

Lección 4. Evaporación y transpiración. Concepto. Evaporación: factores que la condicionan. Evaporación a partir de cuerpos de agua. Medida y cálculo de la evaporación: tanques, balance. La evaporación en el suelo. Transpiración: factores que la condicionan. Variaciones y medida de la transpiración. Evapotranspiración. Evapotranspiración potencial y evapotranspiración real. Evapotranspiración de referencia. Métodos de evaluación de la evapotranspiración potencial. Cálculo de la evapotranspiración real. Modelos de temperatura y precipitación (Thornthwaite, Blaney y Criddle, Turc). Métodos basados en la radiación (Penman, Allen).

EVAPORACIÓN

La evaporación se define como "el proceso físico por el cual un sólido o líquido pasa a estar en fase gaseosa." La evaporación del agua a la atmósfera ocurre a partir de superficies de agua libre como océanos, lagos y ríos, de zonas pantanosas, del suelo, y de la vegetación húmeda.

La cantidad de evaporación depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Disponibilidad de energía (radiación solar)
- Capacidad de la atmósfera de recibir humedad (poder evaporante de la atmósfera)

Los principales factores que controlan la evaporación son los siguientes:

- Radiación solar. Es, sin duda, el factor más importante.
- Temperatura del aire. Cuanto más frío está el aire mayor será la convección térmica hacia el mismo y por tanto menos energía habrá disponible para la evaporación. Por otra parte, cuanto mayor sea la temperatura del aire, mayor es su presión de vapor de saturación.
- Humedad atmosférica. El aire seco se satura más tarde y tiene menor tensión de vapor (e), por lo que cuanto mayor es la humedad relativa menor será el déficit de saturación (D).
- Viento. El proceso de la evaporación implica un movimiento neto de agua hacia la atmósfera. Si el proceso perdura, las capas de aire más cercanas a la superficie libre se saturarán. Para que el flujo continúe, debe establecerse un gradiente de depresiones de vapor en el aire. Por ello, cuanto mayor sea la renovación del aire, esto es el viento, mayor será la evaporación.
- Tamaño de la masa de agua
- Salinidad

Estimación de la evaporación

La evaporación se puede calcular mediante fórmulas empíricas y semi-teóricas, mediante la realización de un balance energético de la masa de agua o bien aplicando la ecuación de Penman, que es el método más preciso. No obstante, es recomendable utilizar métodos experimentales, a pesar de los inconvenientes que presentan.

Las fórmulas empíricas no tienen en cuenta la disponibilidad energética y sólo dan una idea de la capacidad evaporante de la atmósfera, al contrario que el método del balance energético, de difícil aplicación, que ignora el poder evaporante de la atmósfera.

Determinación experimental

La medida más frecuente de la evaporación se obtiene mediante los denominados tanques de evaporación, que pueden ser enterrados, flotantes y de superficie. Las condiciones de evaporación en los tanques no son las mismas que en una superficie mayor y hay que normalizar las medidas con el denominado coeficiente de tanque (0.7-0.8). Los tanques presentan problemas de mantenimiento y es necesario protegerlos con redes.

Existen otros aparatos para medir la evaporación, como son los evaporímetros, como los de tipo Piché, que tienen una cápsula de evaporación y una escala de medida. También se han utilizado las denominadas vidrieras que realmente miden la cantidad de vapor generada aunque presentan la dificultad del efecto invernadero y de la anulación del viento.

TRANSPIRACIÓN

La mayor parte del agua evaporada por las plantas es agua que ha pasado a través de la planta, absorbida por las raíces, pasando por los tejidos vasculares y saliendo por las hojas, a través de los estomas, aunque a veces también ocurre a través de la cutícula. Esta

evaporación de agua a través de las plantas es la denominada transpiración. El agua absorbida por las raíces cumple las siguientes funciones: incorporación a su estructura (1%), transporte de alimentos, eliminación de sales y refrigeración. La transpiración está controlada por muchas variables ya que depende de algunos aspectos dinámicos de la actividad de la planta:

- las diferentes especies vegetales pueden transpirar cantidades muy diferentes de agua en función de la naturaleza de las aberturas de evaporación que tienen las hojas, los denominados estomas, sobretodo por su tamaño, densidad y localización o exposición
- la estación del año, que determina si las plantas tienen hojas y por cuánto tiempo
- la hora del día, que altera el balance de la radiación, y los ritmos de fotosíntesis y crecimiento de la planta, y la actividad de los estomas. Por la noche la transpiración es del orden del 5-10% de la tasa de transpiración diurna
- el estado de crecimiento de la planta, dado que las plantas consumen mucha más agua en estado de crecimiento activo o periodos de construcción de biomasa, o cuando el sistema radicular ha alcanzado el máximo de expansión y eficiencia. Para ciertas especies vegetales el máximo de evapotranspiración tiene lugar cuando ha conseguido cubrir toda la superficie del suelo
- los factores meteorológicos también influyen en la apertura de los estomas, dándose la circunstancia de que con fuertes vientos, sobretodo si son cálidos, los estomas se cierran, como mecanismo para no perder grandes cantidades de agua. Por el contrario, en casos de gran humedad ambiental, las plantas pueden seguir eliminando agua incluso en forma líquida para permitir el movimiento de la savia
- las propiedades del suelo, por supuesto, también condicionan la cantidad de agua disponible para la planta, siendo un factor limitante a tener en consideración, de manera que, en función de la litología, las plantas van a ser capaces de extraer más o menos cantidad del agua retenida por el suelo

ASPECTOS TEÓRICOS DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evaporación directa a partir el suelo (E_s) y la transpiración (T) tienen lugar de forma simultánea en la naturaleza, y no es fácil distinguir cuánto vapor de agua es producido por cada uno de los dos procesos. Por ello, se usa el término Evapotranspiración (ET) que engloba el proceso de transferencia de agua a la atmósfera tanto por acción de las plantas como por evaporación directa a partir del suelo.

Mientras exista agua disponible, la evapotranspiración tendrá lugar a la mayor cuantía posible, dependiendo sólo de la cantidad de energía disponible y del control ejercido por la vegetación, si es que la hay. Cuando el suelo está seco o cuando la cantidad de agua en el suelo empieza a disminuir, la tasa de evapotranspiración irá disminuyendo. Por tanto la cantidad de agua en la superficie del suelo, y la contenida en la zona radicular, sobretodo, es muy importante en los procesos de evapotranspiración.

Desde las primeras definiciones, este concepto ha sido vinculado a una expresión matemática que intenta expresar de forma sintética todos los procesos que influyen en esa transferencia de masa y energía.

En 1948, Thornthwaite por un lado y Penman, por otro, definieron el concepto de evapotranspiración potencial (ETp), que expresaba de forma más exacta la transferencia de agua entre esas superficies. Después de varias décadas, Doorembos y Pruitt (1975 y 1977) expresaron una nueva definición de la evapotranspiración, que fue la Evapotranspiración de referencia (ETo). Allen (1994) da una nueva definición de la evapotranspiración de referencia y expone los nuevos objetivos a cubrir en las líneas de investigación de la evapotranspiración. En todos los casos se desarrollan modelos y expresiones matemáticas de una evapotranspiración que difiere de la evapotranspiración real (ETR) que ocurre en una región; estas diferencias se deben, sobre todo, a la disponibilidad de agua en las superficies.

Thornthwaite (1948) introdujo en la ecuación la influencia de la temperatura y la insolación, pero no considera el tipo de superficie. Penman (1948) fue el primero en desarrollar un método combinado que consideraba tanto las fuentes de energía debidas a la radiación como el transporte turbulento del vapor de agua a partir de una superficie, pero no tenía en cuenta el tipo de superficie. Hay que recordar que la evapotranspiración abarca tanto la evaporación como la transpiración, y que precisamente la transpiración depende sólo del tipo de cubierta vegetal que tengamos, por lo que los métodos de Thornthwaite y Penman desestiman los procesos de transpiración.

En el método de Penman-Monteith (1963) se distingue ya una resistencia del cultivo, denominada resistencia estomática, y una resistencia aerodinámica que corresponde a las condiciones aerodinámicas de la superficie para la transferencia del agua entre el aire y la superficie. La resistencia estomática es debida a la respuesta de los estomas, que son los orificios por donde sale el vapor de agua de las hojas de las plantas, y que responden a procesos fisiológicos como la regulación térmica, principalmente, y mantienen el flujo de agua en el interior de la planta, que es el único mecanismo de entrada de nutrientes del suelo a través de las raíces.

Tras la definición de Penman-Monteith, conocida también como el método de Penman modificado, surgieron diversas modificaciones, basadas en definir esas resistencias estomática y aerodinámica, que se suelen agrupar en un único término conocido como coeficiente de cultivo. La mayoría de las investigaciones han tratado de definir las variables aerodinámicas para diferentes superficies de cultivos. Ya en esta década se ha visto la gran dificultad de definir coeficientes de cultivo que sean aplicables a cualquier zona del planeta, debido, sobretudo, a la dificultad de obtener datos meteorológicos suficientes para definir bien esas condiciones aerodinámicas, así como la dificultad de tener una misma especie de referencia, cuyas características de superficie sean aplicables en otras regiones.

Allen et al. (1994) proponen como criterio unificador suponer un cultivo hipotético de referencia, con unas condiciones aerodinámicas fijas y tener así el valor de la evapotranspiración de referencia, que será comparable a cualquier otro estudio, y tomar los datos meteorológicos a 2 metros de altura de la superficie.

DEFINICIONES DE EVAPOTRANSPIRACION

Evapotranspiración Potencial (ET_p)

El concepto de evapotranspiración potencial fue definido de forma paralela en 1948 tanto por Thornthwaite como por Penman. Desde entonces este concepto es ampliamente utilizado, y ha tomado una gran importancia para los estudios geográficos sobre climatología mundial y, en general, en las investigaciones hidrológicas y en la predicción de necesidades de agua para la agricultura, tanto en secano como en regadío. Así, es frecuente ver clasificaciones de índices de aridez en función de la precipitación – ET_p. También se usa como variable en correlaciones para estimar el rendimiento de los cultivos, incluso se considera también para definir la aridez en los estudios de recarga.

Se define la evapotranspiración potencial como la evaporación a partir de una superficie extensa con césped corto que ensombrece totalmente el suelo, y siempre está bien regado con agua. La evapotranspiración potencial no puede ser nunca superior a la de una superficie libre de agua en las mismas condiciones meteorológicas.

Esta consideración de que la ET_p no puede ser superior a la de una superficie de agua libre probablemente sea sólo aplicable en regiones húmedas. Pruitt y Lawrence (1968), por ejemplo, midieron en cultivos de centeno en Davis (California) que la cantidad de agua utilizada era del 80 % de la evaporada por tanque de evaporación, excepto cuando los vientos eran fuertes y el aire seco y cálido, aunque, en ese caso, las plantas consumen relativamente menos agua, debido aparentemente a una mayor resistencia de los estomas. En las grandes planicies de los Estados Unidos, y en otras muchas regiones áridas, cultivos bien regados que ejercen una débil cubierta resistente, pueden consumir más energía y transpirar más agua que la evaporada por una superficie libre de agua.

La ET máxima viene determinada por el clima y el desarrollo de las plantas y su fisiología cuando están bien abastecidas de agua. En esencia, la diferencia ET_p-ET_m es una medida de la resistencia de la cubierta vegetal. La ET_r es resultado de un suelo poco regado o con poca disponibilidad de agua, provocando una falta de disponibilidad de agua para la planta. La relación ET_r/ET_p puede expresarse como una función del potencial del agua en el suelo y se ha utilizado como parámetro para cuantificar el riego en función de la demanda.

Evapotranspiración de referencia (ET_o)

La Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) adoptó el concepto de evapotranspiración de referencia (ET_o) en su Guía para las necesidades hídricas de los cultivos. Esta evapotranspiración de cultivos es ampliamente aceptada por todos los colectivos agrícolas para las prácticas agrarias, proyectos e investigaciones. El concepto de evapotranspiración de referencia se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie cultivada de césped verde extensa, de unos 8 a 12 cm de altura, bien

desarrollado y uniforme, que cubre totalmente el suelo y tiene un crecimiento activo, estando siempre bien regado (Pruitt y Doorembos, 1977).

Numerosos investigadores han tratado de determinar la ETo en diferentes localidades de todo el mundo, pero muchos de ellos han demostrado las carencias y dificultades del método propuesto. En primer lugar, la principal dificultad ha sido encontrar un cultivo de referencia. La definición de un césped de referencia no ha sido estandarizada; no se especifica la variedad de césped ni las características morfológicas para las diferentes condiciones climáticas. Además, las prácticas y costumbres de cultivo del césped cambian de unos lugares a otros, incluso, en el tiempo, para una misma localización geográfica. Otros autores propusieron la alfalfa como cultivo de referencia debido a que hay menos variedades y es un cultivo mucho más similar a otros cultivos que el césped.

Además, estos cultivos bajos tienen grandes problemas microclimáticos y de representatividad en lisímetros que los hacen muy susceptibles a pequeñas variaciones, mostrando resultados con grandes desviaciones derivadas de las condiciones ambientales. En Allen et al. (1991) se recopilan los principales errores que se cometen en el cálculo con lisímetros derivados de las condiciones del entorno. Amatya et al., (1995) presentan una comparación de los seis métodos de cálculo de ETo más utilizados en la literatura para tres localidades de Estados Unidos y se comparan con las estimaciones del método de Penman-Monteith, que se utiliza como método más fiable cuando no se tienen datos de evapotranspiración, observándose que no hay un método claro que sea mejor que otros, aunque, parece deducirse que el peor de todos es el método de Thornthwaite.

Por todo esto, la FAO, en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID), recomendaron una revisión de la metodología de cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. Tras una consulta a expertos de la FAO, en Roma (28-31 de mayo de 1990), se propuso cambiar el concepto de cultivo de referencia y revisar los métodos de cálculo. Se creó el concepto de un cultivo hipotético de referencia que se adapta muy bien a la ecuación de Penman-Monteith, y que ha sustituido al cultivo vivo de referencia evitando todos sus inconvenientes.

Allen et al. (1994 b) definen la nueva evapotranspiración de referencia como la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de referencia que tiene una altura uniforme de 0.12 m, una resistencia de la superficie de 70 s/m y un albedo de 0.23, que es próximo a las características de una superficie de césped verde de altura uniforme, crecimiento activo, que cubre totalmente al suelo y que está bien abastecido hídricamente.

MÉTODOS DE CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION

Métodos de balance de agua

Esencialmente, todo el agua que cae en la superficie terrestre es devuelta a la atmósfera por evaporación y transpiración. Por tanto, es fácil estimar el balance de agua en el ciclo hidrológico:

$$P + E + I + ET \pm \Delta SW = 0$$

donde P es la recarga, bien por precipitación o bien por riegos, E es la escorrentía, I la infiltración, ET la evapotranspiración y ΔSW la variación en el contenido de agua en el suelo.

Métodos Climatológicos

Método de Thornthwaite

Thornthwaite (1948) describió la importancia física y biológica de la evapotranspiración en la clasificación climática y desarrolló una ecuación para la estimación de la evapotranspiración potencial ET_p . La fórmula de Thornthwaite se utiliza para calcular la evapotranspiración potencial mensual en mm, y se expresa de la siguiente forma:

$$ET_p = 1.6 \left(\frac{I_1}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right) \left(\frac{10T_a}{I} \right)^{a_1}$$

donde I_1 es el número de horas reales de sol al día, N es el número de días al mes, T_a es la temperatura media mensual en °C, y a_1 se define como:

$$a_1 = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$$

I es el índice de calor derivado de la suma de los 12 valores de los índices mensuales (i),

obtenida a partir de:

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

Método de Blaney-Criddle

Blaney y Criddle (1950) desarrollaron un método para estimar la evapotranspiración real, o como ellos denominaron: "el uso consumible". El uso consumible C_u para un cálculo mensual es:

$$C_u = k_m f$$

siendo K_m la derivada empírica del coeficiente de uso consumible mensual, que depende del tipo de cultivo, y f es el factor de uso consumible mensual: $0.01(1.8T_a+32)p$. T_a es la temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$) y p es el porcentaje del número de horas de sol mensual respecto al número de horas anual.

Método de Turc

Turc (1954) propuso un método sencillo, basado en la temperatura y la precipitación. Al igual que otros métodos basados en la correlación entre la precipitación como única recarga y la evaporación, pueden tener ser muy útiles para ciertas cuencas, pero su aplicación a otras regiones o cuencas, donde la profundidad de la zona no saturada, uso del suelo, topografía, clima y, sobre todo, tipo de lluvia son diferentes al lugar para donde se han realizado estas correlaciones, su aplicación es muy discutible.

La fórmula de Turc da la evapotranspiración anual en mm y se expresa como:

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L} \right)^2}}$$

P es la precipitación media anual y L es una función de T , que a su vez es función de la temperatura (t), y la precipitación (P).

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

siendo $T = \frac{\sum_i^{12} t_i \times P_i}{\sum_i^{12} P_i}$

Métodos basados en la radiación solar

Método de Penman

$$E_0 = \frac{sR_{no} + \gamma E_a}{(s + \gamma)}$$

R_{no} es la radiación neta sobre el agua libre y E_a viene dada por la ecuación:

$$E_a = f(U)(e_s - e_a)$$

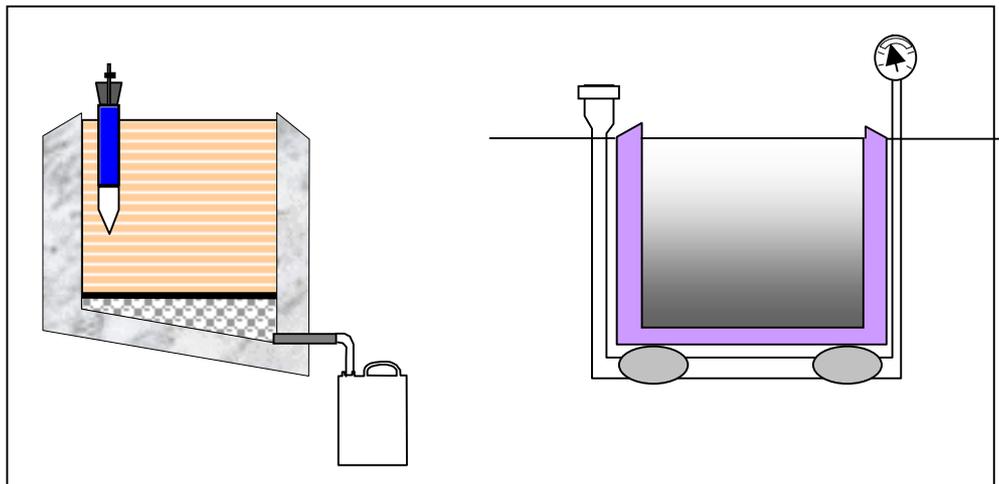
donde e_s y e_a viene expresados en mb y U es la velocidad del viento en km/h, tomada a 2 metros de altura respecto a la superficie. Según Doorenbos y Pruitt (1975) la función: $f(U) = 0.21(1 + U/160)$.

Método de Penman modificado por Monteith

$$LE = \frac{s(R_n + S) + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{(s + \gamma) [(r_a + r_c) / r_a]}$$

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - S) + \gamma \frac{37}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

MEDIDA DE LA EVAPOTRANSPIRACION



Los dos principales tipos de lisímetros, a la izquierda un lisímetro de drenaje, a la derecha un lisímetro de pesada

Balance del suelo

Se requiere conocer la ETP, capacidad de campo, reserva de agua utilizable (RAU) y el agua disponible por el suelo.

La ETP es necesario calcularla previamente. La capacidad de campo, que es el agua que un suelo puede retener, en mm, se puede determinar experimentalmente mediante las denominadas curvas de retención, que se verán más adelante, aunque con frecuencia se adoptan valores más o menos estandarizados en función de la textura del suelo, como por ejemplo, en suelos arcillosos, 100 mm ó más, en arenas muy permeables, 10 mm y en suelos intermedios, 50 mm. La reserva de agua utilizable (RAU) es la cantidad de agua que un suelo contiene en un momento dado; varía entre cero (suelo seco) y la capacidad de campo.

Ejemplo: balance de un suelo con CC=50 mm

	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	18.4	39.8	45.2	52.0	40.9	47.1	54.1	50.1	26.1	16.1	3.5	4.8
ETP,mm	98.9	58.2	28.1	14.9	12.9	15.3	34.0	49.5	76.9	118.1	153.8	143.9
P-ETP	-80.5	-18.4	17.1	37.1	28.0	31.8	20.1	0.6	-40.8	-102	-150.3	-139.1
RAU	0	0	17.1	50	50	50	50	50	9.2	0	0	0
ETR	18.4	39.8	28.1	14.9	12.9	15.3	34	49.5	76.9	25.3	3.5	4.8
Excedent				4.2	28	31.8	20.1	0.6				