

Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile¹

MARCELA INÉS SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Instituto de Geografía
Pontificia Universidad Católica de Chile

RESUMEN

Los métodos actualmente utilizados en nuestro país para determinar la evapotranspiración se pueden dividir en dos grupos: aquellos de medición o directos y los de estimación, también llamados indirectos o empíricos. Este artículo presenta los métodos de estimación más utilizados en el país.

Palabras claves: Evapotranspiración, Chile, métodos de medición.

ABSTRACT

The methods used today in our country for determining the evapotranspiration can be divided in two groups: the methods that measure directly the evapotranspiration and, in other hand the methods of estimation, indirect or empiric. This article shows the methods of estimation more widely used in the country.

Key words: Evapotranspiration, Chile, measuring methods.

1. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración es el proceso mediante el cual la superficie terrestre devuelve a la atmósfera en forma de vapor el agua que ha precipitado sobre ella a través de dos procesos: uno eminentemente físico como es la *evaporación* directa de la humedad del suelo, de las láminas de agua, de las capas de hielo, nieve y otras cubiertas, la interceptada por la vegetación, y de la *transpiración*, proceso biológico físico realizado por las plantas.

De acuerdo con la definición anterior, la evapotranspiración participa en el ciclo hidrológico, al permitir la transferencia de agua entre la superficie terrestre y la atmósfera. Por otra parte, para que el proceso ocurra se requiere de una fuente de energía que permita el cambio de estado físico del agua y proceda su difusión; esta fuente de energía es la radiación solar y, por ello, la evapotranspiración interviene también en el balance de energía superficial.

Los aspectos señalados en el párrafo anterior hacen de la evapotranspiración un fenómeno de

interés para diversas disciplinas, las cuales enfrentan de distinta manera su estudio en función de los objetivos que persiguen. De acuerdo con lo anterior, en los estudios realizados en nuestro país se pueden advertir, por una parte, los trabajos realizados con fines agronómicos y forestales, en los cuales el interés primordial es el de determinar los requerimientos hídricos de determinadas especies vegetales (cultivos y forestales); por otro lado, se encuentran los de carácter hidrológico que se centran en determinar las disponibilidades de agua con que cuenta una determinada área, con lo cual es posible planificar mejor el uso de los recursos. Por su parte, los estudios geográficos utilizan la evapotranspiración como uno de los parámetros que permite caracterizar climáticamente una zona y también para conocer sus potencialidades y, con ello, lograr un mejor aprovechamiento de los recursos.

Además de objetivos distintos, las diversas disciplinas también abordan la determinación de la magnitud o intensidad de la evapotranspiración con métodos distintos, así como también lo son las dimensiones del área de interés y la longitud del período estudiado.

Uno de los aspectos antes mencionados es el que se trata en este trabajo, al referirse a algunos de los métodos más utilizados en nuestro país para

¹ Este trabajo expone parte de los resultados obtenidos en el proyecto DIPUC N° 99/14E "Estado actual del estudio y determinación de la evapotranspiración en los ambientes mediterráneos chilenos".

determinar la evapotranspiración, los métodos llamados de “estimación”.

2. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

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

La distinta consideración de los factores que inciden en el proceso ha permitido el desarrollo de una serie de conceptos de gran importancia en el estudio y determinación de la evapotranspiración (Sánchez, 1999 y 2000). La noción de evapotranspiración potencial, *ETP*, introducida por Ch. Thornthwaite en 1948, considera que el proceso sólo está controlado por las condiciones climáticas; en este caso, la *ETP* se define como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones y en el supuesto caso de no existir limitaciones en el suministro de agua. Más tarde se introdujo la idea de evapotranspiración del cultivo de referencia, *ET_o*, muy similar al anterior al depender exclusivamente de las condiciones climáticas o meteorológicas, según el caso, pero distinto en la medida en que se considera un cultivo específico, estándar o de referencia, habitualmente gramínea o alfalfa (Doorenbos y Pruitt, 1990). Sin embargo, la evapotranspiración que efectivamente ocurre es distinta a los límites máximos considerados en los conceptos anteriores, dado que en el proceso intervienen también las características de la vegetación y especialmente la humedad disponible en el suelo, factor que puede favorecer o limitar la intensidad, esta es la evapotranspiración que ocurre en las condiciones reales del terreno que se conoce como evapotranspiración real, *ETR*.

En la medida en que se considere simultáneamente el mayor número de factores intervinientes, mejor será el conocimiento del funcionamiento del proceso de evapotranspiración y consecuentemente también su determinación. Efectivamente, este aspecto permite establecer ciertas diferencias entre los métodos actualmente utilizados para determinar la evapotranspiración. Algunos consideran las condiciones reales del ambiente y del momento en que se quiere dimensionar la magnitud del proceso; otros, en cambio, sólo toman en cuenta algunas de ellas. Desde este punto de vista se puede hablar de dos grandes grupos de métodos: por una parte, los métodos que se pueden denominar de *medición o directos*, y por otra, los métodos de *estimación o indirectos*.

2.1. Métodos de medición de evapotranspiración o métodos directos

Los métodos de *medición o directos* calculan la evapotranspiración a través del control de ingresos y salidas de agua en el suelo que sustenta una cubierta vegetal; por ello miden o cuantifican directamente la evapotranspiración en cualquier cultivo o tipo vegetal para las condiciones de suelo, clima y disponibilidad de agua del lugar en estudio. Estos métodos, aunque entregan mejores resultados más cercanos a la realidad, usualmente son costosos, engorrosos y requieren de bastante tiempo para llegar a resultados concluyentes (Vallejos, 1972; Espíldora, *et al.*, 1975). Por otra parte, los resultados que se obtienen son puntuales y válidos sólo para los cultivos o plantaciones en cuestión y las condiciones geográficas en las cuales se han aplicado. Estos métodos son los que se utilizan en los estudios agronómicos y forestales.

Dadas las condiciones que requieren para su aplicación, estos métodos son utilizados en el estudio de pequeñas áreas y los cálculos se efectúan en el momento del estudio.

A pesar de sus ventajas en cuanto a precisión, para Espíldora *et al.* (1975) los valores obtenidos con los métodos de *medición* no son realmente exactos debido a las fuentes de error y a las limitaciones propias de cada método, por tanto también pueden considerarse sólo estimaciones, aunque como tales se consideran los métodos de *estimación o indirectos* que se tratarán en el siguiente apartado.

Los métodos directos son numerosos y pueden ordenarse según distintos criterios; no obstante, se mencionan aquí los grandes grupos señalados

por Espíldora *et al.* (1975) por considerar los más frecuentemente indicados en otras referencias: (a) estanques, (b) lisímetros, (c) parcelas y superficies naturales de ensayo y (d) métodos de los volúmenes afluentes y efluentes del balance hidrológico. Especificaciones de características, condiciones de uso, evaluación de resultados y aplicaciones pueden consultarse en: Salgado (1966), Cifuentes (1971), Manríquez (1971), Quezada (1972), Espíldora *et al.* (1975), Tosso (1976), Huber y Ramírez (1978), Rojas (1994), Hernández (1998), Huber y García (1999), entre otros.

2.2. Métodos de estimación de evapotranspiración o métodos indirectos

A pesar de que los métodos directos son más precisos para determinar la evapotranspiración, éstos son difíciles de aplicar por las razones señaladas en el apartado inmediatamente anterior, por ello lo más común en estudios de grandes áreas (región o país en nuestro caso) es utilizar diversas fórmulas, ecuaciones o modelos basados en diferentes variables meteorológicas o climáticas de fácil disposición a partir de la red de estaciones meteorológicas convencionales (Cifuentes, 1971; Tosso, 1974; Rovira, 1976).

Los métodos *indirectos* son los más utilizados en los estudios geográficos y medioambientales. Se trata por lo general de simplificaciones de algunos de los métodos directos ya señalados, que a través de correlaciones entre medidas obtenidas por aquéllos y medidas de una o más variables climáticas o meteorológicas han permitido derivar fórmulas empíricas para estimar la capacidad evaporativa de un ambiente determinado. Generalmente la calibración de estos métodos se hace con mediciones realizadas con lisímetros o en parcelas experimentales (Sánchez, 1999).

Se han propuesto cientos de ecuaciones empíricas, muy variables en cuanto a complejidad, lo que determina que los datos necesarios para aplicarlas sean de disposición también variable. Los datos requeridos son habitualmente proporcionados por estaciones meteorológicas completas.

Los métodos indirectos se han empleado en todo el mundo para caracterizar grandes áreas. El período más habitual para el cual se realizan los cálculos de evapotranspiración con estos métodos ha sido tradicionalmente el anual y el mensual, en estudios geográficos o de carácter climático general; sin embargo, en la actualidad y con fines más bien agronómicos, forestales o hidrológicos aplicados, en términos generales de uso racional

del agua, están ganando importancia los métodos aplicados a períodos diarios y horarios.

Los métodos de estimación son empleados para determinar la evapotranspiración en sus límites máximos o potenciales, tal como es determinado por los conceptos de *ETP* o *ETo*, antes definidos, pero también entregan una aproximación sobre la magnitud efectiva o real del proceso, lo cual es considerado por el concepto de *ETR*. Para determinar la *ETR* con estos métodos, las características propias del cultivo y de humedad del suelo quedan incorporadas a través de la aplicación de *coeficientes de cultivo (Kc)* con los cuales se ponderan los valores de *ETP* o *ETo* obtenidos. La determinación de una u otra acepción del proceso de evapotranspiración, sea *ETP*, *ETo* o *ETR*, constituye un criterio de clasificación de los métodos. No obstante lo anterior, ellos se pueden dividir en función de las variables que utilizan para estimar la evapotranspiración; este aspecto se trata con mayor detalle en el siguiente apartado.

3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN O INDIRECTOS

Dentro de los métodos indirectos se pueden diferenciar dos grupos de modelos: las *formulaciones empíricas*, o parcialmente teóricas, que relacionan la evapotranspiración con datos climáticos, y los basados en la *correlación entre la evapotranspiración de zonas cultivadas con las pérdidas de agua de un estanque o bandeja de evaporación*. Los modelos pertenecientes al primer grupo pueden clasificarse a su vez de acuerdo a la variable climática sobre la que se basa la determinación de la evapotranspiración, en función de lo cual se puede hablar de: (a) métodos basados en la temperatura del aire y datos astronómicos, (b) métodos basados en la temperatura del aire y la humedad relativa, (c) métodos basados en la temperatura del aire y la radiación solar y (d) métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua.

3.1. Métodos basados en la temperatura del aire y datos astronómicos

Estos métodos son los más simples y fáciles de aplicar, dado que, por lo general, sólo requieren la temperatura del aire como parámetro principal; no obstante, son los que entregan los resultados menos confiables. Los más utilizados en Chile son los de Thornthwaite y el Blaney y Criddle.

Método de Thornthwaite: Ch. Thornthwaite desarrolló la fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial que lleva su nombre, al relacionar resultados experimentales de evapotranspiración con datos de temperaturas medias mensuales, parámetros que se encuentran correlacionados al depender ambos de la radiación neta. Fue propuesto en 1948 y ha sido utilizado en Chile en numerosos estudios. Referencias pueden encontrarse en: Salgado (1966), Cifuentes (1971), Tosso (1972), Vallejos (1972), Ferreira y Valenzuela (1975), Rovira (1976), Valenzuela (1976) y Valenzuela y Ferreira (1985), entre otros.

Método de Blaney y Criddle (1950): H.F. Blaney y W.D. Criddle desarrollaron una fórmula que permite estimar la cantidad de agua necesaria para el riego según determinados cultivos, concepto que los autores denominan *uso consuntivo* y que equiparan al de evapotranspiración potencial. Fundamentan su método en el hecho de que el agua necesaria por un cultivo es función de la temperatura, de las horas de luz y de la cubierta vegetal. Para aplicar la fórmula se requiere de unos coeficientes de consumo o factores de corrección, *K*, específicos para cada cultivo. Referencias y aplicaciones de este método se pueden encontrar en: Salgado (1966), Cifuentes (1971), Quezada (1972), Tosso (1972), Vallejos (1972), Espíldora *et al.* (1975), Ferreira y Valenzuela (1975), Rovira (1976), Valenzuela y Ferreira (1985) y Flores y Antonioletti (1999), entre otros. Una modificación de la formulación original propuesta por Blaney y Criddle ha sido empleada en los estudios de Merlet (1986), Merlet y Santibáñez (1989) y en el de CNR-CIREN (1997), todos a escala nacional.

3.2. Métodos basados en la temperatura del aire y la humedad relativa

Con la finalidad de mejorar las estimaciones, estos métodos incorporan, además de la temperatura, la humedad relativa del aire, factor de gran incidencia en la tasa de evapotranspiración al determinar el gradiente hídrico entre la atmósfera y la superficie evaporante. Entre los métodos más utilizados en Chile se encuentran los siguientes:

Método de Papadakis: las variaciones con respecto a la fórmula original de Papadakis han sido aplicadas por Cifuentes (1971), Ferreira y Valenzuela (1975) y Valenzuela y Ferreira (1985). Este método sólo considera la tensión de vapor entre los términos de la ecuación.

Método de Ivanov: esta ecuación fue propuesta en 1954 y utiliza la temperatura y humedad relativa media del período al que se aplica. Fue empleada en los estudios realizados por Santibáñez *et al.* (1979), Merlet (1986), Merlet y Santibáñez (1989) y CNR-CIREN (1997).

Método de Hargreaves: la ecuación atribuida a Hargreaves ha sido utilizada en Chile por Ferreira y Valenzuela (1975), Rovira (1976) y luego por Valenzuela y Ferreira (1985); permite el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de la temperatura y humedad relativa. Sin embargo, la ecuación indicada por León (1975) fue utilizada para calcular la evapotranspiración real, al agregar un coeficiente de cultivo. Recientemente ha sido aplicada, también con modificaciones, por Flores y Antonioletti (1999) para calcular la *ETP*.

3.3. Métodos basados en la radiación solar

Este grupo de métodos, además de considerar otras variables climáticas, se basa en la alta correlación existente entre la evapotranspiración y la radiación solar, principal factor que alimenta y controla el proceso, aunque dependiente en cierto grado de las particularidades climáticas, así como de las características de las superficies que hacen variar esta relación a lo largo del año. Los resultados que entregan son más precisos que los métodos anteriores, pero son más difíciles de aplicar por la escasez de observatorios que registran la radiación.

Dentro de estos métodos, en Chile se han utilizado los siguientes:

Método de Turc (1961): este método es uno de los clásicos en todo el mundo y fue propuesto por L. Turc basándose en balances hídricos realizados en cuencas de ríos y en resultados de experiencias con métodos directos en ciertas regiones de Francia, Escocia y África del Norte. Su fórmula estima la evapotranspiración potencial y ha sido utilizada en Chile por Rovira (1976), Valenzuela y Ferreira (1985), Merlet (1986), Merlet y Santibáñez (1989) y CNR-CIREN (1997), entre otros.

Turc también propuso un método para el cálculo de la evapotranspiración real, el cual ha sido empleado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (1987) en la elaboración del Balance Hídrico de Chile.

Método Jensen-Haise (1963): el método propuesto por M.E. Jensen y H.R. Haise está basado so-

bre datos obtenidos en regiones áridas del oeste de Estados Unidos. Fue contrastado en Nebraska con medidas lisimétricas probándose que subestima el valor de evapotranspiración para el cultivo de referencia (alfalfa) bajo condiciones advectivas, pero da buenos resultados en situaciones no advectivas.

En Chile esta ecuación ha sido aplicada en los estudios de Tosso (1972) y Vallejos (1972), si bien las referencias entregadas por Espíldora *et al.* (1975), León (1975) y Rovira (1976) presentan otra formulación.

Método de la radiación: esta ecuación considera además de la radiación el efecto de la velocidad del viento, la humedad relativa, la temperatura y la altitud del observatorio. Ha sido utilizada por Merlet (1986) y por Merlet y Santibáñez en 1989 para determinar la evapotranspiración potencial en los ambientes mediterráneos chilenos.

3.4. Métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua

Existe acuerdo generalizado en Chile y el mundo en que estos métodos son los que entregan los mejores resultados, dado que consideran, simultáneamente, a la evapotranspiración dentro del balance de energía superficial y que el vapor de agua se difunde en régimen turbulento; lo anterior hace que estas formulaciones tengan una base física más sólida que los métodos anteriores y proporcionen las mejores estimaciones.

Dentro de los métodos que se pueden incluir en este grupo, los más utilizados en Chile son los basados en la formulación original propuesta por Penman y todas las variaciones realizadas a partir de ella.

Método de Penman (1948): en su formulación original de 1948, el método del investigador inglés H.L. Penman constituye la primera expresión de base física para calcular la evapotranspiración potencial y que aplica las dos ideas teóricas señaladas previamente. El modelo está fundado sobre el cálculo previo de la evaporación potencial de una cubierta de agua libre, el cual es transformado luego en evapotranspiración potencial de una superficie cubierta con vegetación con el uso de un coeficiente de reducción, variable y obtenido empíricamente.

Es uno de los métodos más utilizados en el mundo por su mayor precisión, comparado con

métodos antes mencionados. En Chile también ha sido profusamente empleado, aunque se advierten variaciones entre las diversas ecuaciones con respecto a la formulación original propuesta por el autor. Referencias y aplicaciones se pueden encontrar en: Salgado (1966), Millar (1972), Espíldora *et al.* (1975), Merlet (1986), Merlet y Santibáñez (1989), CIREN-CNR (1997) y Flores y Antonioletti (1999), entre otros. Una de las variaciones de la fórmula de Penman es la utilizada en la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas.

Método Penman-Monteith (1965): corresponde a una modificación realizada por J.L. Monteith a la formulación propuesta por H.L. Penman. Actualmente es uno de los métodos más utilizados en el mundo por los mejores resultados que entrega (Sánchez, 1998, 1999). En Chile ha sido utilizado en diversas tesis de grado y estudios realizados en la Escuela de Agronomía de la Universidad de Talca; entre ellos se pueden mencionar: Solís (1995), Ortiz (1996), Ortega-Farías *et al.* (1996) y Ortega-Farías (2000). Es el método que la FAO ha recomendado para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos en todo el mundo (Ortega Farías *et al.*, 1998).

Modelo de Bouzo (1998): debe mencionarse también el aporte realizado por Carlos Bouzo a la determinación de la evapotranspiración en Chile. Aunque con fines de enseñanza agronómica, el autor desarrolla un nuevo modelo matemático para simular la demanda máxima de agua de un cultivo (Bouzo, 1998).

3.5. Métodos basados en la relación entre evaporación de bandeja y evapotranspiración

Para muchos autores, la evaporación desde una superficie de agua libre es el mejor integrador de los factores climáticos; a partir de este hecho, numerosas investigaciones han demostrado una estrecha relación entre la evapotranspiración de una superficie cultivada y la evaporación desde superficies de agua libre, puesto que ambos fenómenos se ven afectados por los mismos factores meteorológicos o climáticos (Salgado, 1963; Vargas, 1963; Córdova, 1974; Tosso, 1974; Ferreira y Valenzuela, 1975). Conocer esta relación representa una forma simple y rápida de saber cuándo y cuánto regar, puesto que la evaporación es una medida muy simple de hacer y numerosas estaciones meteorológicas y experimentales dis-

ponen del instrumento adecuado para medirla. El evaporímetro o bandeja de evaporación adoptado como referencia es el utilizado por el *Weather Service* de Estados Unidos, conocido como *evaporímetro o cubeta clase A*.

Numerosos estudios se refieren con detalle a esta relación e indican el modo de aplicarla para obtener la evapotranspiración; ésta se obtiene a partir de la aplicación de coeficientes sobre el valor registrado en el evaporímetro. Referencias al respecto se pueden encontrar en: Tosso (1974), Espíldora *et al.* (1975), Zerega (1980), Merlet y Santibáñez (1989), Jana (1990), Salgado (1992), Rojas (1994), entre muchos otros.

Algunos de los métodos de estimación de evapotranspiración que utilizan esta relación son los de Grassi y Christiansen y el de Tosso.

Método de Grassi y Christiansen: los autores propusieron en 1964 tres fórmulas para calcular la evapotranspiración potencial en función de diferentes variables. Una de ellas está basada en la evaporación de bandeja, en la temperatura y en el grado de cobertura del cultivo. Referencias de este método se pueden consultar en Cifuentes (1971), Ferreira y Valenzuela (1975) y Valenzuela y Ferreira (1985).

Método de Tosso: Juan Tosso ha realizado uno de los más grandes aportes de investigadores chilenos en la determinación de la evapotranspiración, al generar en su tesis de magíster un modelo de cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de la evaporación de bandeja y otras variables climáticas como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, altitud, entre otras. Referencias sobre su naturaleza y aplicación se pueden encontrar en Tosso 1972, 1974 y 1975, entre otros.

3.6. Evaluación de resultados obtenidos con diferentes métodos

Hay acuerdo entre los diversos autores en que los métodos de *medición o directos* son los que entregan los resultados más precisos y confiables, a pesar de las limitaciones que algunos autores señalan. No obstante, comparados con los métodos indirectos son más difíciles de aplicar por el instrumental necesario para su operación, por ello los métodos más difundidos y aplicados en el estudio de grandes áreas son los *indirectos*, de *estimación o empíricos* que requieren datos proporcionados por observatorios meteorológicos convencionales.

Considerando la primera gran aproximación señalada, algunos estudios comparan los resultados obtenidos con métodos directos con aquellos logrados con modelos indirectos, si bien la mayoría de los estudios que evalúan las bondades y limitaciones entre distintos métodos son aquellos que aplican sólo métodos indirectos. En estos estudios se comparan los resultados obtenidos con distintas fórmulas entre sí, mientras que otros los contrastan además con la evaporación de una superficie de agua libre, la cubeta de evaporación, cuyo resultado se adopta como referencia. Otra diferencia entre estos estudios se deriva del hecho de que en algunos se cotejan resultados obtenidos con los datos de un solo observatorio, y en otros en un gran número de ellos, lo cual deriva también en las dimensiones del área que se quiere caracterizar.

No es posible afirmar categóricamente cuál método entrega los mejores resultados en Chile, si bien es generalizada la observación de que los métodos basados en la ecuación de combinación del balance de energía y de la transferencia turbulenta del vapor de agua son los más certeros. De éstos, como ya se ha señalado, actualmente, el de Penman es el más utilizado en Chile y el que entrega de momento los mejores resultados (Salgado, 1966; Millar, 1972; Merlet y Santibáñez, 1989; Flores y Antonioletti, 1999), si bien el de Penman-Monteith comienza también a utilizarse con profusión en estudios agronómicos. Sin embargo, los dos modelos señalados tienen el inconveniente de ser más difíciles de aplicar dadas las demandas de información que tienen; en su defecto también se utiliza el método de Hargreaves (Flores y Antonioletti, 1999), el de Turc y el de Ivanov (CNR-CIREN, 1997). Métodos más sencillos, como los señalados en el apartado 3.1., sólo son utilizados cuando no es posible aplicar otro de base física más sólida.

4. CONCLUSIÓN

Los métodos utilizados en los estudios consultados difieren según la disciplina que los realiza; en aquellos de carácter agronómico o forestal se emplean métodos de medición directa; mientras que los estudios que consideran áreas extensas utilizan métodos de estimación. Estos últimos entregan datos menos precisos, comparados con los métodos anteriores, pero de mayores posibilidades de uso dado que requieren como datos básicos de entrada, los proporcionados por observatorios meteorológicos o agroclimáticos. Son en

general muy simples de aplicar y han llegado a ser los más utilizados en estudios climáticos, geográficos e hidrológicos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOUZO P., CARLOS ALBERTO (1998): Modelo matemático para la estimación de la demanda máxima de agua de los cultivos. Tesis Magíster en Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.
- CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (1990): Atlas agroclimático de Chile. Regiones IV a IX. Publicación N° 87. Santiago.
- CIFUENTES LUNA, CARLOS PATRICIO (1971): Evapotranspiración potencial en lisímetros y ecuaciones empíricas. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO Y CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (1997): Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Santiago.
- CÓRDOVA PALMA, FRANCISCO (1974): Relación entre uso-consumo y evaporación desde bandeja para un cultivo de maíz. *Agricultura Técnica*. Volumen 34, Número 1, págs. 11-15.
- DOORENBOS y PRUITT (1990): Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- ESPÍLDORA C., BASILIO; BROWN F., ERNESTO; CABRERA F., GUILLERMO e ISENSEE M., PABLO (1975): Elementos de Hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago.
- FERREIRA SAAVEDRA, VÍCTOR y VALENZUELA A., ALEJANDRO (1975): Cálculo de la evapotranspiración potencial para Chile. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- FLORES S., EUSEBIO y ANTONIOLETTI R., RODRIGO (1999): La evapotranspiración potencial como expresión de las necesidades de agua de los cultivos y sus métodos. *Anales de la Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas* 1999, págs. 31-37.
- LEÓN SADE, RICARDO GUILLERMO (1975): Requerimientos de agua desde Los Ángeles a Puerto Montt. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- MANRÍQUEZ NOVOA, ISIDORO (1971): Determinación de uso consumo en 6 cultivos, sometidos a diferentes tratamientos de humedad de suelo, para la provincia de Ñuble. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- MERLET B., H.A. (1986): Evapotranspiración potencial y necesidades netas de agua de riego en Chile. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias Agrícolas. Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Santiago.
- MERLET B., HORACIO y SANTIBÁÑEZ Q., FERNANDO (1989): Evaluación y cartografía de la evapotranspiración potencial en la zona de climas mediterráneos de Chile. *Boletín Técnico*, Número 48, págs. 27-50. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile.
- MILLAR B., AGUSTÍN (1972): Información tabulada para el cálculo de evaporación potencial mediante la ecuación de Penman. *Boletín Técnico* Número 39. Departamento de Suelos, Universidad de Concepción, Chillán.
- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1987): Balance Hídrico de Chile. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago.
- ORTEGA, S.; CUENCA, R.; SOLIZ, B. y ORTIZ, C. (1996): Evaluación del calor latente usando la ecuación de Penman-Monteith, con un valor variable de la resistencia de la cubierta vegetal a la transferencia de vapor de agua. *Ciencia e Investigación Agraria*. Volumen 23, Números 2-3, págs. 113-118.
- ORTEGA-FARIAS, S.; MEDIAVILLA A., W.; FUENTES J., S. y CUENCA, R. (1998): Validación de un modelo para estimar la radiación neta de una cubierta vegetal en condiciones de referencia. *Ciencia e Investigación Agraria*. Volumen 25, Número 2, págs. 103-107.
- ORTEGA-FARIAS, S.; CALDERÓN, RODRIGO; ACEVEDO, CÉSAR y FUENTES, SIGFREDO. (2000, inédito): Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. U. de Talca Servicio Integrado de Agroclimatología y Riego SIAR, Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias. Investigación financiada con el apoyo de FONDECYT N°1970309. Talca. 12.
- ORTIZ, C. (1996): Análisis de la evapotranspiración usando la ecuación de Penman-Monteith, bajo diferentes condiciones atmosféricas y dos niveles de humedad en el suelo. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Talca. Citado por Ortega-Farías *et al.*, 1998.
- QUEZADA LANDEROS, CELERINO MATÍAS (1972): Evapotranspiración y efecto de la frecuencia de riego en los rendimientos de tres cultivos. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- ROJAS CERPA, NELSON ZILAY (1994): Determinación de la evapotranspiración de *Pinus radiata* D. Don en vivero, mediante lisímetro de drenaje. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- ROVIRA P., ADRIANO (1976): Selección de fórmula para estimar evapotranspiración potencial en Chillán-Chile. *Notas Geográficas*. Número 7, págs. 31-44.
- SALGADO SEGUÉL, LUIS GABRIEL (1966): Métodos para determinar evapotranspiración actual y potencial. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- SÁNCHEZ M., M.I. (1998): Estimación de evapotranspiración máxima a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Trabajo de Investigación. Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid, España.

- SÁNCHEZ M., M.I. (1999): Estimación de evapotranspiración a través de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Tesis doctoral. Departamento de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid, España.
- SÁNCHEZ M., M.I. (2000): Características y apreciaciones generales de los métodos de medida y estimación de la evapotranspiración. *Revista de Geografía Norte Grande*, N° 22 (en prensa).
- SANTIBÁÑEZ Q., F.; PARADA L., M. y ULRIKSEN U., P. (1979): Perspectivas de Desarrollo de los Recursos de la VII Región. Distritos Agroclimáticos. Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales, IREN-CORFO. Publicación 25. Santiago.
- SOLÍS, B. (1995): Evaluación de la ecuación de Penman-Monteith en la evapotranspiración de referencia. Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad de Talca. Citado por Ortega-Farías *et al.*, 1998.
- TOSSO T., JUAN (1972): Analysis of Chilean meteorological data to estimate evapotranspiration and irrigation requirements. Tesis para optar al grado de Master of Science in Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. Logan, Utah.
- TOSSO T., JUAN (1974): Nueva fórmula para la determinación de evapotranspiración en Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental La Platina. Programa de Riego.
- TOSSO T., JUAN (1975): Nueva fórmula para la determinación de evapotranspiración en Chile. *Agricultura Técnica*, Volumen 35, Número 3, págs. 139-147.
- TOSSO T., JUAN (1976): Determinaciones de evapotranspiración y coeficientes K para varios cultivos. *Agricultura Técnica*, Volumen 36, Número 4, págs. 151-155.
- VALENZUELA, ALEJANDRO (1976): Análisis de algunas ecuaciones para determinar evapotranspiración. *Publicaciones Misceláneas Agrícolas*, Número 13, págs. 349-359. V Seminario Nacional de Riego y Drenaje. Facultad de Agronomía, Universidad de Chile.
- VALENZUELA, ALEJANDRO y FERREIRA, VÍCTOR (1985): Variación de la evapotranspiración potencial en Chile. *Agro-Ciencia*. Volumen I, Número 1, págs. 15-21.
- VALLEJOS SALAS, JUAN JOSÉ (1972): Fórmula para estimar la transpiración potencial de los cultivos. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Departamento de Edafología, Escuela de Agronomía, Universidad Católica de Chile. Santiago.
- VARGAS ALISTER, HUMBERTO (1963): Correlación entre la evapotranspiración de alfalfa y trébol rosado y la evaporación de tres tipos diferentes de bandejas de evaporación. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán.
- ZEREGA RAGGI, FRANCISCO (1980): Modelo micro-meteorológico para estimar evapotranspiración en función de evaporación de bandeja, evaluado en trigo (*Triticum aestivum* L. cv. Aurifen) y trébol (*Trifolium repens* L. cv. Ladino). Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Escuela de Agronomía, Universidad Católica de Valparaíso.