



Unidad 4

Evapotranspiración y flujos de energía superficie- atmósfera





Evaporación:

- "Proceso físico de transformación del agua líquida en vapor" (Llamas, 1993)
- "Flujo neto de humedad dirigido hacia la atmósfera" (Singh, 1989).
- "Proceso por el cual el agua es transferida desde las superficies libres y el suelo hacia la atmósfera" ,
- "Flujo neto de transferencia de vapor" (Viessman & Lewis, 2003).
- "Es un proceso de difusión que sigue la primera ley de Fick" (Dingman, 2002).

Se refiere a la **evaporación** como un fenómeno físico gobernado por la **difusión molecular** del vapor de agua desde una superficie (como el suelo o el agua) hacia la atmósfera.

Es una ley de la física que describe cómo una sustancia (en este caso, vapor de agua) se difunde en un medio (el aire), desde donde hay más concentración hacia donde hay menos.

Símbolo	Significado	Unidad
E_s	Tasa de evaporación desde la superficie	mm/día, kg/m ² /s
K	Coeficiente de transferencia (depende del viento y condiciones)	— (empírico)
e_s	Presión de vapor de saturación en la superficie (agua o suelo)	kPa
e_a	Presión de vapor en el aire ambiente	kPa
e_d	Déficit de presión de vapor = $e_s - e_a$	kPa

$$E_s = K(e_s - e_a) = K(e_s - e_d)$$

Ecuación de Dalton, 1802



Es la diferencia entre la presión de vapor de saturación del aire (es decir, la máxima cantidad de vapor de agua que el aire puede contener a una temperatura dada) y la presión de vapor real del aire.

Se expresa así:

$$D = e_s - e_a$$

Dependencia de la Evaporación directa (Es):

- Factores físicos:

- Calor latente de vaporización, dependiente a su vez de la radiación solar directa o indirecta.
- Temperatura del aire, con incremento del contenido de vapor a medida que la temperatura resulta mayor.
- Temperatura del cuerpo de agua, a mayor temperatura mayor vaporización.
- Déficit de saturación o higrométrico, diferencia de presión de vapor entre aire húmedo y el punto de rocío.

- Factores regionales:

- Velocidad del viento.
- Presión atmosférica, en relación directamente proporcional.
- Naturaleza de la superficie, rugosidad, posibilidad de generar mayor turbulencia.

Donde:

- D : Déficit de saturación o higrométrico (Pa o hPa)
- e_s : Presión de vapor de saturación (a una temperatura dada)
- e_a : Presión de vapor actual del aire



Medición de la Evaporación directa (Es):

- a) En reservorios, $Es = \text{Entradas} - \text{Salidas} + \text{Variaciones del almacenamiento}$ (Balance de masa)
- b) Tanques, normalizados de acuerdo a distintas reparticiones (Tanque A, Colorado, etc.)
- c) Evaporímetros, $Es = \text{Variación almacenamiento}$ (Piché, Bellami, Livingston, etc.)



Cálculo de la Evaporación directa (Es):

- a) Métodos basados en la transferencia de masa (ecuación de difusión + aerodinámica) .
- b) Métodos basados en un balance energético (radiación, calor latente, calor sensible, relación de Bowen)
- c) Combinación de los anteriores:

$$E_s = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_{(\text{energía})} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_{(\text{aerodinámico})} \quad (\text{Penman, 1948})$$

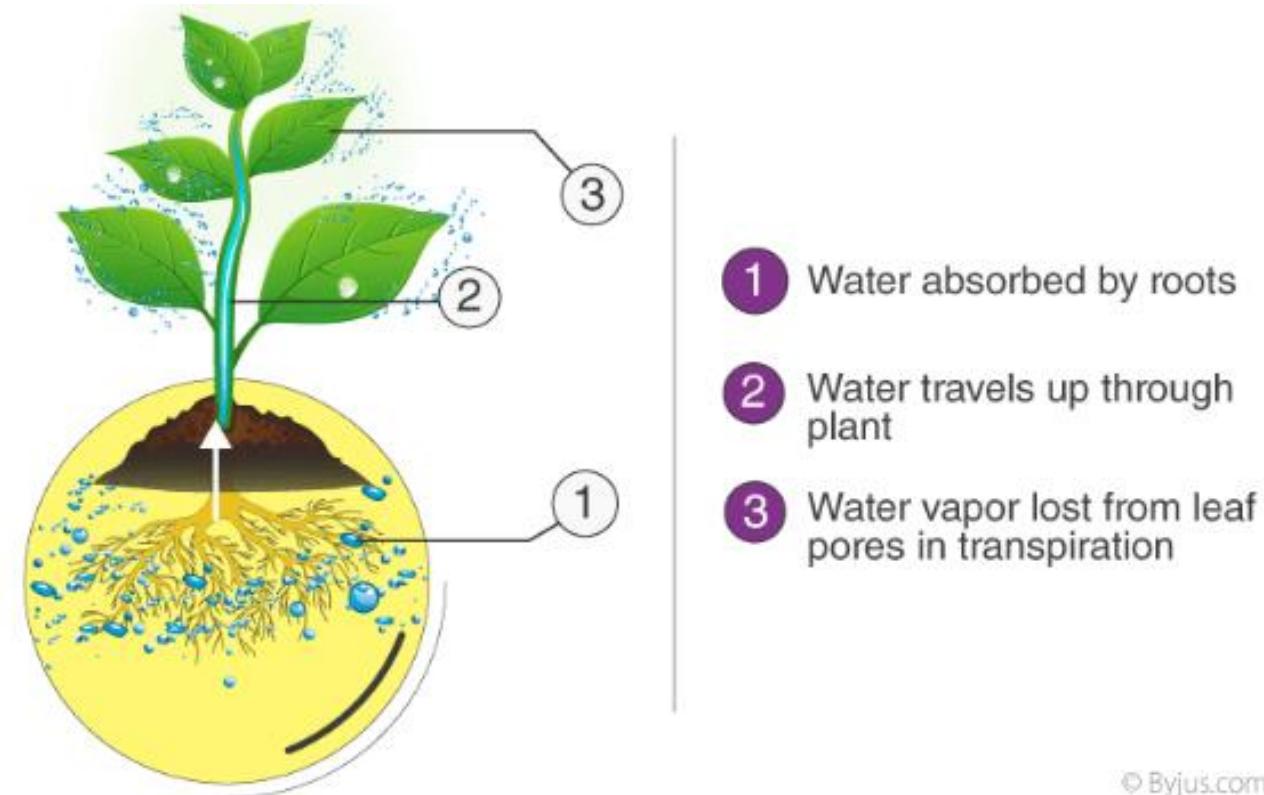


¿Qué es la transpiración?

La liberación de vapor de agua (gas) de las hojas de las plantas.

La transpiración tiene tres pasos principales

1. Las raíces absorben agua del suelo.
2. El agua se mueve a través de los tejidos vegetales y cumple funciones metabólicas y fisiológicas críticas en la planta.
3. Las hojas liberan vapor de agua al aire a través de sus estomas.





¿Cuánta agua transpiran las plantas?

La transpiración de las plantas es un proceso prácticamente invisible. Dado que el agua se evapora de la superficie de las hojas, no se ve simplemente cómo "respiran". Sin embargo, que no se pueda ver el agua no significa que no se esté liberando al aire. Una forma de visualizar la transpiración es colocar una bolsa de plástico alrededor de algunas hojas. Como muestra esta imagen, el agua transpirada se condensará en el interior de la bolsa (esta foto muestra la transpiración después de una hora).



Durante la temporada de crecimiento, una hoja transpirará mucho más agua que su propio peso. Un acre de maíz libera entre 11 400 y 15 100 litros de agua al día, y un roble grande puede transpirar 151 000 litros al año.

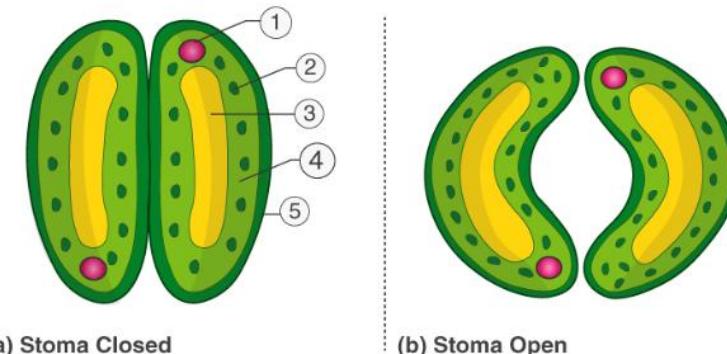
Como el vapor de agua también se evapora del suelo, habríamos visto incluso más vapor de agua capturado si hubiéramos envuelto la bolsa de plástico alrededor del suelo también.



¿Qué afecta la transpiración?

Las plantas echan raíces en el suelo para absorber agua y nutrientes a sus tallos y hojas. Parte de esta agua regresa al aire mediante la transpiración. Las tasas de transpiración varían considerablemente según el clima y otras condiciones, como:

- Tipo de planta**: Las plantas transpiran agua a diferentes ritmos. Algunas plantas que crecen en regiones áridas, como los cactus y las suculentas, conservan el valioso recurso hídrico transpirando menos agua que otras.



Plantas C₃

Los vegetales con ruta metabólica C₃ representan alrededor del 89 % de las plantas vasculares del planeta y la mayoría de los cultivos tienen este tipo de mecanismo. Algunos ejemplos de cultivos con mecanismo C₃ son: [arroz](#), [trigo](#), [cebada](#), [soya](#), [pimiento](#) y [tomate](#).



Figura 2. Ejemplos de plantas C₃: papa, trigo y tomate.

Fuente: Intagri

Plantas C₄

La ruta metabólica C₄ forma parte de la evolución de las plantas para evitar la fotorespiración. Esta ruta metabólica es una adaptación de las plantas para tener una [eficiencia en el uso del agua](#) mayor que las plantas C₃. Aunque el porcentaje de plantas C₄ es menor, algunos cultivos de importancia económica tienen este tipo de metabolismo, por ejemplo: [maíz](#), [caña de azúcar](#), [sorgo](#) y [amaranto](#).



Figura 3. Ejemplos de plantas C₄: maíz, caña de azúcar y sorgo.

Fuente: Intagri

Plantas CAM

A diferencia de los otros dos tipos, las plantas CAM además de inhibir la fotorespiración, sus adaptaciones evolucionaron para tolerar el estrés hídrico severo, ya que se caracterizan por la succulencia de tejidos o succulencia celular, disminución drástica de órganos fotosintéticos, cierre estomático diurno que evita la pérdida de agua, presencia de sistemas radiculares extensivos, etc. Aproximadamente el 7 % de las plantas vasculares tienen la ruta metabólica CAM, donde destacan plantas que habitan en zonas cálidas y secas como lo desiertos, seguido de especies epíticas de zonas tropicales y subtropicales, así como plantas acuáticas.



Figura 4. Ejemplos de plantas CAM: piña, pitahaya y orquídeas.

Fuente: Intagri

Estomas en el haz

Estomas en el haz y envés (anfiestomáticas). Menor perdida de agua y mayor fijación de CO₂

Durante el día, las plantas CAM no abren sus estomas, pero todavía pueden llevar a cabo la fotosíntesis. Eso se debe a que los ácidos orgánicos se transportan fuera de las

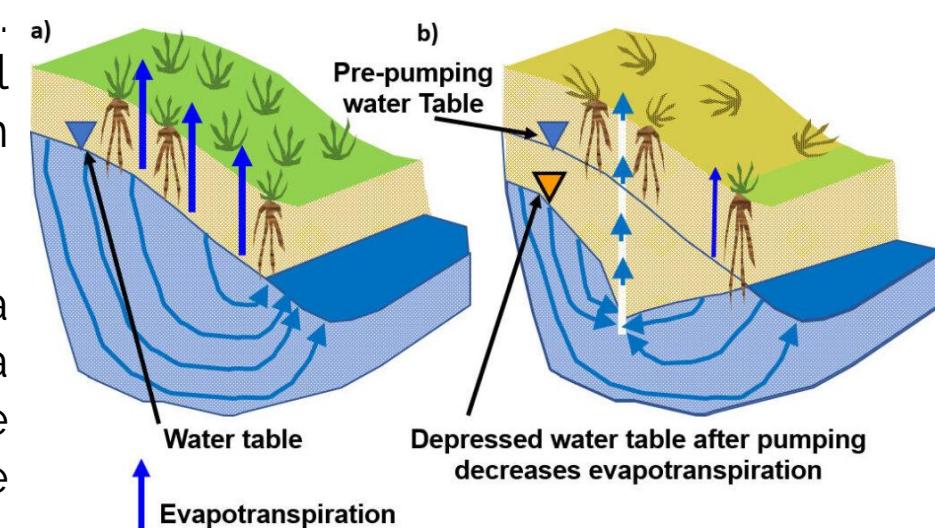
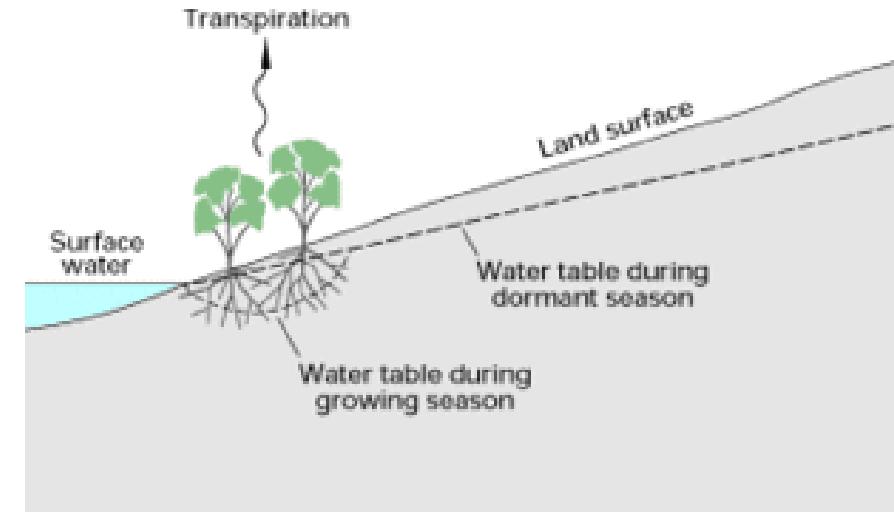


Cómo afecta la transpiración a las aguas subterráneas?

Extracción directa desde el acuífero: En zonas donde el nivel freático se encuentra cercano a la superficie, como en regiones húmedas, semihúmedas o áreas adyacentes a cuerpos de agua superficiales (lagos, océanos), las raíces pueden extenderse hasta la zona saturada. En estos casos, las plantas pueden extraer agua directamente del acuífero.

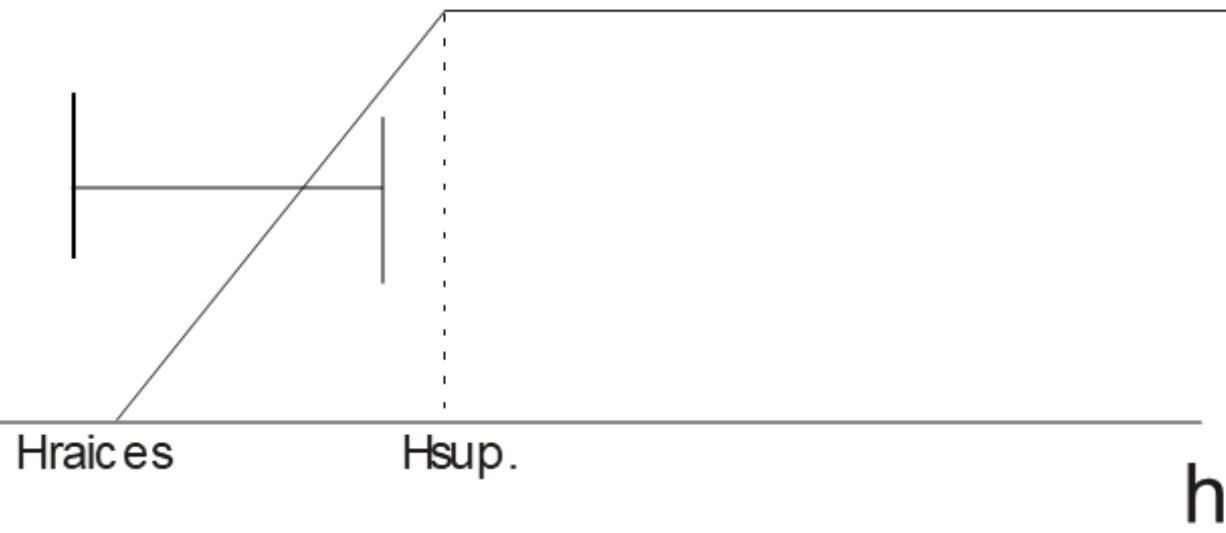
Efecto sobre el nivel freático: Cuando la vegetación transpira agua subterránea, se genera una disminución localizada del nivel freático. Este fenómeno puede producir un "cono de depresión" similar al inducido por un pozo de extracción, especialmente si la transpiración es intensa y sostenida.

Importancia ecohidrológica: Este proceso es clave en la dinámica ecohidrológica, pues vincula directamente la vegetación con la disponibilidad y fluctuación de las aguas subterráneas, y tiene implicaciones en la recarga, el balance hídrico y la gestión de acuíferos en ambientes sensibles.





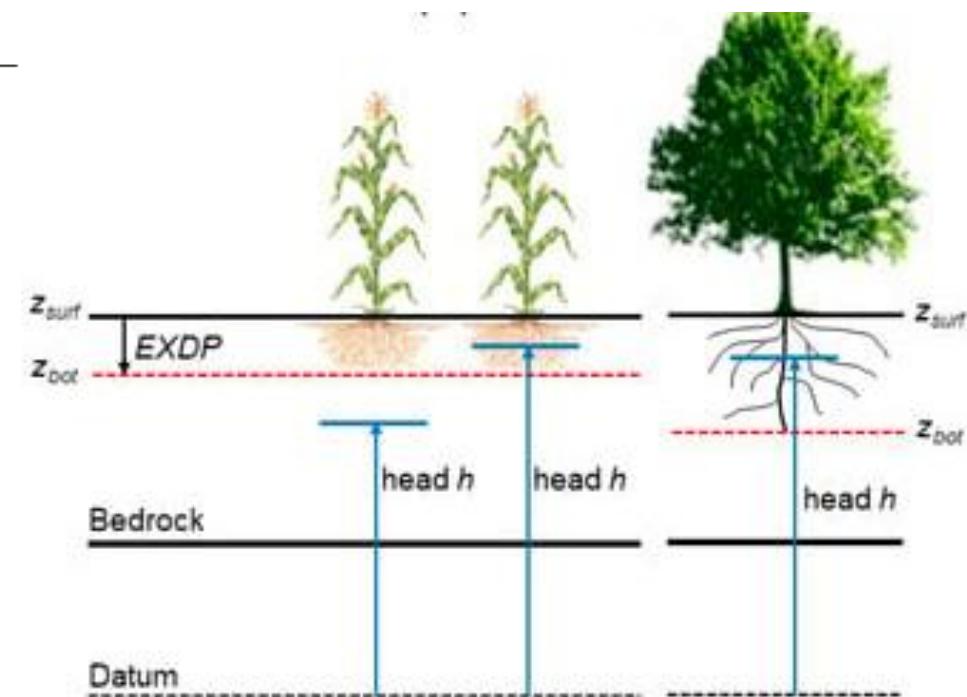
Evt



$$Evt = EVT_{\max} \quad si \quad h \geq H_{\text{sup}}$$

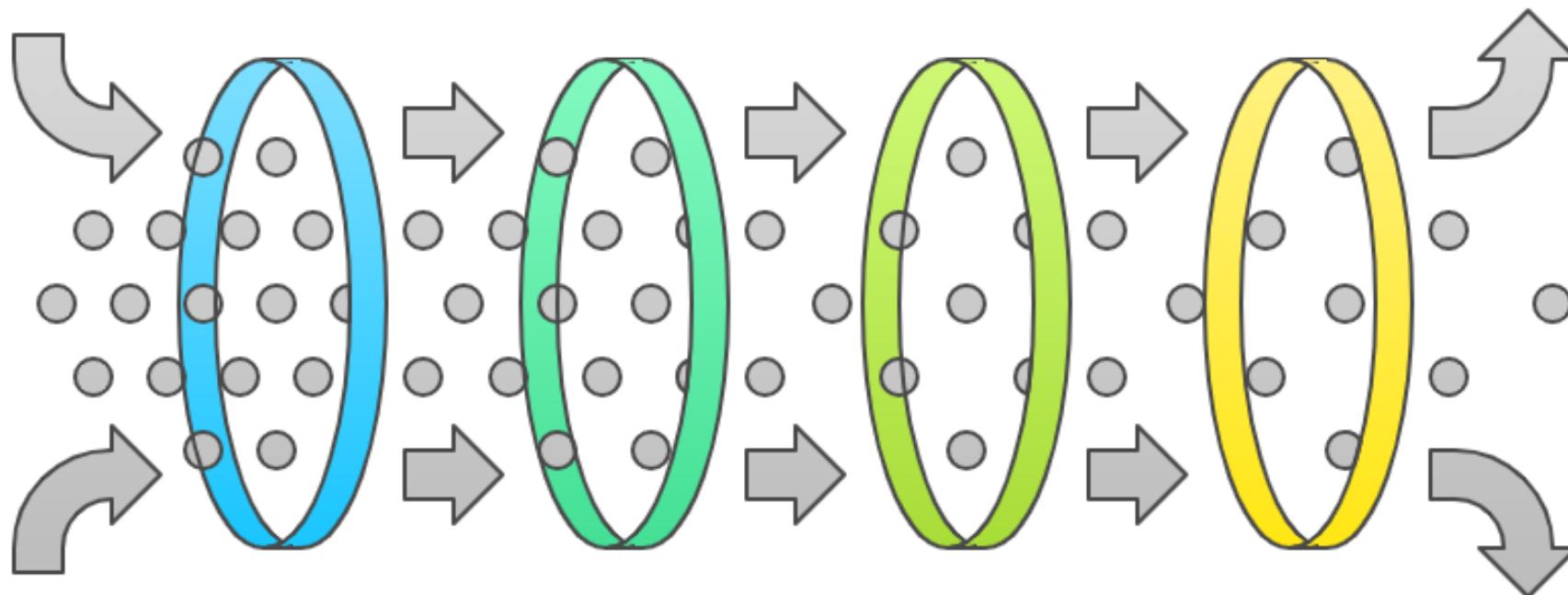
$$Evt = 0 \quad si \quad h \leq H_{\text{raices}}; \quad H_{\text{raices}} = H_{\text{sup}} - d$$

$$Evt = EVT_{\max} (h - H_{\text{raices}}) \quad si \quad H_{\text{raices}} < h < H_{\text{sup}}$$





La evapotranspiración es la suma de todos los procesos mediante los cuales el agua se desplaza desde la superficie terrestre hacia la atmósfera mediante la evaporación y la transpiración.



Evaporación del Suelo

Agua se evapora de la superficie del suelo

Evaporación Capilar

Agua se evapora de la franja capilar

Evaporación de Masas de Agua

Agua se evapora de ríos y lagos

Transpiración de Plantas

Agua se libera de las hojas de las plantas

La transpiración, que es el movimiento del agua del suelo hacia la atmósfera a través de las plantas. La transpiración ocurre cuando las plantas absorben agua líquida del suelo y liberan vapor de agua al aire desde sus hojas.



La evapotranspiración

- Es la suma de evaporación + transpiración.
- Es un intento para facilitar el estudio de procesos que son difíciles de analizar por separado.
- Su estudio es muy importante dado que representa el 60 a 70% del volumen de precipitación.
- Rigen las mismas aproximaciones que para el estudio de la evaporación directa (Es).
- Se amplia el rango de las estimaciones con procedimientos empíricos muy comprobados.
- Esto último porque son difíciles de evaluar el contenido real de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal de las plantas.



🌡️ Factores que afectan la evapotranspiración

1. Climáticos:

- **Radiación solar:** A mayor radiación, mayor evapotranspiración.
- **Temperatura del aire:** Incrementa la capacidad del aire para retener vapor de agua.
- **Humedad relativa:** A menor humedad del aire, mayor es la evapotranspiración.
- **Viento:** Facilita la remoción del vapor de agua, acelerando el proceso.

2. Del suelo:

- **Humedad del suelo:** Un suelo seco limita la ETR.
- **Textura y estructura:** Afectan la retención de agua y su disponibilidad para las plantas.

3. De la vegetación:

- **Tipo de cultivo o cobertura vegetal:** Algunas especies transpiran más que otras.
- **Estado de crecimiento:** Las plantas jóvenes transpiran menos que las adultas.
- **Densidad de la vegetación:** Coberturas densas generan más ETR.

4. Prácticas agrícolas:

- **Riego:** Aumenta la disponibilidad de agua y, por ende, la ETR.
- **Labranza y manejo del suelo:** Afectan la infiltración y almacenamiento del agua.





Tipos de evapotranspiración:

1. Evapotranspiración potencial (ETP):

1. Es la cantidad de agua que **se evaporaría y transpiraría si el agua estuviera disponible en cantidad ilimitada**.
2. Se calcula bajo condiciones ideales de humedad del suelo.
3. Se usa en diseño de riego y estudios climáticos.

2. Evapotranspiración real o actual (ETR):

1. Es la cantidad de agua que realmente **se pierde por evaporación y transpiración en un lugar y tiempo determinado**, dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo.

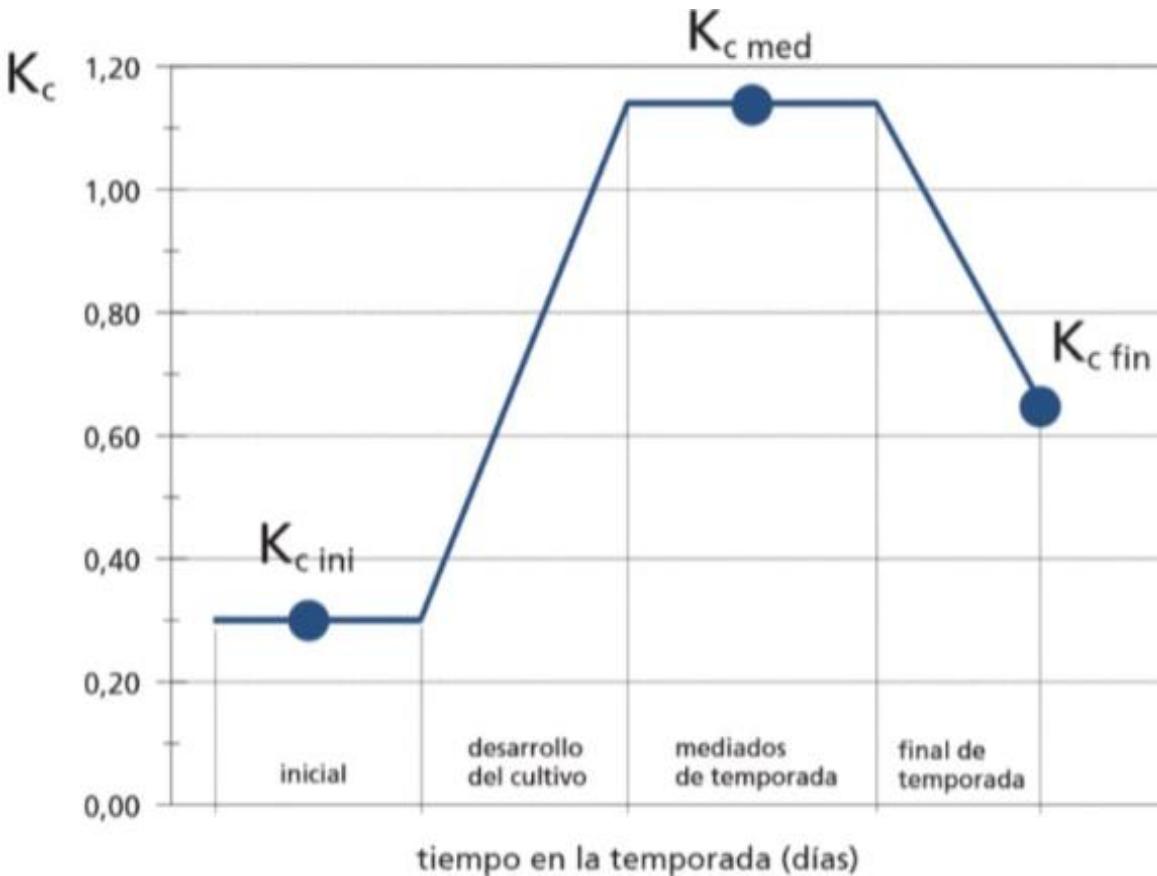
3. Evapotranspiración de referencia (ETo):

1. Es la **ETP de una superficie de referencia** (por lo general, césped bien regado).
2. Se utiliza como base para estimar la evapotranspiración de otros cultivos o coberturas vegetales mediante coeficientes (K_c)

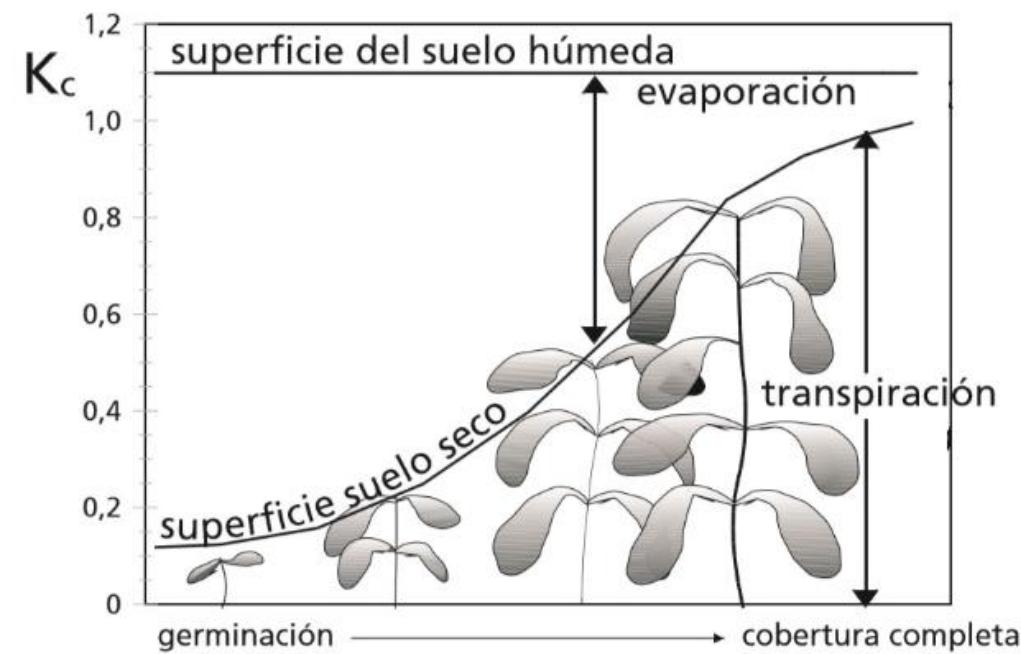


Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo (K_c) es un valor sin dimensiones que describe las variaciones de la cantidad de agua que son extraídas del suelo por las plantas (efecto combinado de evaporación y transpiración) a medida que éstas se van desarrollando, desde la siembra hasta la cosecha.



- El coeficiente de cultivo varía según el tipo de cultivo y según su estado de desarrollo. Unos autores distinguen tres valores de K_c y otros autores distinguen cuatro valores, según cada una de las fases de desarrollo del cultivo: inicial (I), desarrollo-media (II) y maduración (III) o bien inicial (I), desarrollo (II), media (III) y maduración (IV).
- K_c presenta valores pequeños al inicio del crecimiento del cultivo y aumentan a medida que se incrementa el desarrollo. El valor máximo se alcanza durante la floración, se mantiene durante la fase media y finalmente decrece durante la maduración, como puede apreciarse en la figura de abajo.
- Evidentemente hay grupos de cultivos que pueden tener K_c similares e incluso iguales, debido a la similitud de altura de los cultivos, área foliar, grado de cobertura del suelo y manejo del agua.





Grupo de cultivos	K _C ini	K _C med	K _C fin
Hortalizas pequeñas (crucíferas, apio, lechuga, zanahoria, espinaca, cebolla, rábano, etc.)	0.70	1.05	0.95
Solanáceas (tomate, chile, pimiento, berenjena)	0.60	1.15	0.80
Cucurbitáceas (pepino, ayote, zapallo, pipián, melón, sandía)	0.50	1.00	0.80
Raíces y tubérculos (remolacha, Yuca, papa, camote)	0.50	1.10	0.95
Leguminosas (frijol, habichuela, cacahuate, haba, arveja, soya)	0.40	1.15	0.55
Hortalizas perennes (alcachofa, espárrago, fresa)	0.50	1.00	0.80
Cultivos oleaginosos (ricino, colza, cártamo, ajonjoli, girasol)	0.35	1.15	0.35
Cereales (maíz, trigo, sorgo, arroz)	0.30	1.15	0.40
Pastos:	H*	S*	
- Alfalfa	0.50	0.40	0.85
- Leguminosas	0.55	0.55	1.00
- Pasto para heno	0.60	0.55	0.80
- Pasto bajo pastoreo	0.55	0.50	0.95
Caña de azúcar	0.40	1.25	0.75
Banano	0.50	1.10	1.00
Piña	0.50	0.30	0.30
Cítricos		H S	
		0.65 0.75	
Frutales de hoja caduca		H S	
		0.60 0.70	
Aguacate		H S	
		0.50 0.55	

(*) H = clima húmedo; S = clima seco

Para una primera aproximación al K_c pueden utilizarse los datos de la tabla 1 que son válidos para **zonas de climatología sub-húmeda** según los criterios de clasificación FAO, si bien lo aconsejable sería particularizar los valores de K_c para un cultivo determinado conforme se detalla en el **cuadro nº 12** del documento FAO 56.

Cultivo	Fase del cultivo			
	Inicial	Desarrollo	Media	Maduración
Chícharo (Arveja)	0.45	0.75	1.15	1.00
Berenjena	0.45	0.75	1.15	.80
Cebolla	0.45	0.70	1.05	.75
Lechuga	0.45	0.60	1.00	.90
Maíz	0.40	0.80	1.15	.70
Melón	0.45	0.75	1.15	0.85
Papa	0.45	0.75	1.15	0.85
Pimentón	0.35	0.70	1.05	0.90
Sandía	0.45	0.75	1.00	0.70
Tomate	0.45	0.75	1.15	0.80
Zanahoria	0.45	0.75	1.05	0.90
Betabel (Remolacha)	0.40	0.80	1.15	0.80
Soja	0.35	0.75	1.10	0.60
Tabaco	0.35	0.75	1.10	0.90
Avena	0.35	0.75	1.10	0.40
Cebada	0.35	0.75	1.10	0.65
Sorgo	0.35	0.75	1.10	0.65
Trigo	0.35	0.75	1.15	0.45



Métodos Para Calcular La Evapotranspiración

La unidad de medición estándar de la tasa de la evapotranspiración es el milímetro (mm) por unidad de tiempo. Denota la velocidad a la que se pierde una determinada profundidad de agua de una superficie cubierta por plantas. Dependiendo de sus objetivos, la unidad de tiempo puede variar desde una hora hasta toda una temporada de cultivo.

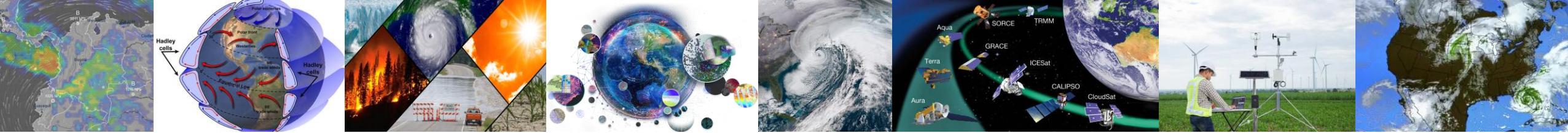
Los métodos para medir la evapotranspiración son diversos. Vamos a analizar los pros y contras de cada uno de estos métodos.



Lisímetros

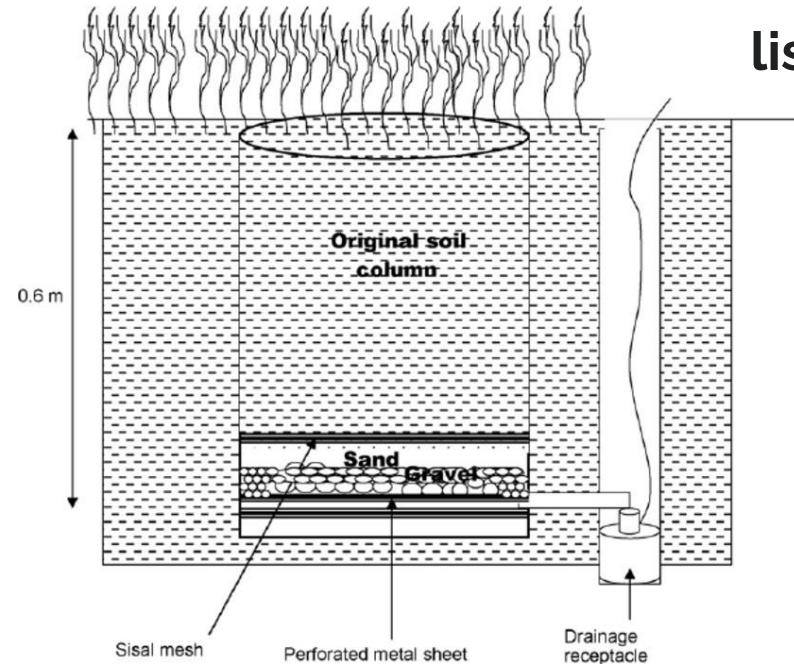
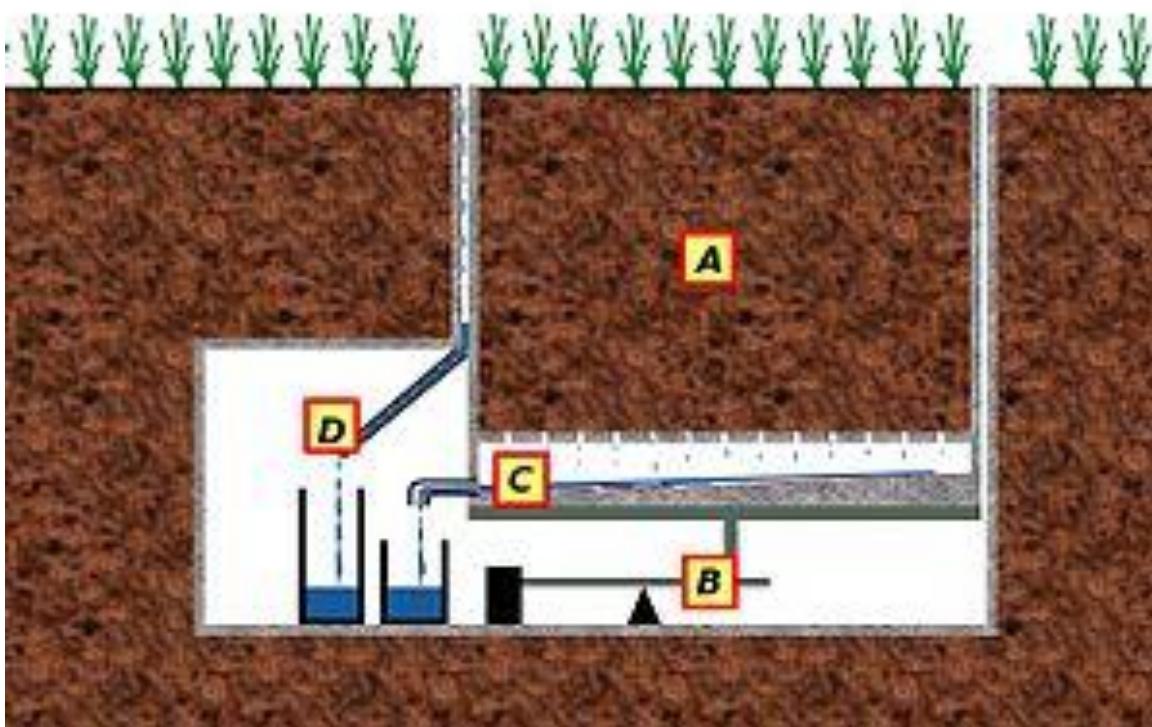
Para obtener lecturas precisas de evapotranspiración, algunos hidrólogos emplean lisímetros, instrumentos que consisten en contenedores subterráneos de suelo equipados con sistemas de pesaje o drenaje/vacio. Estos dispositivos permiten medir de forma directa la evapotranspiración real, evitando muchas de las dificultades asociadas con la modelación y el cálculo indirecto, ya que no requieren escalamiento ni interpretación compleja de los datos.

No obstante, su uso presenta algunas limitaciones. Los lisímetros son costosos, complejos de instalar y mantener, lo que dificulta su aplicación en áreas extensas. Si bien son altamente efectivos en parcelas pequeñas o en condiciones controladas como invernaderos, su operación manual para monitoreo diario resulta laboriosa y poco práctica en grandes extensiones agrícolas.

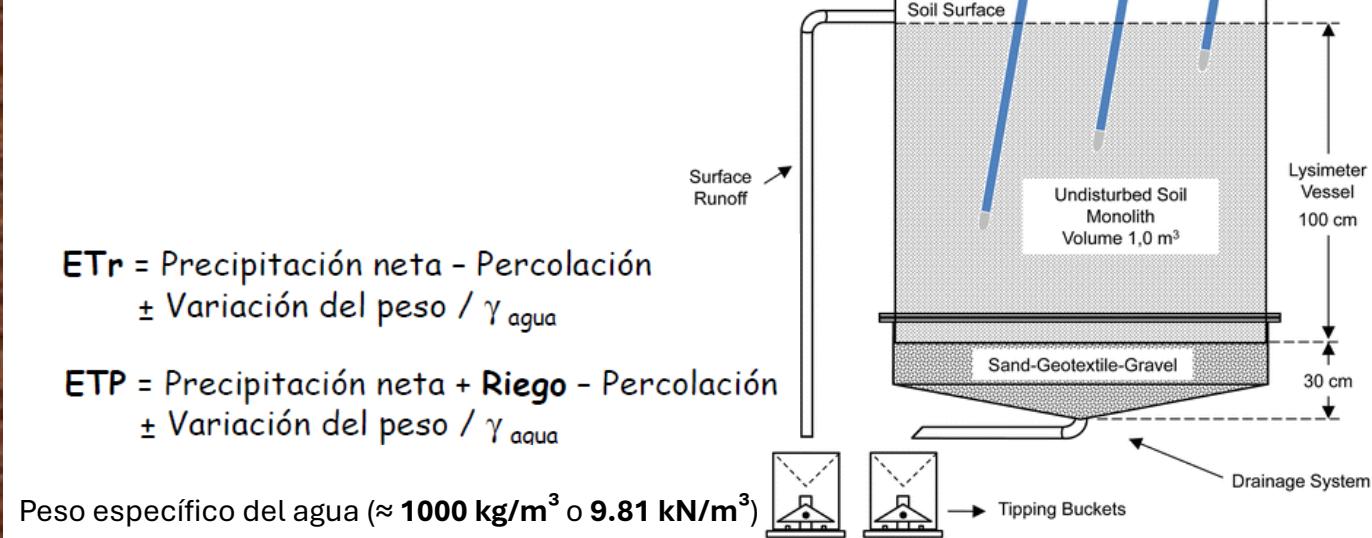


Lisímetro de balanza

- A) Terreno en estudio
- B) Balanza
- C) Recolección del agua de drenaje
- D) Recolección del agua de escorrentía



Lisímetro de gravedad



$$ET_r = \text{Precipitación neta} - \text{Percolación} \\ \pm \frac{\text{Variación del peso}}{\gamma_{\text{agua}}} / \gamma_{\text{agua}}$$

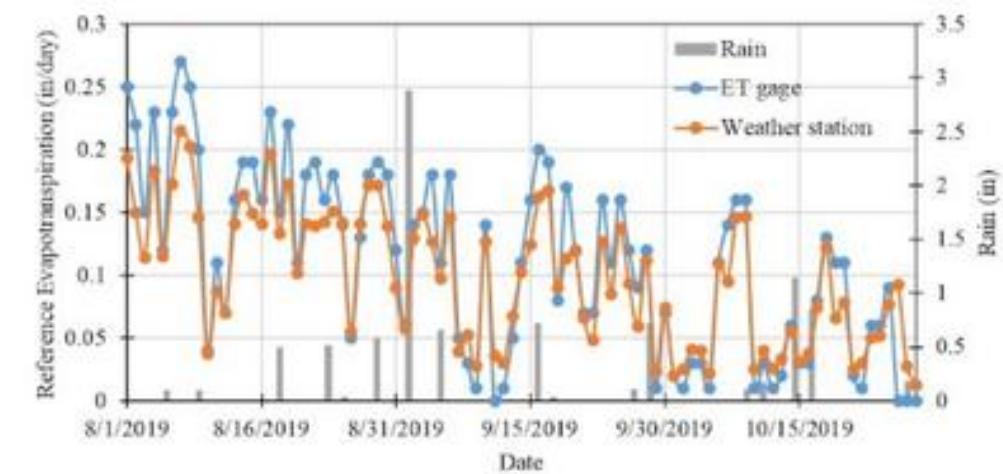
$$ET_p = \text{Precipitación neta} + \text{Riego} - \text{Percolación} \\ \pm \frac{\text{Variación del peso}}{\gamma_{\text{agua}}} / \gamma_{\text{agua}}$$

Peso específico del agua ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ o 9.81 kN/m^3)



Atmómetros

Un atmómetro es un instrumento utilizado para medir la evapotranspiración directa desde una superficie expuesta, generalmente agua o una tela porosa. Su función principal es estimar cuánta agua se pierde por evaporación y transpiración hacia la atmósfera en condiciones ambientales reales. Los agrónomos pueden realizar una estimación de la evapotranspiración midiendo cuánta agua del recipiente se pierde en la atmósfera. **Limitaciones:** No distingue entre evaporación y transpiración. Afectado por el viento, temperatura y radiación del entorno.





Balance Hídrico

El cálculo con este método se realiza habitualmente en zonas amplias en las que el caudal y la precipitación dictan por sí solos la entrada y salida de agua y en las que la cuenca es estrecha, para descartar cualquier otra fuente importante de entrada/salida. El método sólo puede proporcionar una estimación aproximada de la cantidad media de agua perdida por evaporación y transpiración en tierras cubiertas de plantas.

Método indirecto para calcular la evaporación, se basa en la ecuación de continuidad para un gran almacenamiento.

$$E = I - O - \Delta V$$

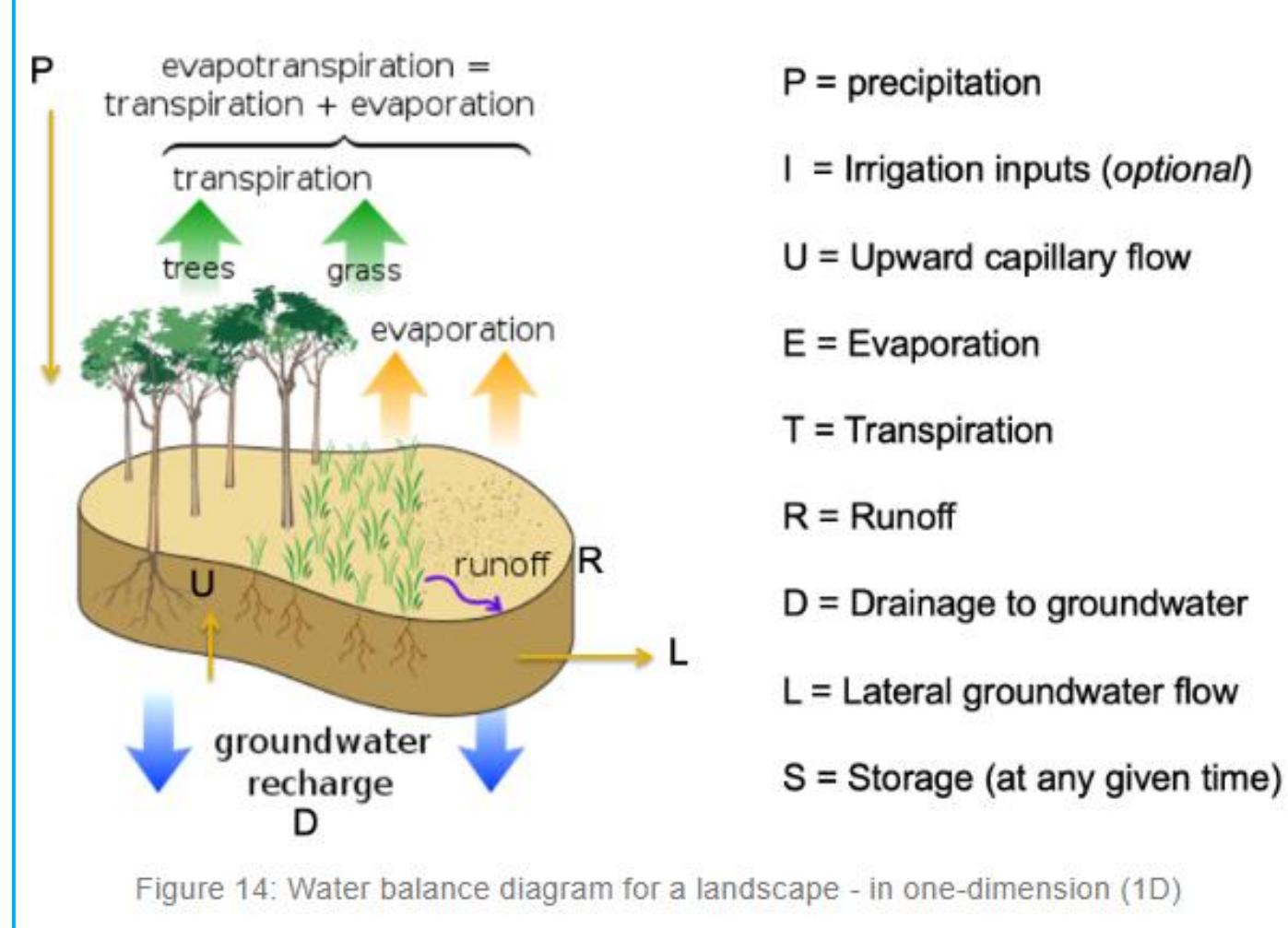
Donde:

E = Volumen de evaporación en el intervalo de tiempo Δt

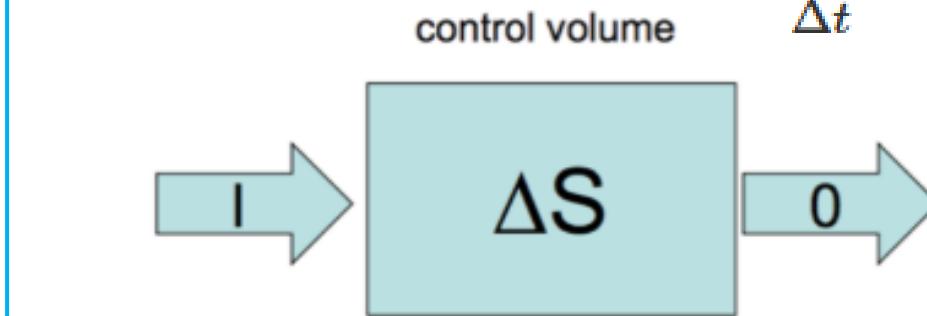
I = Volumen de entradas al vaso en el Δt (precipitación directa y escurrimiento)

O = Volumen de salidas del vaso en el Δt (infiltración y escurrimiento, en el caso de presas salidas por el vertedor y obras de toma)

ΔV = cambio en el volumen almacenado en el Δt



$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = I - O$$

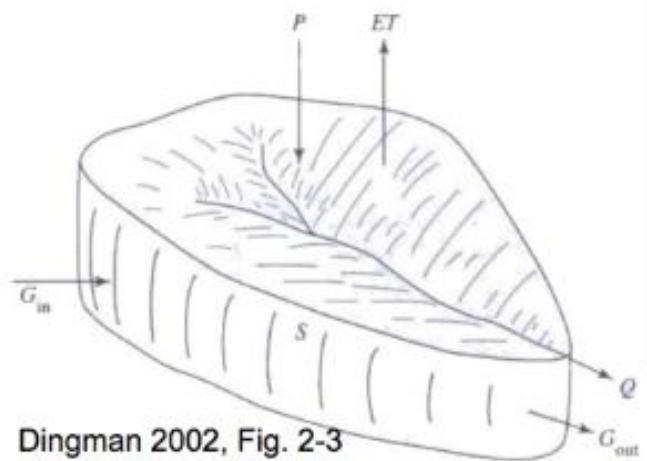


In this case, we can formulate the water balance equation, over a time increment, as:

$$(P + I + U) - (ET + R + D + L) = \Delta S$$

where:

- P = precipitation
- U = upward capillary flow
- I = irrigation additions
- ET = evapotranspiration
- R = runoff
- D = vertical drainage
- L = lateral drainage
- ΔS = change in soil water storage



$$\Delta S = P + G_{in} - (Q + ET + G_{out})$$

If we assume that G_{in} and G_{out} are negligible, and that for the long-term annual mean, ΔS is zero, then:

$$P = ET + Q, \text{ or } ET = P - Q$$

Inputs (I), outputs (O) and storage (S):

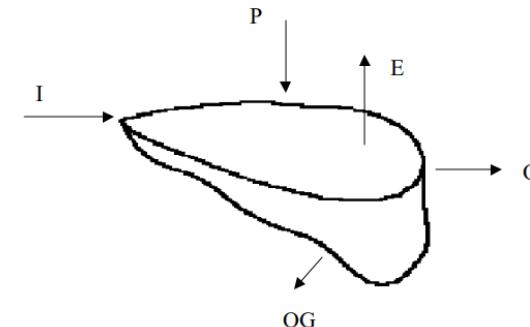
- I: Precipitation (P)
- Groundwater in (G_{in})
- O: Evapotranspiration (ET)
- Groundwater out (G_{out})
- River discharge (Q)
- Storage (S): In groundwater, rivers and lakes

What can we usually measure?

- P: rain gauges
- Q: stream gauges
- ET: hard to get except local values
- G_{in} : hard to get, assume zero
- G_{out} : hard to get, assume zero
- S: often hard to get

Determinación De La Evaporación De Un Lago

Balance de agua :



$$E = S_1 - S_2 + I + P - O - OG$$

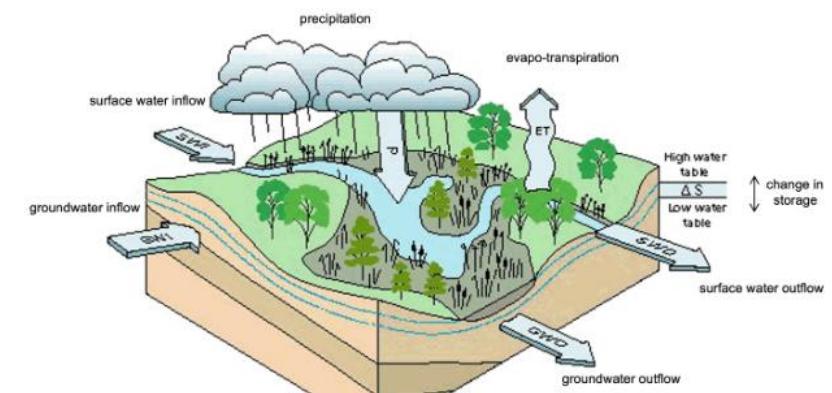


Figura 17: Componentes del balance hídrico de un humedal. Fuente: Documento de Abastecimiento de Agua 2425 del USGS

$$P + GW_{in} - (Q + ET + GW_{out}) = \Delta S$$

$$ET = P + GW_{in} - Q - GW_{out} - \Delta S$$



Eddy Covariance

En lugar de medir cada parte del balance hídrico por separado, la técnica de Eddy Covariance se basa en el balance energético. Dado que los sensores se instalan por encima de la cubierta vegetal, el cálculo de la evapotranspiración puede realizarse para muchas especies vegetales sin distorsión por la falta de uniformidad en la superficie del suelo. El sistema **Eddy Covariance (EC)** es una técnica de medición micrometeorológica utilizada para medir los **flujos turbulentos verticales** de los **componentes de energía** y la **concentración de gases de efecto invernadero (GEI)** dentro de las **capas límite de la atmósfera**.

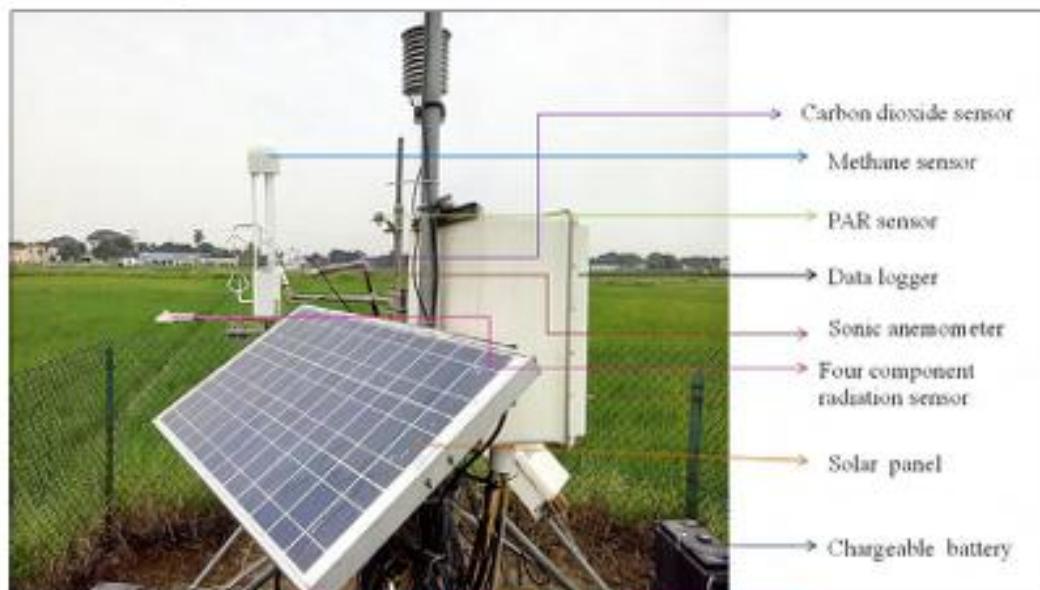


Figure 1: Labelled open path eddy covariance system

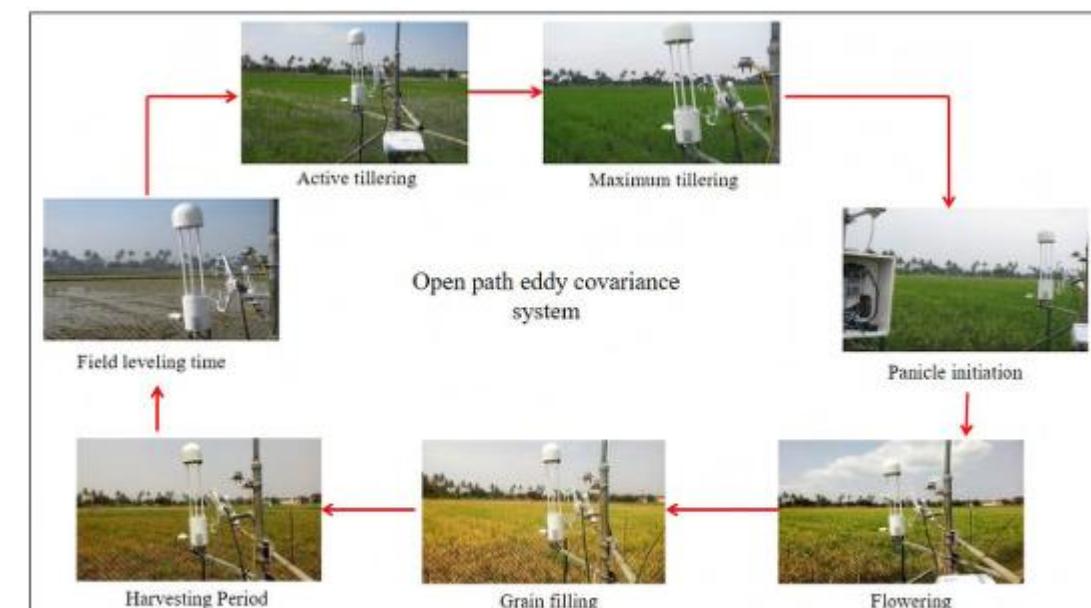


Figure 3: Field measurements of mass and energy fluxes at different stages of crop growth



Los diferentes componentes del sistema de eddy covariance incluyen:

- i. Anemómetro sónico para medir la velocidad del viento en tres dimensiones, la temperatura sónica y la dirección del viento. La medición del anemómetro sónico se basa en la velocidad del sonido en el aire transmitido a través de un transductor. Otro transductor recoge las reflexiones del sonido, y el retraso entre el tiempo de transmisión y recepción se utiliza para calcular la velocidad del viento.
- ii. Analizador de gases infrarrojo de trayectoria abierta (LI-7500A) para medir las fluctuaciones en las concentraciones de CO₂ y vapor de agua.
- iii. Sensor de radiación de 4 componentes, que mide la radiación neta (NR), la radiación de onda corta reflejada (SU), la radiación de onda corta entrante (SD), la radiación de onda larga emitida (LU) y la radiación de onda larga entrante (LD).
- iv. Sensor de temperatura del aire y humedad relativa mide la temperatura del aire (Ta) y la humedad relativa (HR).
- v. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) se mide usando un sensor cuántico de fotodiodo de silicio.
- vi. La sonda de temperatura del suelo mide la temperatura del suelo (Tg) a tres profundidades: 5 cm, 15 cm y 30 cm.

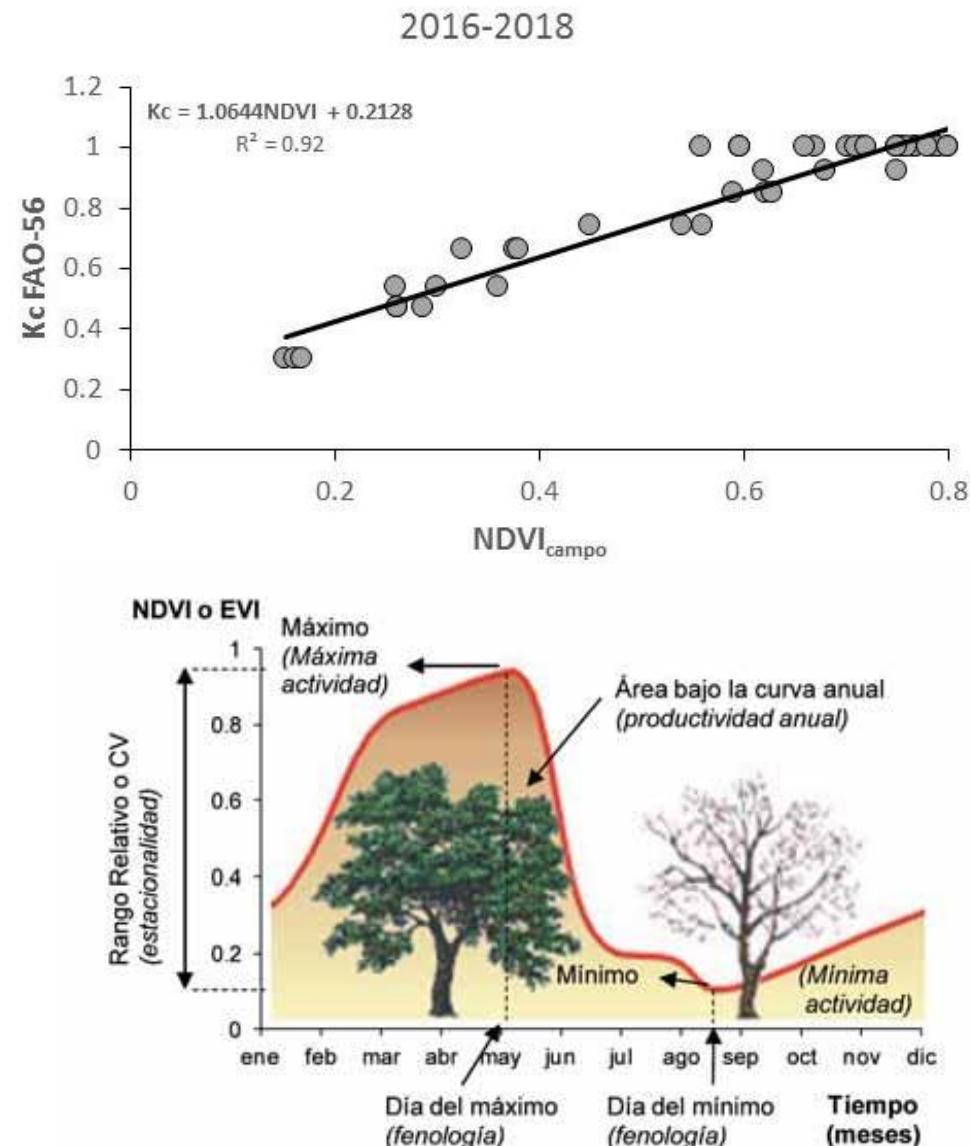


Teledetección

La estimación de la evapotranspiración mediante datos satelitales se basa en el análisis de variables biofísicas y radiométricas obtenidas desde sensores remotos, como la temperatura de la superficie terrestre, el índice de vegetación (NDVI), la radiación neta y la cobertura del suelo.

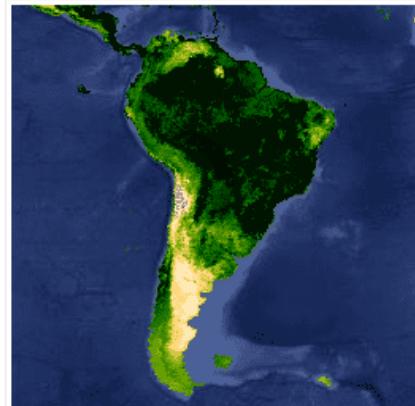
El Índice de Vegetación De Diferencia Normalizada (NDVI) es una de esas métricas supplementarias que pueden utilizarse para el cálculo de las tasas de evapotranspiración, ya que existe una estrecha relación entre el NDVI y ella.

Se ha demostrado que la tendencia del NDVI está estrechamente relacionada con los patrones de evapotranspiración potencial para cada combinación única de vegetación y suelo. Del mismo modo, se observó que el NDVI acumulado tenía una alta correlación con la evapotranspiración real acumulada durante todo el periodo vegetativo.





MOD16A2.061: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m



Disponibilidad de los conjuntos de datos

2001-01-01T00:00:00Z–2025-03-14T00:00:00Z

Proveedor de conjuntos de datos

[NASA LP DAAC en el Centro EROS del USGS](#)

Fragmento de Earth Engine

```
ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD16A2")
```

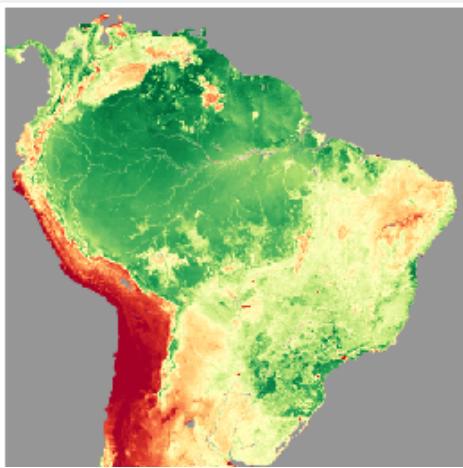
Cadencia

8 días

Etiquetas

8 días evapotranspiración global mod16a2 modis nasa vapor de agua

PML_V2 0.1.8: Coupled Evapotranspiration and Gross Primary Product (GPP)



Disponibilidad de los conjuntos de datos

2000-02-26T00:00:00Z–2023-12-27T00:00:00Z

Proveedor de conjuntos de datos

[PML_V2](#)

Fragmento de Earth Engine

```
ee.ImageCollection("CAS/IGSNRR/PML/V2_v018")
```

Cadencia

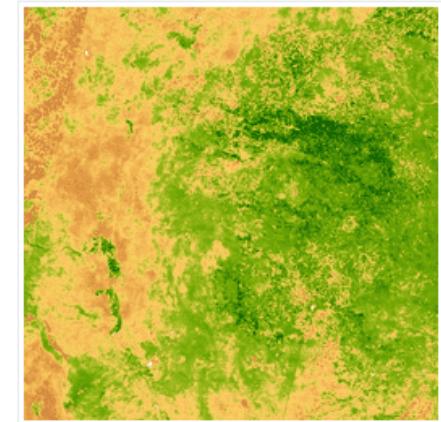
8 días

Etiquetas

evapotranspiration gpp plant-productivity water-vapor



MODIS Aqua Daily NDVI



Guardar página

Disponibilidad de los conjuntos de datos

2002-07-04T00:00:00Z–2023-02-25T00:00:00Z

Proveedor de conjuntos de datos

Google

Fragmento de Earth Engine

```
ee.ImageCollection("MODIS/MYD09GA_006_NDVI  
")
```

Cadencia

1 día

Etiquetas

aqua diario global modis myd09ga ndvi reflectancia de la superficie usgs
vegetation-indices

NOAA CDR AVHRR NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, Version 5



Disponibilidad de los conjuntos de datos

1981-06-24T00:00:00Z–2013-12-31T00:00:00Z

Proveedor de conjuntos de datos

NOAA

Fragmento de Earth Engine

```
ee.ImageCollection("NOAA/CDR/AVHRR/NDVI/V5")
```

Cadencia

1 día

Etiquetas

avhrr cdr daily land ndvi noaa vegetation-indices



USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1



Disponibilidad de los conjuntos de datos

2013-03-18T15:58:14Z–2025-03-30T10:52:50.353000Z

Proveedor de conjuntos de datos

USGS

Fragmento de Earth Engine

```
ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2  
")
```

Intervalo de revisión

16 días

Etiquetas

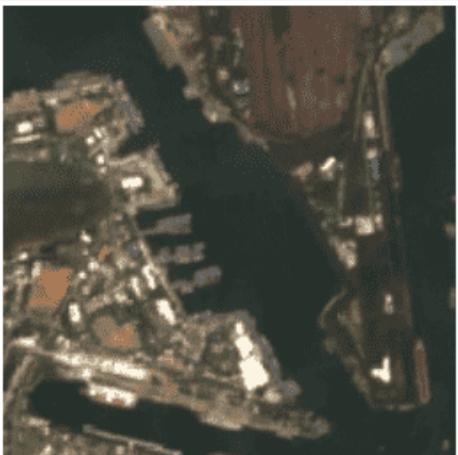
cfmask, cloud, fmask, global, l8sr, landsat, lasrc, lc08, lst, reflectance, satellite-imagery, sr, usgs

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

Banda	Descripción	Nombre común	Resolución
B5	Infrarrojo cercano	NIR	30 metros
B4	Rojo	RED	30 metros



Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A (SR)



Disponibilidad de los conjuntos de datos

2017-03-28T00:00:00Z – 2025-04-06T12:44:00.857000Z

Proveedor de conjuntos de datos

Unión Europea/ESA/Copernicus

Fragmento de Earth Engine

`ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")`

Intervalo de revisión

5 días

Etiquetas

copernicus

esa

eu

msi

reflectance

satellite-imagery

sentinel

sr

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Banda	Descripción	Longitud de onda	Resolución
B8	Infrarrojo cercano (NIR)	842 nm	10 m
B4	Rojo (RED)	665 nm	10 m

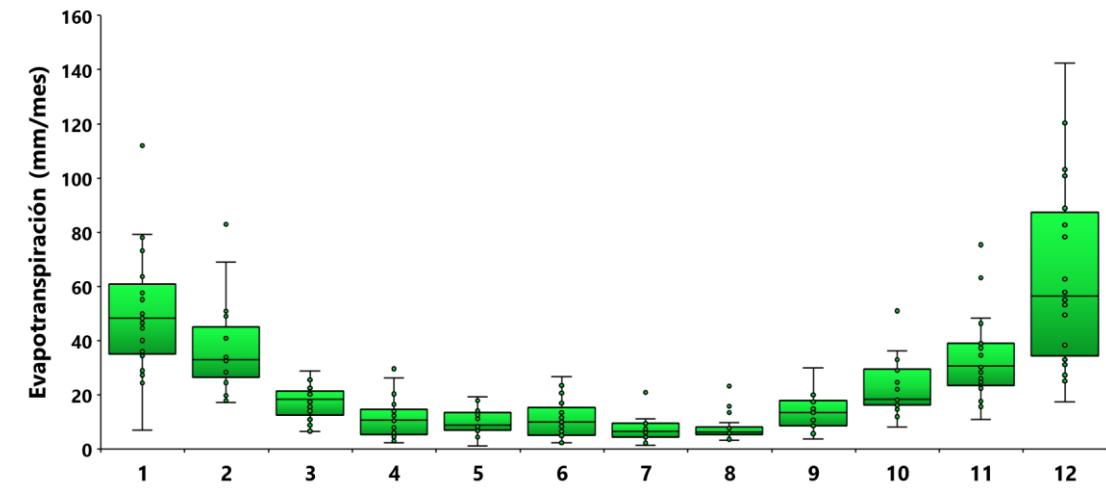
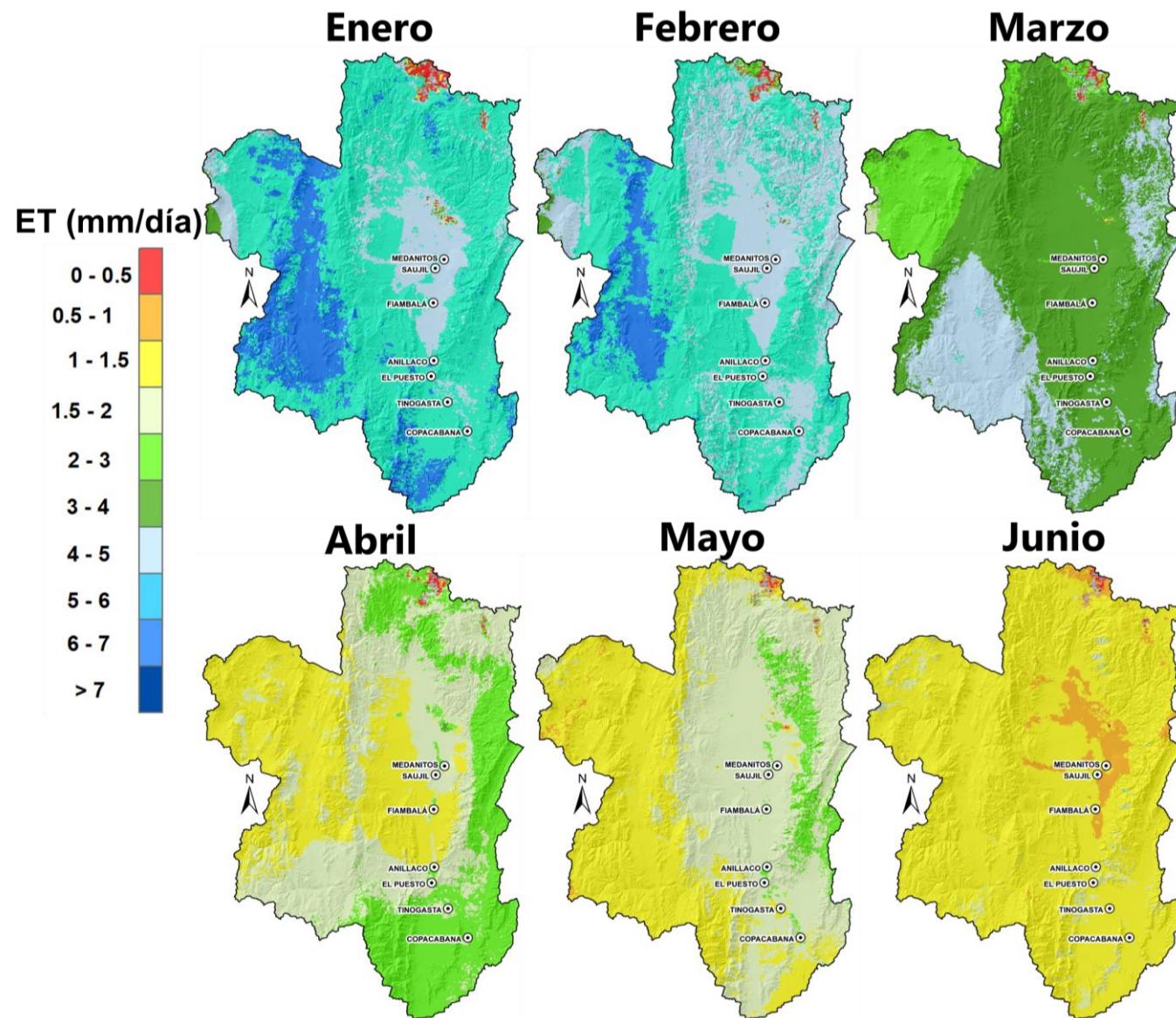


Figura 1. Evapotranspiración real mensual en la cuenca del río Abaucán, para el período 2000-2020.

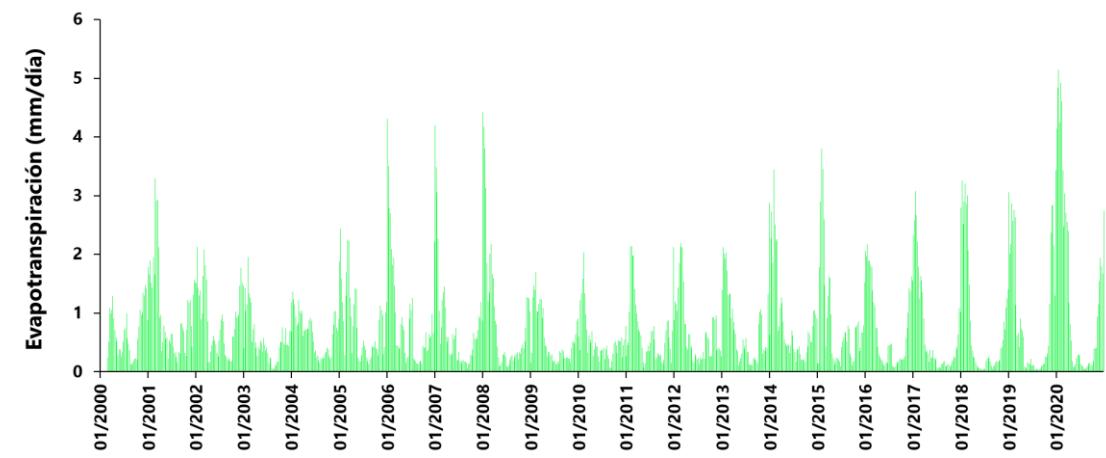


Figura 2. Evapotranspiración real promedio diaria cada 8 días en la cuenca del río Abaucán, para el período 2000-2020.



Datos Meteorológicos

La estimación de la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos permite cuantificar la demanda atmosférica de agua mediante el uso de variables como temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Estos parámetros, registrados por estaciones meteorológicas, son insumo clave para aplicar modelos físicos o empíricos —como Penman-Monteith, Hargreaves o Priestley-Taylor— que permiten calcular la evapotranspiración de referencia. Este enfoque es esencial para la gestión eficiente del recurso hídrico, el diseño de sistemas de riego y el análisis de balances hídricos en estudios hidrológicos y agroclimáticos.





Evapotranspiración potencial

Método de THORNTHWAITE

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a$$

Donde:

- ETP : evapotranspiración potencial mensual sin corregir (en mm)
- T : temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)
- I : índice térmico anual (sin unidades)
- a : coeficiente empírico, función de I

Cálculo del índice térmico mensual (i):

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

Donde:

- T es la temperatura media mensual en $^{\circ}\text{C}$
- i es el índice térmico mensual

$$I = \sum_{m=1}^{12} i_m$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239$$



Dado que el día y la duración de la radiación solar varían según la latitud y el mes, se usa un factor de corrección mensual f , que depende de la latitud (en este caso, 10° Norte) y del mes.

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a$$

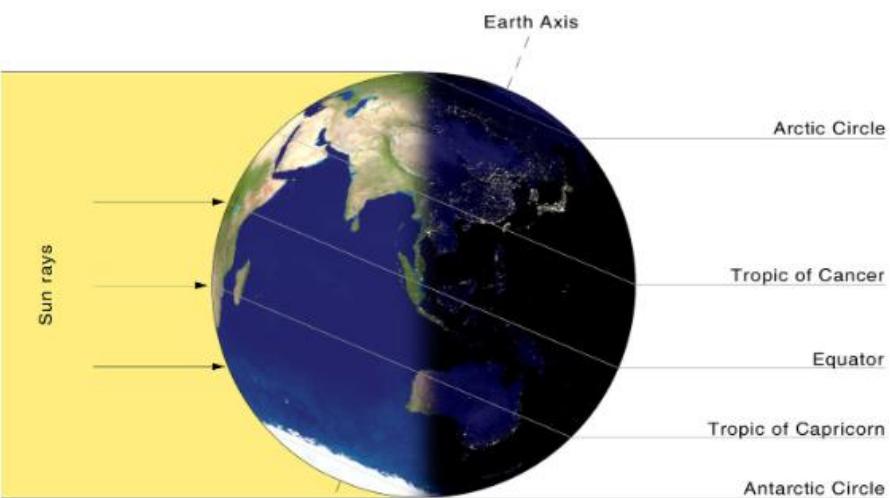
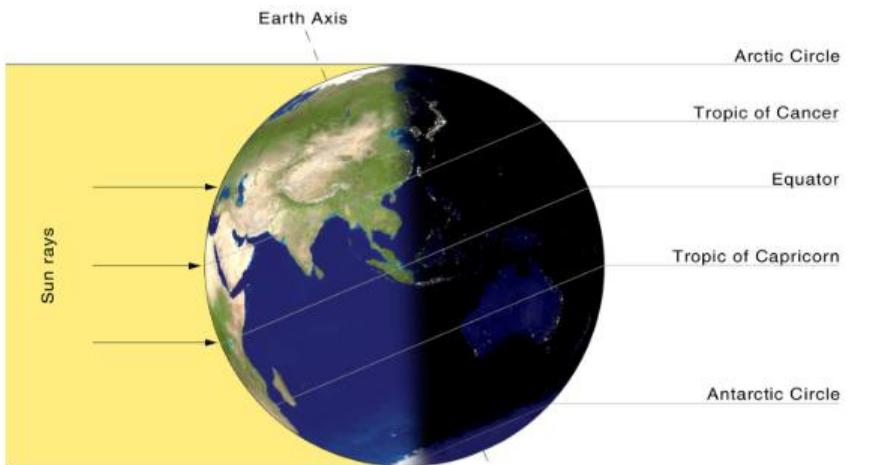
$$ETP_c = ETP \cdot f$$

$$f = \frac{\text{Horas medias de sol al día para el mes}}{12}$$

$$ETP_{\text{diaria}} = \frac{ETP_c}{\text{días del mes}}$$



$$f = \frac{\text{Horas medias de sol al d\'ia para el mes}}{12}$$



💡 Tabla de factores f para Ibagué (~4.4° N)

Mes	Horas de sol/día estimadas	Factor $f = \frac{\text{horas}}{12}$
Enero	11.7	0.975
Febrero	11.9	0.992
Marzo	12.1	1.008
Abril	12.3	1.025
Mayo	12.4	1.033
Junio	12.4	1.033
Julio	12.3	1.025
Agosto	12.2	1.017
Septiembre	12.1	1.008
Octubre	11.9	0.992
Noviembre	11.8	0.983
Diciembre	11.7	0.975



método de Blaney-Criddle

$$ETP = K_p \left(\frac{45.7t + 813}{100} \right)$$

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes]

K = coeficiente empírico según tipo de vegetación (Tabla 2)

t = temperatura media diaria del mes [$^{\circ}\text{C}$]

p = porcentaje horas de insolación (Tabla 3)

TABLA 6.14 Coeficiente K para aplicación de la fórmula de Blaney-Criddle según tipo de vegetación y mes del período vegetativo. (Fuentes: García Lozano, G. Bernáldez, 1964; Ven Té Chow, 1964)

Vegetación	Lugar	Mes											
		En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Il	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
AGRIOS	Andalucía y Levante			0,41	0,36	0,44	0,43	0,44	0,41	0,41	0,44	0,41	0,41
	California litoral			0,57	0,60	0,60	0,64	0,64	0,68	0,68	0,65	0,62	
ALFALFA	Andalucía y Levante			0,41	0,70	0,64	0,67	0,74	0,67	0,64	0,40	0,41	
	California litoral			0,60	0,65	0,70	0,80	0,85	0,85	0,80	0,70	0,60	
ALGODÓN	Andalucía y Levante			0,65	0,70	0,80	0,90	1,10	1,00	0,85	0,80	0,70	
	Arizona			0,84	0,89	1,00	0,86	0,78	0,72				
ARROZ	Andalucía y Levante			0,88	1,15	1,24	0,97	0,87	0,81				
	Texas												
CEBOLLA TARDÍA	Andalucía y Levante			0,12	0,58	0,50	0,50	0,60	0,65	0,50	0,50		
	Andalucía y Levante			0,27	0,30	0,49	0,86	1,04	1,03	0,81			
CEBOLLA TEMPRANA	Andalucía y Levante			0,28	0,45	0,30	0,31	0,28					
	Andalucía y Levante			0,28	0,45	0,30							
CEREALES GRAN PEQUEÑO	Dakota del Norte			0,19	0,55	1,13	0,77	0,30					
	Andalucía y Levante			0,14	0,45	0,49	0,74	0,71	0,55	0,43	0,36		
FRUTALES DE PEPITA	Andalucía y Levante			0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,50	0,60	0,70	0,20	0,20
	Andalucía y Levante			0,12	0,20	0,38	0,42	0,26	0,10				
HORTALIZAS	Andalucía y Levante			0,47	0,63	0,78	0,79	0,70					
	Andalucía y Levante			0,20	0,20	0,30	0,40	0,40	0,50	0,60	0,50	0,20	0,20
MAÍZ DE CICLO LARGO	Andalucía y Levante												
	Dakota del Norte												
MAÍZ DE CICLO NORMAL	Andalucía y Levante												
	Andalucía y Levante												
PASTOS	California												
	Dakota del Norte												
PATATA	Dakota del Norte												
	Dakota del Sur												
PATATA TARDÍA	Andalucía y Levante												
	Andalucía y Levante												
PATATA TEMPRANA	Andalucía y Levante												
	Andalucía y Levante												
REMOLACHA AZUCARERA	Andalucía y Levante												
	California litoral												
SORGO	Arizona												
	Kansas												
TOMATE TARDÍO	Texas												
	Andalucía y Levante												
TOMATE TEMPRANO	Andalucía y Levante												
	Andalucía y Levante												
TRÉBOL	Andalucía y Levante												
	Andalucía y Levante												
TRIGO	Texas												
	Texas												

TABLA 6.15 Porcentaje (p) de número máximo de horas de insolación mensual respecto al total anual según latitud (latitud Norte)

Latitud	Mes											
	En	Fb	Mz	Ab	My	Jn	Il	Ag	Sep	Oc	Nov	Dic
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	7,56	8,47	8,29	8,66	9,41	8,68	8,60	8,23	8,42	8,06	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	8,26	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
25°	7,53	7,14	8,39	8,61	9,33	9,23	9,45	9,09	8,32	8,09	7,40	7,42
30°	7,30	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,33	7,99	7,19	7,15
35°	7,05	6,88	8,35	8,83	9,76	9,77	9,93	9,37	8,36	7,87	6,97	6,86
40°	6,76	6,72	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,39	7,75	6,72	6,52
45°	6,37	6,51	8,28	9,09	10,35	10,50	10,61	9,77	8,42	7,60	6,41	6,09
50°	5,98	6,30	8,24	9,24	10,68	10,91	10,99	10,00	8,46	7,45	6,10	5,65
55°	5,33	5,98	8,16	9,44	11,21	11,65	11,65	10,35	8,52	7,21	5,57	4,93
60°	4,67	5,65	8,08	9,65	11,74	12,39	12,31	10,70	8,57	6,98	5,04	4,22

Mes	p (%) lat 5°N	p (decimal)
ENE	8	0.08
FEB	7,3	0.073
MAR	8,2	0.082
ABR	8,3	0.083
MAY	8,4	0.084
JUN	8,3	0.083
JUL	8,5	0.085
AGO	8,6	0.086
SEP	8,4	0.084
OCT	8,6	0.086
NOV	8,2	0.082
DIC	7,2	0.072



Método HARGREAVES

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17.8)$$

Radiación extraterrestre

La fórmula de **Hargreaves** es una manera **simple** y **empírica** de estimar la **evapotranspiración de referencia (ET_0)** cuando **no se tiene información de viento, humedad ni radiación solar medida.**

Símbolo	Significado	Unidad
ET_0	Evapotranspiración de referencia	mm/día
T_{med}	Temperatura media del día	°C
T_{max}	Temperatura máxima del día	°C
T_{min}	Temperatura mínima del día	°C
R_a	Radiación extraterrestre (en la cima de la atmósfera)	MJ/m ² /día



Método PENMAN-MONTEITH

Penman-Monteith FAO 56

$$ET_o = \frac{[0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{(T + 273)} \right) u_2 (es - ea)]}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot (0.622 \cdot \lambda \cdot \rho_{air}/P) \cdot (e_z^o - e_z)/r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c/r_a)}$$

{Termino de radiación} {Termino aerodinámica
saturación y presión de vapor}

Resistencia al dosel Resistencia aerodinámica

Símbolo	Descripción	Unidad			
ET_0	Evapotranspiración de referencia	mm/día	u_2	Velocidad del viento a 2 metros	m/s
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor	kPa/°C	e_s	Presión de vapor de saturación	kPa
R_n	Radiación neta	MJ/m ² /día	e_a	Presión de vapor actual	kPa
G	Flujo de calor del suelo	MJ/m ² /día	$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor	kPa
γ	Constante psicrométrica	kPa/°C			
T	Temperatura media del aire	°C			



Que se requiere?

- Radiación neta (R_n),
- Temperatura media,
- Humedad relativa (para $e_s - e_a$),
- Velocidad del viento (u_2),
- Un valor fijo para la resistencia del cultivo tipo (herba estándar con $r_c = 70 \text{ s/m}$ y $r_a = 208/u_2$).

1. Temperatura media T ($^{\circ}\text{C}$)

Cómo obtenerla:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

Fuente: Estaciones meteorológicas, IDEAM, NASA POWER, etc.

2. Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor con la temperatura (kPa/ $^{\circ}\text{C}$)

Fórmula:

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e^o(T)}{(T + 237.3)^2}$$

donde:

$$e^o(T) = 0.6108 \cdot \exp \left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3} \right)$$

Necesitas: solo la temperatura media T .



3. e_s : Presión de vapor de saturación (kPa)

Fórmula:

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2}$$

donde:

$$e^o(T) = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

5. R_n : Radiación neta (MJ/m²/día)

Fórmula:

$$R_n = R_s(1 - \alpha) - R_{nl}$$

- R_s : Radiación solar incidente (de estación o estimada)
 - α : Albedo (para pasto estándar, $\alpha = 0.23$)
 - R_{nl} : Radiación neta de onda larga (estimada con temperatura, humedad, nubosidad)
- | ↗ Alternativa: algunas estaciones automáticas ya entregan directamente R_n .

Puedes estimarla con horas de sol (n) usando:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}) \cdot R_a$$

- $a_s = 0.25, b_s = 0.5$ (valores FAO)
- n : horas de sol reales
- N : horas de sol máximo (depende de la latitud y el día)
- R_a : radiación extraterrestre (MJ/m²/día), se estima por tablas o calculadora solar

4. e_a : Presión de vapor actual (kPa)

Fórmula:

$$e_a = \frac{RH_{\max} \cdot e^o(T_{\min}) + RH_{\min} \cdot e^o(T_{\max})}{200}$$

RH: humedad relativa (%)



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

Símbolo	Significado	
R_a	Radiación extraterrestre diaria	1. Distancia relativa Tierra-Sol (d_r):
G_{sc}	Constante solar: 0.0820 MJ/m ² ·min	$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi J}{365} \right)$
d_r	Distancia relativa Tierra-Sol	2. Declinación solar (δ):
δ	Declinación solar (en radianes)	$\delta = 0.409 \cdot \sin \left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39 \right)$
ω_s	Ángulo horario al amanecer/anochecer (en radianes)	3. Ángulo horario del atardecer (ω_s):
φ	Latitud del sitio (en radianes)	$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))$



6. G : Flujo de calor en el suelo ($\text{MJ/m}^2/\text{día}$)

- En escalas diarias se asume:

$$G = 0$$

8. γ : Constante psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)

Fórmula:

$$\gamma = 0.665 \times 10^{-3} \cdot P$$

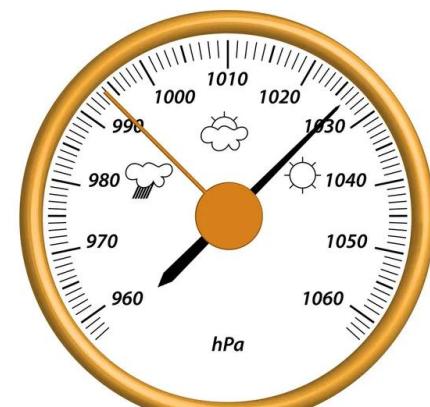
Donde P es la presión atmosférica.

9. P : Presión atmosférica (kPa)

Fórmula según altitud z en metros:

$$P = 101.3 \cdot \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26}$$

La **constante psicrométrica** (γ \gamma\gamma) es un valor que relaciona la **temperatura del aire con su capacidad de retener humedad**.



barómetro



Método PRIESTLEY-TAYLOR

Es una versión simplificada del método de Penman que **solo usa datos de radiación y temperatura** para estimar la **evapotranspiración potencial (ET_o)** en superficies bien irrigadas. Ideal cuando no se tiene información sobre viento ni humedad.

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot (H_{net} - G) \cdot \frac{R_n - G}{\lambda}$$

Coeficiente de Priestley-Taylor (usualmente 1.26)

Radiación neta

Flujo de calor del suelo

Pendiente de la curva de saturación de vapor

Constante psicométrica

calor latente de vaporización ($\approx 2.45 \text{ MJ/kg}$), para convertir de energía a profundidad de agua.



$$ET_0 = \alpha \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n - G}{\lambda}$$

Símbolo	Descripción	Unidad
ET_0	Evapotranspiración de referencia	mm/día
α	Coeficiente de Priestley–Taylor (usualmente 1.26)	—
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor	kPa/°C
γ	Constante psicrométrica	kPa/°C
R_n	Radiación neta	MJ/m ² /día
G	Flujo de calor del suelo (a menudo 0 diario)	MJ/m ² /día
λ	Calor latente de vaporización (2.45 MJ/kg)	MJ/kg



Evapotranspiración real

Fórmula de COUTAGNE:

$$ETR = P - \chi P^2$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en metros/año

P = Precipitación en metros/año (Atención: las unidades son metros/año)

$$\chi = \frac{1}{0,8 + 0,14 t}$$

t = temperatura media anual en °C

Fórmula de TURC:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

$$L = 300 + 25 t + 0,05 t^3$$

t = temperatura media anual en °C



Método de THORNTHWAITE

En una estación meteorológica, se tienen datos de temperaturas medias mensuales, para el período 1980 – 2000, los cuales se muestran en la tabla:

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T (°C)	22.6	22.9	23.7	24.7	24.3	23.7	23.9	23.8	23.0	23.8	23.0	22.7

Utilizando el método de Thornthwaite estimar la evapotranspiración potencial diaria.



siendo cada una de las columnas como se indica:

Mes	T (°C)	Índice i	e (mm)	factor f	ec (mm)	e diaria (mm/día)
E	22.6	9.815	84.675	0.98	82.982	2.68
F	22.9	10.013	88.053	0.91	80.1278	2.86
M	23.7	10.547	97.492	1.03	100.4	3.24
A	24.7	11.228	110.206	1.03	113.51	3.78
M	23.7	10.547	97.492	1.08	105.29	3.40
J	23.9	10.682	99.953	1.06	105.95	3.53
J	23.8	10.614	98.718	1.08	106.6	3.44
A	23.8	10.614	98.718	1.07	105.6	3.44
S	23.8	10.614	98.718	1.02	100.7	3.41
O	28.7	14.093	172.001	1.02	175.44	5.66
N	23.2	10.212	91.518	0.98	89.69	2.99
D	22.7	9.881	85.791	0.99	84.933	2.74

2 C: T promedio mensual en °C.

3 C: índice térmico mensual, calculado con la ecuación

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

$$I = \sum_{i=1}^{12} i = 128.860$$

4 C: evapotranspiración mensual en mm, sin corregir, calculado con la ecuación (7.1), donde el valor de a se calculó con la ecuación siendo su valor $a = 2.96584$.

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49239$$

$$ETP = 1.6 \left(\frac{10 \cdot T}{I} \right)^a$$



Mes	T (°C)	Índice i	e (mm)	factor f	ec (mm)	e diaria (mm/día)
E	22.6	9.815	84.675	0.98	82.982	2.68
F	22.9	10.013	88.053	0.91	80.1278	2.86
M	23.7	10.547	97.492	1.03	100.4	3.24
A	24.7	11.228	110.206	1.03	113.51	3.78
M	23.7	10.547	97.492	1.08	105.29	3.40
J	23.9	10.682	99.953	1.06	105.95	3.53
J	23.8	10.614	98.718	1.08	106.6	3.44
A	23.8	10.614	98.718	1.07	105.6	3.44
S	23.8	10.614	98.718	1.02	100.7	3.41
O	28.7	14.093	172.001	1.02	175.44	5.66
N	23.2	10.212	91.518	0.98	89.69	2.99
D	22.7	9.881	85.791	0.99	84.933	2.74

5 C: factor de corrección f, obtenida de la tabla 7.1, para una latitud 10° Norte.

6C: evapotranspiración mensual corregida, en mm, con la ecuación

$$ETP_c = ETP \cdot f$$

7C: evapotranspiración diaria corregida, en mm, que se obtiene dividiendo la columna (6) entre el número de días que tiene el mes.

$$ETP_{\text{diaria}} = \frac{ETP_c}{\text{días del mes}}$$

Latitud	E	F	M	A	M	J _N	J _L	A	S	O	N	D
Norte	50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76
	45	0.80		1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79
	40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83
	35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86
	30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89
	25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.71	1.12	1.02	0.99	0.91
	20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93
	15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95
	10	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98
	5	1.00	0.92	1.03	1.02	1.06	1.03	1.05	1.01	1.00	1.00	0.99



Ejemplo balance hídrico de Thornthwaite

Mes	T (°C)	P (mm)
E (ene)	27.8	3
F	29.0	9
M	28.6	7
A	28.7	34
M	28.2	197
JN	27.8	281
JL	27.6	168
A	27.8	197
S	27.6	356
O	27.0	343
N	27.2	113
D	26.9	17

En Cañas se tiene un proyecto de riego de **1500 ha**, el cual cuenta con un registro de **30 años de temperaturas medias mensuales**, en °C y **precipitaciones medias mensuales en mm**, como se muestra en la tabla

De la cédula de cultivos a implementar, se tiene que la **profundidad radicular**, en promedio es **1 m**, y que según el estudio de suelos, **1 mm de lámina humedece 1 cm de suelo**.

Usted está encargado del **proyecto de irrigación** y, con base en el **déficit de sequía del balance hídrico obtenido**, utilizando el método de **Thornthwaite**, debe indicar los **caudales que deben derivarse del río** a fin de suprir las necesidades en cada uno de los **meses de sequía**.

Considerar que las **pérdidas totales** (conducción, distribución, aplicación, etc.) son del orden del **50%**.



Mes	T (°C)	P (mm)
E (ene)	27.8	3
F	29.0	9
M	28.6	7
A	28.7	34
M	28.2	197
JN	27.8	281
JL	27.6	168
A	27.8	197
S	27.6	356
O	27.0	343
N	27.2	113
D	26.9	17

Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	-	47.7
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	



Solución:

1. De los datos, como la profundidad radicular es $1\text{ m} = 100\text{ cm}$, y 1 mm de lámina humedece 1 cm , se puede sólo almacenar en el suelo 100 mm de lámina. Es decir, láminas mayores de 100 mm se pierden por percolación profunda.
2. Realizar balance hídrico

Los resultados del balance hídrico se muestran en la tabla, siendo sus cálculos como se indica:

Fila a: Temperatura promedio mensual (T°)

Fila b: Índice de calor i , estos valores se calculan para cada valor de temperatura promedio mensual.

Fila c: Evapotranspiración no ajustada, estos valores para cada mes

Fila d: Factor de corrección, para una latitud norte de 10°

Fila e: Evapotranspiración corregida

Fila f: Precipitación en mm, son los datos de la **columna 3**

Fila g: Variación de las reservas de la humedad en el suelo. Los cambios que en la humedad del suelo se operan, es decir, si hay aportes y almacenamiento (+) del agua en el suelo, o al contrario, si hay extracción y pérdida (-) de esa humedad. Los cálculos se inician en el mes donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración ($P > e$), después de un "período de sequía" (es decir, $P < e$), en el ejemplo, esto ocurre en el mes de Mayo (M). Cuando el suelo es un depósito de capacidad limitada, cuando ya está saturado.



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

Fila g: Variación de las reservas de la humedad en el suelo. Los cambios que en la humedad del suelo se operan, es decir, si hay aportes y almacenamiento (+) del agua en el suelo, o al contrario, si hay extracción y pérdida (-) de esa humedad

Ejemplo:

Mayo: Variación reserva = $197 - 181.51 = 15.49$ mm

Junio: $P-e = 281 - 167.71 = 113.29$

Pero como el suelo puede almacenar solo 100 mm y ya existe 15.49 mm, en el mes de Mayo la variación de las reservas solo será de:

Variación de reserva = $100 - 15.49 = 84.51$ mm

La diferencia: $113.29 - 84.51 = 28.78$ mm, se pierde por percolación profunda, y se anotará en la fila K

Fila h: Reserva de agua disponible, indica la capacidad de agua que existe en el depósito (suelo), está en función del tipo de suelo y de la profundidad radicular; para nuestro ejemplo, el valor máximo es 100 mm. Se inicia en el mes donde $P>e$ (mes de Mayo). Cuando ya el suelo está saturado (en este caso 100 mm), la reserva ya no varía (meses Jn, JL, A, S, O), o cuando ya no hay reserva (meses D, E, F, M, A).



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

Ejemplo:

Mayo: reserva = 197 – 181.51 = 15.49 mm

Junio: reserva = reserva mes anterior + (P – e)

reserva = 15.49 + (281 – 167.71) = 128.78 mm,

pero como el depósito (el suelo), sólo puede almacenar 100 mm la reserva = 100 mm, la diferencia **128.78 – 100 = 28.78 mm**, se percola (fila k).

Fila i: Evapotranspiración efectiva ocurrida, indica la lámina de agua, que en realidad ha sido evaporada.

Cuando **P < e**, y hay reserva de agua disponible en el suelo para satisfacer toda la evapotranspiración, es numéricamente igual a la **fila e**.

Cuando **P < e** y hay reserva de agua disponible, pero no para satisfacer toda la evapotranspiración, es igual a la **fila f + fila h**.

Cuando **P < e** y no hay reserva de agua disponible, es igual a la **fila f**.



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T(°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	
m. ½ Esc. a	14.318	9.659	4.830	2.415	1.207	-	7.19	4.16	9.0	54.37	77.27	38.636	
n. Esc. tot	14.318	9.659	4.830	2.415	1.207	14.39	8.32	18.015	108.73	154.54	77.27	38.636	

Fila j: Déficit o sequía, indica la cantidad de agua en mm de altura, que faltó para satisfacer la evapotranspiración, por un agotamiento de las reservas en el suelo, en ausencia de precipitaciones. Para efectos de riego, esta fila nos indica lo que debemos derivar para satisfacer las necesidades de los cultivos.

En el ejemplo hay déficit en los meses D, E, F, M, A. Se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Déficit} = \text{fila e} - \text{fila i}$$

Fila k: Excedente, representa el agua que habiendo caído por precipitación queda como un sobrante, luego de haber proporcionado la cantidad necesaria para la evapotranspiración y para completar la reserva en el suelo (si es que éste todavía no está saturado o completo, en este caso 100 mm).

Cuando la variación de las reservas es 0:

$$\text{Excedente} = \text{fila f} - \text{fila e}, \quad \text{para } P > e$$

Cuando la variación de las reservas ≠ 0:

$$\text{Excedente} = \text{fila f} - \text{fila e} - \text{fila g}, \quad \text{para } P > e$$



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

Ejemplo:

Junio:

$$\text{Excedente} = 281 - 167.71 - 84.51 = 28.78 \text{ mm}$$

Fila l: $\frac{1}{2}$ excedente, se asume que el excedente se reparte en dos partes; una mitad va a formar parte de las aguas de escorrentía superficial, la otra mitad se infiltra para salir nuevamente a la superficie al mes siguiente y alimentar los cursos de agua y constituir a su vez parte de la escorrentía superficial.

Se calcula como:

$$\text{Excedente} = \text{fila k}/2$$



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

3. Cálculo del déficit diario:

En la tabla se observa que los meses en los cuales hay déficit (por lo que se debe aplicar riego), son los meses de **D, E, F, M, A**, éstos valores se muestran en la **tabla**

Para el cálculo del **déficit diario**, se divide el **déficit mensual** entre el **número de días**, es decir:

$$D_{\text{diario}} = \frac{D_{\text{mensual}}}{\text{Nº de días}}$$

Meses	D	E	F	M	A
Nº días	31	31	28	31	30
Déficit mensual (mm/mes)	47.7	152.05	163.12	176.72	152.45
Déficit diario (mm/día)	1.54	4.90	5.83	5.70	5.08



Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

Por ejemplo, para el mes de diciembre, se tiene:

$$D_{\text{diario}} = \frac{47.7 \text{ mm}}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{31 \text{ días}} = 1.54 \text{ mm/día}$$

4. Cálculo de los caudales a derivar: El déficit diario representa la lámina a restituir por día. Como se tienen que regar 1500 ha, el caudal será:

$$Q = D_{\text{diario}} \cdot 1500 \text{ Ha}$$

Haciendo transformación de unidades, se tiene:

$$Q = D_{\text{diario}} \cdot 1500 \frac{\text{mm}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{10^3 \text{ mm}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ hr}} \cdot \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{10^4 \text{ m}^2}{10^3 \text{ Ha}}$$

$$Q = D_{\text{diario}} \cdot \frac{1500 \cdot 10^4}{10^3 \cdot 24 \cdot 3600} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.1736 \cdot D_{\text{diario}} \text{ m}^3/\text{s}$$



Multiplicando los déficit diario para cada mes, por el factor **0.1736**, se tiene el **caudal neto**:

Mes	E	F	M	A	M	JN	JL	A	S	O	N	D	AÑO
a. T (°C)	27.8	29.0	28.6	28.7	28.2	27.8	27.6	27.8	27.6	27.0	27.2	26.9	
b. i	13.43	14.32	14.02	14.09	13.72	13.43	13.28	13.43	13.28	12.85	12.99	12.78	161.62
c. ETP (mm)	158.22	189.15	178.37	181.02	168.06	158.22	153.47	158.22	153.47	139.86	144.29	137.68	
d. Factor	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99	
e. ETP cor	155.05	172.12	183.72	186.45	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	136.30	
f. P (mm)	3.0	9.0	7.0	34	197	281	168	197	356	343	113	17	
g. Δ RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	84.51	0.0	0.0	0.0	0.0	28.14	71.6	
h. RAU	0.0	0.0	0.0	0.0	15.49	100	100	100	100	100	71.6	0.0	
i. ETR	3.0	9.0	7.0	34	181.51	167.71	165.74	169.29	156.53	142.65	141.40	88.6	
j. Déficit	152.05	163.12	176.72	152.45	-	-	-	-	-	-	-	47.7	
k. Exc.	-	-	-	-	-	28.78	2.26	27.71	199.47	200.35	-	-	
l. ½ Exc.	-	-	-	-	-	14.39	1.13	13.855	99.735	100.17	-	-	

Meses	D	E	F	M	A
Q neto (m³/s)	0.2673	0.8506	1.0121	0.9895	0.8819

Como las **pérdidas totales** son del orden del **50%**, los **caudales brutos** a derivar para cada mes son:

$$Q_{\text{bruto}} = \frac{Q_{\text{neto}}}{\text{Pérdidas}} = \frac{Q_{\text{neto}}}{0.5}$$

Meses	D	E	F	M	A
Q bruto (m³/s)	0.5346	1.7012	2.0242	1.9790	1.7638