DE ESTUDIO

La estación La Argelia es una estación meteorológica destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

Estación: La Argelia  
Código: M – 033  
Latitud: 04°01'50"S  
Longitud: 79°11'58"W  
Elevación: 2160msnm

### Precipitación mensual (mm)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
2007	50,1	66,3	93,4	98,8	80,7	120,0	11,3	152,4	55,0	55,7	153,7	77,6	1015,0
2008	62,4	251,0	237,9	137,8	75,2	51,3	89,5	89,7	20,6	136,4	102,9	126,3	1381,0

FUENTE: INAMHI

### Temperatura media (°C)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual	Media
2007	17,2	16,7	16,6	17,3	16,5	14,7	15,8	15,5	16,0	16,3	16,2	16,2	195,0	16,3
2008	15,9	15,5	16,0	16,2	15,9	15,5	14,8	15,2	15,9	16,4	16,6	16,6	190,5	15,9

FUENTE: INAMHI

### Humedad relativa media (%)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual	Media
2007	74	75	76	75	78	80	73	75	75	75	77	75	908	76
2008	77	79	75	76	74	71	75	71	71	73	74	74	890	74

FUENTE: INAMHI

### Velocidad media del viento (m/s.)

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual	Media
2007	2,4	2,1	1,4	1,5	1,0	3,7	4,6	3,0	3,5	1,8	1,7	1,5	28,2	2,4
2008	1,0	0,9	1,1	1,1	2,0	2,6	2,7	2,2	2,8	1,4	1,1	1,0	18,8	1,6

FUENTE: INAMHI



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### MÉTODO BLANEY CREDDLE GLOBAL

#### Año 2007

Latitud: 4°1'50" Sur  
Cultivo: Algodón  
Mes de siembra: Abril  
Ciclo vegetativo: 7  
Coeficiente Global Kg: 0.65

	Temp	Pi	fi	Kti	fi*Kti2
Ene	17,2	8,6451			
Feb	16,7	7,7406			
Mar	16,6	8,5061			
Abr	17,3	8,1616	13,1409	0,7783	10,2276
May	16,5	8,3710	13,1709	0,7534	9,9230
Jun	14,7	8,0830	12,0503	0,6974	8,4039
Jul	15,8	8,3630	12,8898	0,7316	9,4302
Ago	15,5	8,4013	12,8332	0,7223	9,2694
Sep	16	8,1939	12,7043	0,7378	9,3732
Oct	16,3	8,5484	13,3716	0,7472	9,9913
Nov	16,2	8,3409			
Dic	16,2	8,6451			
			90,1610		66,6186

Zona Normal

$$E_T = Kg \times F$$

$$E_T = 0.65 \times 90.161$$

$$E_T = 58.6047$$



LATITUD:  Seleccione la latitud

CULTIVO:

CICLO VEGETATIVO:

COEFICIENTE GLOBAL Kg:

MES DE SIEMBRA:

TEMPERATURA (°C)

ENERO:

FEBRERO:

MARZO:

ABRIL:

MAYO:

JUNIO:

JULIO:

AGOSTO:

SEPTIEMBRE:

OCTUBRE:

NOVIEMBRE:

DICIEMBRE:

ZONA

Normal  Arida

RESULTADOS

MESES	TEMPERATURA	Pi	Fi
Abril	17.3	8.16	13.14
Mayo	16.5	8.37	13.17
Junio	14.7	8.08	12.05
Julio	15.8	8.36	12.89
Agosto	15.5	8.4	12.83
Septiembre	16	8.19	12.7
Octubre	16.3	8.55	13.37
TOTAL	0	0	90.15

Zona normal:



### Año 2008

Latitud: 4°1'50" Sur  
Cultivo: Algodón  
Mes de siembra: Abril  
Ciclo vegetativo: 7  
Coeficiente Global Kg: 0.65

	Temp	Pi	fi	Kti	fi*Kti
Ene	15,9	8,6451			
Feb	15,5	7,7406			
Mar	16	8,5061			
Abr	16,2	8,1616	12,7291	0,7441	9,4717
May	15,9	8,3710	12,9405	0,7347	9,5074
Jun	15,5	8,0830	12,3470	0,7223	8,9182
Jul	14,8	8,3630	12,5061	0,7005	8,7605
Ago	15,2	8,4013	12,7176	0,7129	9,0664
Sep	15,9	8,1939	12,6667	0,7347	9,3062
Oct	16,4	8,5484	13,4108	0,7503	10,0621
Nov	16,6	8,3409			
Dic	16,6	8,6451			
			89,3178		65,0925

Zona Árida

$$E_T = Kg \times F$$

$$E_T = 0.65 \times 65.0925$$

$$E_T = 42.3101$$



Firefox > Hydrovlab > SIMULACIÓN > EVAPOTRA... > Blaneyc

http://www.hydrovlab.utpl.edu.ec/hydrovlab/experimentos/simulacion/evapotraspiracion/mblaneyc.aspx

LATITUD: 4.030555555 Seleccione la latitud

CULTIVO: Algodon

CICLO VEGETATIVO: 7

COEFICIENTE GLOBAL Kg: 0.65

MES DE SIEMBRA: Abril

TEMPERATURA (°C)

ENERO : 15.9

FEBRERO: 15.5

MARZO: 16

ABRIL: 16.2

MAYO: 15.9

JUNIO: 15.5

JULIO: 14.8

AGOSTO: 15.2

SEPTIEMBRE: 15.9

OCTUBRE: 16.4

NOVIEMBRE: 16.6

DICIEMBRE: 16.6

ZONA

Normal  Arida

RESULTADOS

MESES	TEMPERATURA	Pi	Fi
Abril	16.2	0.74	9.47
Mayo	15.9	0.73	9.51
Junio	15.5	0.72	8.92
Julio	14.8	0.7	8.76
Agosto	15.2	0.71	9.07
Septiembre	15.9	0.73	9.31
Octubre	16.4	0.75	10.06
TOTAL	0	0	65.1

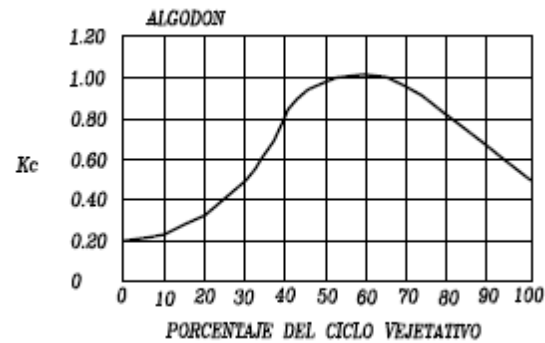
Zona arida: 42.32

Inicio | Blaneyc - Mozilla Firefox | D@NNY (H:) | Tesis Danny - Microso... | ES | 14:05



## MÉTODO BLANEY CRIDDLE PARCIAL

Latitud: 4°1'50" Sur  
Cultivo: Algodón  
% Crecimiento: 40  
Mes de siembra: Abril  
Temperatura: 17.3 °C



$$Eti = Kci \times fi$$

$Kci = 0.80$  Grafico

$$fi = Pi \left[ \frac{(Ti + 17.8)}{21.8} \right]$$

$Pi = 8.1616$  Tabla N°3

$$fi = 13.1409$$
$$Eti = 10.5127$$



### METODO DE BLANEY CRIDDLE PARCIAL

INGRESO DE DATOS

LATITUD:

CULTIVO:

% CRECIMIENTO CULTIVO:

TEMPERATURA DEL MES (°C):

MES DE SIEMBRA:

RESULTADOS

Kci:

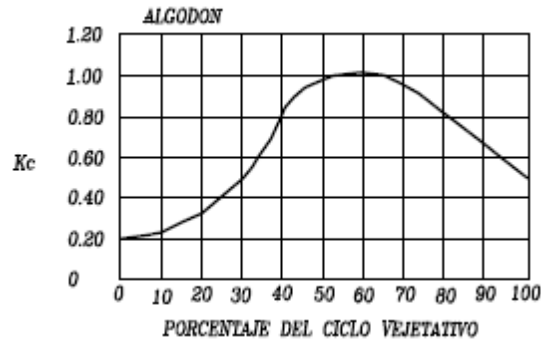
Fi:

Eti:



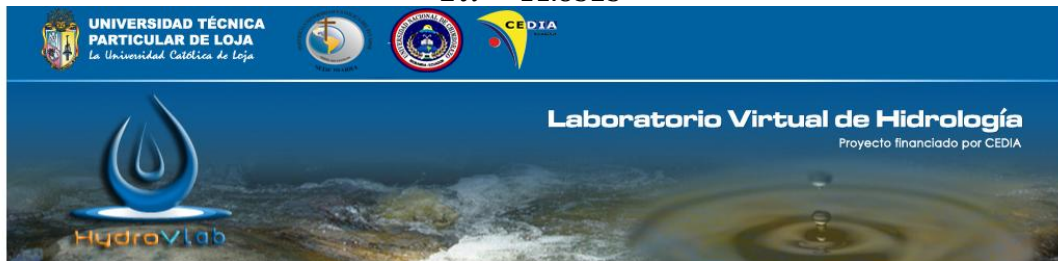
## MÉTODO BLANEY CREDDLE PARCIAL

Latitud: 4°1'50" Sur  
 Cultivo: Algodón  
 % Crecimiento: 70  
 Mes de siembra: Abril  
 Temperatura: 16.2 °C



$$Eti = Kci \times fi$$

$Kci = 0.93$       Grafico  
 $fi = Pi \left[ \frac{(Ti + 17.8)}{21.8} \right]$       Tabla N°3  
 $Pi = 8.1616$   
 $fi = 12.7288$   
 $Eti = 11.8323$



### METODO DE BLANEY CRIDDLE PARCIAL

INGRESO DE DATOS

LATITUD:

CULTIVO:

% CRECIMIENTO CULTIVO:

TEMPERATURA DEL MES (°C):

MES DE SIEMBRA:

RESULTADOS

Kci:

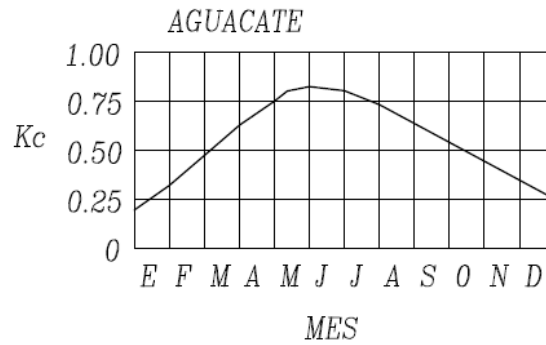
Fi:

Eti:



### MÉTODO BLANEY CREDDLE PARCIAL PERENNE

Latitud: 4°1'50" Sur  
Cultivo: Aguacate  
Mes para ETP: Agosto  
Temperatura: 15.5 °C



$$Eti = Kci \times fi$$

$Kci = 0.70$  Grafico

$$fi = Pi \left[ \frac{(Ti + 17.8)}{21.8} \right]$$

$Pi = 8.1616$  Tabla N°3

$$fi = 12.4670$$

$$Eti = 8.9769$$

### METODO DE CRIDDLE PARCIAL PERENNE

**INGRESO DE DATOS**

LATITUD:

CULTIVO:

MES PARA ETP:

TEMPERATURA DEL MES (°C):

**RESULTADOS**

Kci:

Fi:

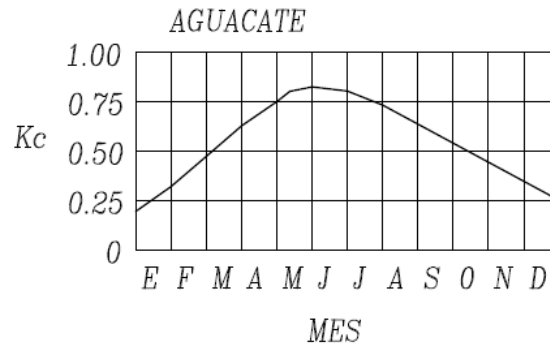
Eti:





### MÉTODO BLANEY CREDDLE PARCIAL PERENNE

Latitud: 4°1'50" Sur  
Cultivo: Aguacate  
Mes para ETP: Noviembre  
Temperatura: 16.6 °C



$$Eti = Kci \times fi$$

$Kci = 0.37$       Grafico

$$fi = Pi \left[ \frac{(Ti + 17.8)}{21.8} \right]$$

$Pi = 8.1616$       Tabla N°3

$$fi = 12.9790$$

$$Eti = 4.7652$$

### METODO DE CRIDDLE PARCIAL PERENNE

**INGRESO DE DATOS**

LATITUD:

CULTIVO:

MES PARA ETP:

TEMPERATURA DEL MES (°C):

**RESULTADOS**

Kci:

Fi:

Eti:



## MÉTODO DE PENMAN

Temperatura:	17.2 °C
Humedad Relativa (h):	0.74
Relación (n/D):	0.45
Velocidad del viento:	2.4 m/s
Cantidad de energía:	550 cal/cm <sup>2</sup> /día
Albedo de superficie:	0.06

- Presión de saturación de vapor a la temperatura  $t_a$  del aire.

De la Tabla N° 4  
 $e = 14.71$  mm Hg

- Presión actual de vapor a la temperatura actual  $t_a$  del aire.

$$h = 0.74 = \frac{e_a}{e}$$

$$e_a = 14.71 * 0.74 = 10.8854$$

- Temperatura absoluta del aire, en °K.

$$T_a = 17.2 + 273 = 290.2$$

$$\Delta = \frac{e'_s - e}{t'_s - t} = \frac{e_{17.25} - e_{17.15}}{17.25 - 17.15} = 1 \text{ mm de Hg/}^\circ\text{C}$$

$\Delta$  = gradiente de presión de saturación de vapor a temperatura del aire

$$R_c = R_a (0.20 + 0.48 \frac{n}{D}) = 228.8 \left( \frac{\text{cal/cm}^2}{\text{día}} \right)$$

$$R_l = R_c(1 - r) = 228.8(1 - 0.06) = 215.07$$

$$R_B = 117.4 * 10^{-9} * 293^4 (0.47 - 0.077\sqrt{e_a})(0.20 + 0.8 * \frac{n}{D}) = 100.69$$

$$H = R_l - R_B = 114.38$$

$$E'_a = 21(14.71 - 10.8854)(0.5 + 0.54 * 5) = 144.25$$

$$E'_o = \frac{1 * 114.38 + 0.49 * 144.38}{1 + 0.49} = 124.24$$

$$E'_o = 2.07 \text{ mm/día}$$



## METODO PENMAN

### INGRESO DE DATOS

TEMPERATURA (°C):	<input type="text" value="17.2"/>
HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (h):	<input type="text" value="0.74"/>
RELACION ENTRE INSOLACION ACTUAL E INSOLACION MAXIMA (n/D):	<input type="text" value="0.45"/>
VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s):	<input type="text" value="2.4"/>
CATIDAD DE ENERGIA ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="550"/>
ALBEDO DE SUPERFICIE:	<input type="text" value="0.06"/>

### PROCESO DEL METODO DE PENMAN

e (mmHg):	<input type="text" value="14.71"/>
Ea (mmHg):	<input type="text" value="10.8854"/>
Ta (°K):	<input type="text" value="290.2"/>
Δ (mm de Hg/°C):	<input type="text" value="1"/>
Rc ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="228.8"/>
RI ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="215.07"/>
RB ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="100.69"/>
H ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="114.38"/>
Ea ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="144.25"/>
E'o ((cal/cm <sup>2</sup> )/dia):	<input type="text" value="124.2"/>
E'o (mm/dia):	<input type="text" value="2.07"/>



## MÉTODO THORWAITE

Año 2007

	Temp	Ij	Ka	Uj
Ene	17,2	6,4916	1,0561	7,0307
Feb	16,7	6,208	0,9481	6,0163
Mar	16,6	6,1518	1,0400	6,5354
Abr	17,3	6,5488	1,0019	6,733
May	16,5	6,0958	1,0239	6,3713
Jun	14,7	5,1177	0,9939	5,1263
Jul	15,8	5,7086	1,0239	5,938
Ago	15,5	5,5453	1,0319	5,8008
Sep	16	5,8183	1,0019	5,9304
Oct	16,3	5,9843	1,0481	6,394
Nov	16,2	5,9288	1,0261	6,1975
Dic	16,2	5,9288	1,0561	6,3787

71,5278

$$a = 675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 179 \times 10^{-4} \times I + 0,492$$
$$a = 1,6249$$



## MÉTODO DE THORWAITE

### INGRESO DE DATOS

LATITUD:

EVAPOTRANSPIRACIÓN

ENERO:

FEBRERO:

MARZO:

ABRIL:

MAYO:

JUNIO:

JULIO:

AGOSTO:

SEPTIEMBRE:

OCTUBRE:

NOVIEMBRE:

DICIEMBRE:

### PROCESO DEL METODO DE THORWAITE

MESES	TEMPERATURA	lj	Ka	Uj
Enero	17.2	6.49	1.06	7.03
Febrero	16.7	6.21	0.95	6.02
Marzo	16.6	6.15	1.04	6.54
Abril	17.3	6.55	1	6.73
Mayo	16.5	6.1	1.02	6.37
Junio	14.7	5.12	0.99	5.13
Julio	15.8	5.71	1.02	5.94
Agosto	15.5	5.55	1.03	5.8
Septiembre	16	5.82	1	5.93
Octubre	16.3	5.98	1.05	6.39
Noviembre	16.2	5.93	1.03	6.2
Diciembre	16.2	5.93	1.06	6.38
	0	71.53	0	0

I:

a:



**Año 2008**

	Temp	Ij	Ka	Uj
Ene	15,9	5,7633	1,0561	6,327
Feb	15,5	5,5453	0,9481	5,4556
Mar	16	5,8183	1,0400	6,2927
Abr	16,2	5,9288	1,0019	6,1825
May	15,9	5,7633	1,0239	6,1341
Jun	15,5	5,5453	0,9939	5,7191
Jul	14,8	5,1705	1,0239	5,4763
Ago	15,2	5,3836	1,0319	5,757
Sep	15,9	5,7633	1,0019	6,0023
Oct	16,4	6,0399	1,0481	6,5943
Nov	16,6	6,1518	1,0261	6,5809
Dic	16,6	6,1518	1,0561	6,7733

69,0252

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

$$a = 1,5822$$



## MÉTODO DE THORWAITE

### INGRESO DE DATOS

LATITUD:   ▼

EVAPOTRANSPIRACIÓN

ENERO:

FEBRERO:

MARZO:

ABRIL:

MAYO:

JUNIO:

JULIO:

AGOSTO:

SEPTIEMBRE:

OCTUBRE:

NOVIEMBRE:

DICIEMBRE:

### PROCESO DEL METODO DE THORWAITE

MESES	TEMPERATURA	Ij	Ka	Uj
Enero	15.9	5.76	1.06	6.33
Febrero	15.5	5.55	0.95	5.46
Marzo	16	5.82	1.04	6.29
Abril	16.2	5.93	1	6.18
Mayo	15.9	5.76	1.02	6.13
Junio	15.5	5.55	0.99	5.72
Julio	14.8	5.17	1.02	5.48
Agosto	15.2	5.38	1.03	5.76
Septiembre	15.9	5.76	1	6
Octubre	16.4	6.04	1.05	6.59
Noviembre	16.6	6.15	1.03	6.58
Diciembre	16.6	6.15	1.06	6.77
	0	69.03	0	0

I:

a:

**MÉTODO BALANCE HIDRICO**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	50,1	66,3	93,4	98,8	80,7	120	11,3	152,4	55	55,7	153,7	77,6
ET	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
P-ET	24,1	36,3	53,4	53,8	20,7	42	-79,7	60,4	-16	8,7	124,7	55,6
R	100	100	100	100	100	100	20,3	80,7	64,7	73,4	100	100
VR	0	0	0	0	0	0	-79,7	60,4	-16	8,7	26,6	0
ETR	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ex	24,1	36,3	53,4	53,8	20,7	42	0	0	0	0	98,1	55,6

**RESULTADOS**

EJEMPLO          DESCARGAR RESULTADOS <input type="checkbox"/> NUEVO <input type="checkbox"/> CALCULAR												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P	50.1	66.3	93.4	98.8	80.7	120	11.3	152.4	55	55.7	153.7	77.6
ET	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
P-ET	24.1	36.3	53.4	53.8	20.7	42	-79.7	60.4	-16	8.7	124.7	55.6
R	100	100	100	100	100	100	20.3	80.7	64.7	73.4	100	100
VR	0	0	0	0	0	0	-79.7	60.4	-16	8.7	26.6	0
ETR	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EX	24.1	36.3	53.4	53.8	20.7	42	0	0	0	0	98.1	55.6





	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	62,4	251	237,9	137,8	75,2	51,3	89,5	89,7	20,6	136,4	102,9	126,3
ET	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
P-ET	36,4	221	197,9	92,8	15,2	-26,7	-1,5	-2,3	-50,4	89,4	73,9	104,3
R	100	100	100	100	100	73,3	71,8	69,5	19,1	100	100	100
VR	0	0	0	0	0	-26,7	-1,5	-2,3	-50,4	80,9	0	0
ETR	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ex	36,4	221	197,9	92,8	15,2	0	0	0	0	8,5	73,9	104,3

## RESULTADOS

EJEMPLO          DESCARGAR RESULTADOS <input type="checkbox"/> NUEVO <input type="checkbox"/> CALCULAR												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P	62.4	251	237.9	137.8	75.2	51.3	89.5	89.7	20.6	136.4	102.9	126.3
ET	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
P-ET	36.4	221	197.9	92.8	15.2	-26.7	-1.5	-2.3	-50.4	89.4	73.9	104.3
R	100	100	100	100	100	73.3	71.8	69.5	19.1	100	100	100
VR	0	0	0	0	0	-26.7	-1.5	-2.3	-50.4	80.9	0	0
ETR	26	30	40	45	60	78	91	92	71	47	29	22
D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EX	36.4	221	197.9	92.8	15.2	0	0	0	0	8.5	73.9	104.3



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

De la presente investigación, con la verificación de ejercicios realizados en libros se ha llegado a concluir:

- a) La comparación de los resultados obtenidos en el HydroVLab y ejemplos realizados en hojas electrónicas de Excel, permitió comprobar una similitud en los resultados, lo que valida la implementación informática de las herramientas desarrolladas.
- b) Se ha chequeado cada herramienta minuciosamente para asegurarse que los resultados se han efectivos y eficientes; lo que facilita el cálculo de la evapotranspiración en HydroVlab.
- c) La implementación de los algoritmos de evapotranspiración y balance hídrico en el laboratorio virtual de hidrología (HYDROVLAB). Permite enriquecer de una manera operativa el aprendizaje de la hidrología ya que sus resultados son eficientes y efectivos.
- d) La implementación de metodologías para el cálculo evapotranspiración y balance hídrico es una herramienta que se puede ser utilizada en el entorno web, y que facilita el cálculo de la evapotranspiración y balance hídrico al ser estos datos muy importantes en diseño de sistemas de riego.

### 4.2 RECOMENDACIONES

- a) Se recomienda la ampliación de datos por ejemplo en la Tabla N° 4 hay valores para temperaturas de hasta 30°C en positivo y en -16°C para su mejor funcionamiento en la sección de análisis de la evapotranspiración, para su mejor funcionamiento.
- b) Con el fin de mejor el estudio de la evapotranspiración se podrían implementar más métodos, con la cual existiría una mayor información con la que se podrá comparar para un mejor análisis.
- c) Comparar los resultados teóricos obtenidos en HydroVLab con resultados reales obtenidos en campo para seleccionar el método que presente el mejor desempeño en la estimación de la evapotranspiración y de balance hídrico en nuestro medio.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F 2001, Fundamentos de Hidrología de Superficie, México, Limusa S.A.
- Oñate, F 2008, Manual de hidrología
- Monsalve, G 1999, Hidrología en la Ingeniería (2ª ed) (5ª Reimpresión), Bogotá, Nuevas Ediciones Ltda.
- Visual Basic un¿bicado: [http://es.wikipedia.org/wiki/Visual\\_Basic\\_.NET](http://es.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic_.NET)
- Zimmerman, D 1981, El Riego, (6ª impresión), México, Continental