

Estimación de la evapotranspiración actual en bosques. Teoría

Estimate of actual evapotranspiration in forests. Theory

PATRICIO NOVOA

Corporación Nacional Forestal, Sexta Región. Casilla 447, Rancagua, Chile

SUMMARY

A theoretical development of the evapotranspiration estimation method in forests without shrub strata, using daily soil moisture variation of root horizon to estimate evapotranspiration, is presented. Since the incrop coefficient of forests is unknown, the use of the estimation of evapotranspiration incrop coefficient of natural prairies is proposed. The coefficient values are rectified iteratively, till the anomalous variation curve of soil moisture changes form and fulfils two requisites, first: the values of estimated moisture contents are statistically the same as the data records of the forest soil, and second: the curve fulfils the principle of equality in minimum soil moisture contents of the year. The rectified K_c value will be the forest's incrop coefficient. The methodology uses the HIDROSUELO simulation model to estimate the daily soil moisture variation by means of the daily evaluation of the universal water balance formula. A water balance formula for the forest its proposed.

Key words: forest evapotranspiration, water balance, simulation.

RESUMEN

Se presenta el desarrollo teórico de un método de estimación de evapotranspiración para bosques sin estrata arbustiva utilizando la variación diaria del contenido de agua del suelo radicular del bosque como estimador de la evapotranspiración. Dado que los coeficientes de cultivo (K_c) para bosques de clima templado son desconocidos, se propone estimar la evapotranspiración usando K_c de pradera natural, luego los valores de los coeficientes se rectifican iterativamente hasta que la curva de variación de contenido de agua del suelo, anómala, cambie de forma y cumpla dos requisitos, primero; que los valores de contenido de agua estimados sean estadísticamente iguales a los registrados en el suelo del bosque, y segundo; que la curva cumpla con el principio de igualdad en el mínimo contenido de agua anual. Los valores de K_c rectificados para esta curva serán los coeficientes de cultivo del bosque. La metodología utiliza como herramienta el modelo de simulación HIDROSUELO que estima la variación diaria del contenido de agua del suelo en base a la evaluación diaria de la ecuación universal de balance hídrico. Adicionalmente se propone una ecuación de balance hídrico para bosques.

Palabras claves: evapotranspiración en bosques, balance hídrico, simulación.

INTRODUCCION

La necesidad de conocer el uso de agua por los cultivos, en un mundo donde el desarrollo agrícola ha estado marcado por la constante amenaza de la sequía, ha sido siempre una tarea apremiante. Comúnmente las mediciones directas de utilización de agua por los vegetales se realizan mediante lisímetros¹; sin embargo, no es practicable ni

eficiente hacer mediciones con este instrumento en todos los casos en que se necesite conocer este dato, por ello se han diseñado métodos para predecir el uso-consumo del agua, a partir de variables climáticas y físicas como temperatura, horas de sol, velocidad del viento, humedad relativa, evaporación de bandeja, radiación, factores de corrección por latitud, todos elementos que determinan la magnitud del poder evaporante de la atmósfera o evapotranspiración potencial, la que se relaciona con el uso-consumo de agua por los cultivos mediante coeficientes de evapotranspiración, llamados coeficientes de cultivo, cuyos valores

¹ Dispositivo para medir los parámetros de la ecuación universal de balance hídrico en un volumen confinado y no disturbado de suelo.

dependen de características propias del cultivo como sus etapas de crecimiento y también las características del suelo y su humedad, las prácticas agrícolas y el riego. La evapotranspiración actual es, en definitiva, la evapotranspiración real del cultivo expresada como proporción de la evapotranspiración potencial mediante el coeficiente de cultivo (Doorenbos y Pruitt 1977).

En ciencias forestales, las dificultades para obtener mediciones directas del uso de agua de un bosque son definitivamente insalvables; sin embargo es posible estimar evapotranspiración en ecosistemas complejos como bosques, por la "huella" que ésta deja en el suelo, cual es el secamiento del contenido de agua de la porción de suelo donde crece el sistema radicular del bosque.

El suelo se seca como consecuencia de la evapotranspiración. Podrán haber movimientos de redistribución hídrica hacia estratos profundos pero serán siempre insignificantes en comparación al movimiento del agua ocasionado por el poder evaporante de la atmósfera.

El problema se reduce entonces a diseñar un método que permita obtener la tasa con que pierde agua la porción de suelo donde crece el sistema radicular del bosque durante un año de lluvias, para obtener una estimación exacta y precisa de su evapotranspiración.

METODOLOGIA

Aspectos generales. Medir tasas diarias de variación de humedad de suelos en sistemas de balance hídrico, es de hecho la forma como se obtienen empíricamente los coeficientes de cultivo para estimar evapotranspiración; sin embargo, las dificultades de este tipo de medición pueden ser obviadas y las estimaciones mejoradas si se logran validar modelos de simulación de variación del contenido de agua del suelo.

En modelos de simulación basados en ecuaciones de balance, como la ecuación universal de balance hídrico, la precipitación y la evapotranspiración son normalmente "inputs". En el caso de bosques la evapotranspiración es desconocida por la inexistencia de coeficientes de cultivo; sin embargo ésta puede ser estimada mediante rectificación o calibración de la variación anual del contenido de agua del suelo que cumpla con supuestos de validez universal.

¿Por qué la variación de humedad de suelos y no el escurrimiento o la percolación es el "output" que permite validar la evapotranspiración como input correctamente valorizado?... porque la variación de humedad de suelo es una característica o un síntoma integrador de todo el movimiento del agua en el suelo. Depende de todos los otros factores, lo que no ocurre con el escurrimiento o la percolación y cumple con un patrón de validez universal, como es el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad del suelo que expresa: "en zonas de clima templado con estaciones claramente diferenciadas o por lo menos con una estación seca-cálida y otra lluviosa, y donde la precipitación anual sea menor que la evapotranspiración potencial anual, el contenido de humedad del suelo el día "i" del mes más seco será aproximadamente igual al registrado el mismo día y mes del año siguiente".

Suponer la no validez de este principio significa admitir que una secuencia de años lluviosos producirá una humectación acumulativa de los suelos, hasta la formación de pantanos o aguazales en vastas áreas planas de las regiones lluviosas en los continentes, sin embargo ello no ocurre. Aunque las temporadas de lluvia sean extremadamente lluviosas, en la temporada de sequía siguiente los suelos llegan a estar tan secos como en la anterior. En áreas del sudoeste de Brasil y la Sabana de Africa existen zonas donde las precipitaciones de la temporada de lluvias torrenciales saturan los suelos hasta la formación de lagos de baja profundidad, en torno a los cuales florece la vida silvestre, pero llegada temporada de sequía los lagos se secan y el suelo llega a estar tan árido como en la temporada de sequía anterior.

Esta característica de la variación de humedad del suelo permite corregir iterativamente curvas de variación de humedad, hasta que éstas cumplan con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad, mediante la corrección de los coeficientes de cultivo. Obtenida la curva de variación legítima, es decir, aquella en que los valores simulados sean estadísticamente iguales a los registros de terreno y que cumpla con el principio antes enunciado, se obtiene por añadidura la evapotranspiración actual anual del bosque, por que una curva exacta y precisa se obtiene por una buena estimación de la evapotranspiración actual (ETA) lograda a su vez por el uso de correctos valores de K_c .

La proposición metodológica consiste entonces en estimar la evapotranspiración del bosque usando coeficientes de cultivo para pradera natural y posteriormente rectificar iterativamente estos coeficientes hasta que la curva anómala original cambie de forma y los valores de contenido de humedad estimados sean estadísticamente iguales a los registros medidos en el suelo del bosque, y que además la curva cumpla con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad.

Los coeficientes de cultivo para esta curva rectificadas serán los K_c del bosque y con ellos se podrá estimar ETA para un año determinado.

En la estimación de la variación anual del contenido de humedad del suelo se puede usar cualquier modelo que simule la variación de contenido de agua en mm/día. En este caso se propone utilizar el sistema computacional HIDROSUELO (Novoa y Sepúlveda 1996), modelo bidimensional, sin salida gráfica, analítico (la ecuación universal y las fórmulas pueden ser resueltas exactamente para cualquier valor de los parámetros) y determinístico (para un valor de los parámetros existe sólo un valor de resultados), basado en la evaluación diaria de la ecuación universal de balance hídrico. Se indican las modificaciones que se deben hacer a la forma de obtener algunas variables de entrada y cómo se deben interpretar los "outputs" del sistema hasta llegar a la obtención de los K_c del bosque.

Para una fase de suelos determinada, la ecuación universal de balance hídrico se expresa como:

$$PP - ES - ETA - P \pm \Delta\theta = 0$$

donde:

PP = precipitación (mm)

ES = escurrimiento (mm)

ETA = evapotranspiración actual (mm)

P = percolación a los horizontes bajo el horizonte radicular. Ocurre cuando el horizonte radicular llega a capacidad de campo (mm).

$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$: variación del contenido de agua del horizonte superficial, entre dos mediciones (mm).

θ_f = contenido de agua del horizonte superficial al final del período de tiempo considerado (mm).

θ_i = contenido de agua del horizonte superficial al inicio de un período de tiempo considerado (mm).

El modelo evalúa diariamente la ecuación universal de balance hídrico, por lo tanto todos los parámetros de la ecuación entran o salen del sistema referidos a esa unidad de tiempo.

VARIABLES DE ENTRADA

Precipitación. La precipitación, entendida como "el agua que llega al suelo del bosque", es la suma de las gotas de agua que llegan a la superficie del suelo más el escurrimiento de fuste. Esta precipitación, que de ahora en adelante llamaremos precipitación interior (PPI), se conforma por las gotas de lluvia que no son interceptadas por las copas y que llegan directamente al suelo (NINT), las gotas de agua que caen del follaje y ramas de las copas saturadas por la intercepción de la lluvia (GCOP) y el escurrimiento de fuste (EFU), es decir: $PPI = NINT + GCOP + EFU$.

Para obtener un registro de precipitación al interior del bosque se deben instalar pluviómetros convencionales en el piso del bosque, con una rejilla protectora que impida la entrada de "litter" que cae de las copas. El número de pluviómetros a instalar dependerá de la variabilidad que presente la cobertura de copas. Se propone un pluviómetro por cada sector que presente un 10% de diferencia de cobertura de copas medido consecutivamente desde la mayor a la menor cobertura.

También se pueden buscar coeficientes que relacionen la precipitación exterior y la precipitación interior del bosque; sin embargo siempre será preferible trabajar con registros.

Para medir el escurrimiento de fuste se pueden usar collares de plástico adosados en espiral alrededor del tronco, cuyo diseño se puede encontrar en Delfs (1965) y Vásquez (1983). Se deben instalar medidores de escurrimiento de fuste por lo menos en tres árboles de todas las clases diamétricas o rangos de clases diamétricas por especie para establecer relaciones diámetro-escurrimiento de fuste por especie, para montos de precipitación determinados, cuya relación con la tabla de rodal permitirá hacer una buena estimación del escurrimiento de fuste por hectárea, aun considerando los problemas de convertir registros de volumen de agua, captada por los anillos, a milímetros de agua.

El escurrimiento de fuste que llega al suelo genera una condición de movimiento de agua en el suelo que rodea al árbol distinta al suelo del

bosque sin árboles. Hay mayor oferta hídrica alrededor del tronco, luego el suelo presenta un contenido hídrico mayor, llega más rápidamente a la saturación, y por lo tanto genera con anterioridad procesos de escurrimiento localizados alrededor del fuste que no alcanzan a formar drenajes, volviendo a infiltrarse el agua en las cercanías del árbol una vez que el horizonte superficial dejó la condición de saturación. Por esta razón el escurrimiento de fuste es en definitiva precipitación que se infiltrará aumentando el contenido de humedad del suelo, por lo tanto deberá computarse como tal asumiendo el error de convertir litros de agua captada por los anillos y recibida en los recipientes a milímetros de precipitación a través de la relación 1 litro por m² de suelo = 1 mm.

La dificultad de registrar precipitación al interior del bosque aumenta con la presencia de sotobosque. Los arbustos interceptan parte del goteo de las copas de los doseles superiores y de las gotas de lluvia que no son interceptadas por las copas. Por otra parte, los arbustos también presentan escurrimiento de fuste en especies que generalmente son del tipo multivástagos. Para registrar precipitación en este tipo de bosques sería necesario diseñar pluviómetros que registraran además precipitación bajo los arbustos del sotobosque y anillos que registraran escurrimiento de fuste en arbustos multivástagos, empresa que escapa a los costos históricos en investigaciones de hidrología forestal.

Esta restricción reduce el alcance de la metodología, en una primera etapa, a bosques sin sotobosque, o donde su presencia no sea significativa, como son parte importante de los bosques de *Nothofagus* chilenos y plantaciones artificiales.

En definitiva la ecuación universal de balance hídrico aplicada al suelo de un bosque sin sotobos-

que En propiedad, esta expresión debe llamarse ecuación de balance hídrico al interior del bosque y la evapotranspiración actual a que se refiere debe entenderse como la transpiración de los árboles, más la evaporación del agua del suelo, la que puede ser muy pequeña debido a que el poder evaporante de la atmósfera está muy disminuido al interior de un bosque por la cobertura de las copas, pero no contempla la evaporación del agua interceptada por las copas, que es un parámetro perteneciente a una ecuación de rango mayor, como se verá más adelante.

EVAPOTRANSPIRACION ACTUAL (ETA)

Como dijimos anteriormente la ETA es un input en modelos de simulación de movimientos de agua. En nuestro caso, sin embargo, es el objetivo a alcanzar, por lo tanto el procedimiento que constituye el fundamento de la metodología propone el siguiente camino:

Obtener la curva de variación de humedad del horizonte radicular del suelo del bosque usando la ETA de la pradera natural de la zona, es decir, se propone encontrar la ETA del bosque corrigiendo la curva anómala obtenida con K_c de pradera natural.

Si se acepta *a priori* que los bosques evapotranspiran distinto que la pradera natural podemos suponer que la curva no representará la variación de humedad registrada en el suelo del bosque y por lo tanto será necesario corregir ETA hasta hacer coincidir la curva simulada con los registros de terreno de la variación de humedad de suelo del bosque. Si la hipótesis es falsa y los bosques evapotranspiran igual que la pradera, la curva de variación de humedad simulada con la ETA de la pradera natural será igual que la registrada en el suelo del bosque.

Para calcular la ETA de la pradera natural se utiliza la fórmula: $ETA = ETP \times K_c$

donde:

$ETA =$ Evapotranspiración actual del día i , mes j (mm)

$ETP =$ Evapotranspiración potencial del día i , mes j (mm)

$K_c =$ Coeficiente de cultivo del mes j .

Para estimar la ETP existen varias metodologías, pero se aconseja el método de la bandeja (Doorenbos y Pruitt 1977), de fácil aplicación y suficiente exactitud. En él ETP se estima mediante la fórmula: $ETP = EB \times K_b$

donde:

$ETP =$ Evapotranspiración potencial del día i , mes j (mm).

$EB =$ Evaporación de bandeja del día i , mes j (mm).

$K_b =$ Coeficiente de bandeja del mes j .

Los coeficientes de bandeja, obtenidos empíricamente, representan la relación que existe entre la evapotranspiración potencial y la evaporación de una superficie libre de agua. Están tabulados mensualmente según humedad relativa, velocidad del viento, el tipo de bandeja y su medio circundante.

Se propone utilizar la metodología de Doorenbos y Pruitt (1977) para la obtención de los K_c de la pradera. El coeficiente de cultivo K_c representa la relación que existe entre ETA y ETP y refleja el efecto que tiene en la evapotranspiración, las características del cultivo como su ritmo de desarrollo, duración del período vegetativo, cultivos cercanos y especialmente, durante la primera fase de crecimiento, la frecuencia de las lluvias y la disponibilidad real de agua en el suelo. Los K_c están tabulados para las distintas fases de desarrollo del cultivo y condiciones climáticas. Como la información de las fases de desarrollo de praderas naturales es muy escasa, ésta se obtiene dibujando la curva de desarrollo de la pradera natural con los datos de producción de materia seca acumulada expresados en porcentaje (datos existentes en los Centros Regionales del INIA). En la figura 1 se presenta un ejemplo de determinación de K_c según Doorenbos y Pruitt (1977), mediante curva de acumulación anual de materia seca expresada en porcentaje, en ella están determinados los estados de desarrollo de una pradera natural. La curva, que abarca todo el período vegetativo de la pradera, se divide en cinco estados de desarrollo: crecimiento

inicial, crecimiento activo, detención del crecimiento activo y comienzo de la estabilización, estabilización propiamente tal y madurez. Luego, en la misma figura se dibuja la segunda abscisa para el rango de valores de K_c de los estados de desarrollo. Los K_c se grafican de la forma típica como se ubican puntos en gráficos de coordenadas (x, y), es decir, se ubica el valor de K_c del estado "crecimiento inicial" en la abscisa de los K_c y el punto medio del mismo estado en la ordenada se dibuja el punto y así sucesivamente con los K_c de los otros estados de desarrollo. El punto representativo del estado de desarrollo que va señalado en la ordenada no siempre es el punto medio, el investigador puede elegir otro más representativo, como ocurre en este caso con los estados "crecimiento inicial" y "madurez". También algunos estados pueden ser un punto de la curva de crecimiento acumulado y no un tramo como el estado "detención del crecimiento activo y comienzo de la estabilización", en este caso el valor en la ordenada del K_c es el mismo valor del punto. Se unen los puntos con una curva suavizada tratando de representar la variación natural de los coeficientes, y de ella se leen los K_c mensuales de la pradera natural.

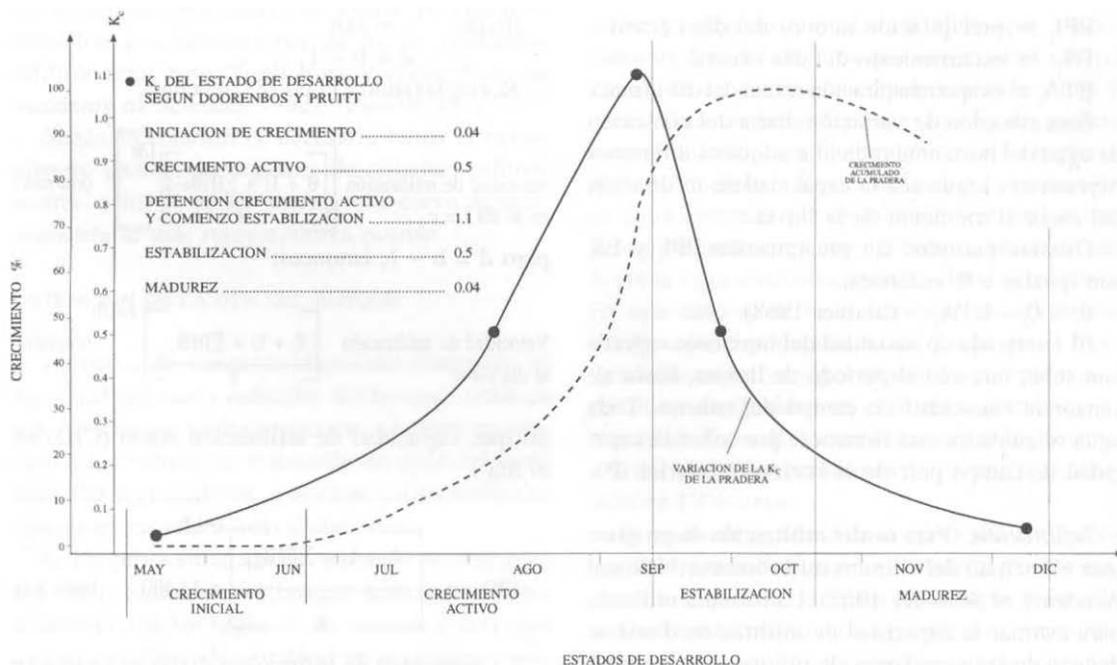


Figura 1. Curvas de K_c de los estados de desarrollo de la pradera natural en la zona de Los Vilos. Development stage curves of a natural prairie in Los Vilos.

Obtenidos los valores de K_c y K_b se procede a calcular ETA diaria:

$$ETA \text{ del día } i, \text{ mes } j \text{ (mm)} = K_c \text{ del mes } j \times ETP \text{ del día } i, \text{ mes } j \text{ (mm)} \quad (2)$$

pero

$$ETP \text{ del día } i, \text{ mes } j = K_s \text{ del mes } j \times EB \text{ del día } i, \text{ mes } j \text{ (mm)} \quad (3)$$

reemplazando (3) en (2),

$$ETA \text{ del día } i, \text{ mes } j = K \text{ del mes } j \times K_b \text{ del mes } j \times EB \text{ del día } i, \text{ mes } j \text{ (mm)} \quad (4)$$

VARIABLES DE SALIDA

Variación de humedad del horizonte superficial. La ecuación que estima la variación diaria del contenido de agua del horizonte radicular del bosque se deduce de la ecuación universal de balance hídrico.

Si hacemos:

$$\theta_i = \text{Contenido de humedad del horizonte superficial el día } i+1 \text{ (mm)}$$

y

$$\theta_i = \text{Contenido de humedad del horizonte superficial el día } i \text{ (mm)}$$

tenemos:

$$\theta_i = \theta_i + PPI_i - ES_i - ETA_i$$

donde:

$$PPI_i = \text{precipitación interior del día } i \text{ (mm)}$$

$$ES_i = \text{escurrimiento del día } i \text{ (mm)}$$

$$ETA_i = \text{evapotranspiración actual del día } i \text{ (mm)}$$

Esta ecuación de variación diaria del contenido de agua del horizonte radicular adquiere diferentes expresiones según sea la capacidad de infiltración del suelo al momento de la lluvia.

Durante períodos sin precipitación PPI_i y ES_i son iguales a 0; entonces,

$$\theta_i = \theta_i - ETA_i \quad (\text{Slatyer 1968}).$$

El contenido de humedad del horizonte superficial sube, iniciado el período de lluvias, hasta alcanzar la capacidad de campo del mismo. Toda agua retenida en este horizonte por sobre la capacidad de campo percola al horizonte inferior (P).

Infiltración. Para medir infiltración se propone usar el método del cilindro infiltrómetro (National Academy of Sciences 1962). La fórmula utilizada para estimar la capacidad de infiltración diaria se deduce de las ecuaciones de infiltración acumulada y velocidad de infiltración, obtenidas de los registros de un infiltrómetro tipo A, de la siguiente forma:

$$IA = at^b \quad (5)$$

donde:

$$IA = \text{infiltración acumulada (cm),}$$

$$t = \text{tiempo en minutos,}$$

a y b = constantes dependientes del tipo de suelo.

Haciendo la infiltración acumulada igual al contenido de humedad de todo el perfil de suelo en el día i, tenemos:

$$IA_i = \theta_i + U + \sum IHB_{i-1} \quad (6)$$

IA_i = infiltración total acumulada hasta el día i (mm)

U = contenido de humedad del horizonte inferior el primer día de aplicación del modelo (mm)

$\sum IHB_{i-1}$ = sumatoria de las infiltraciones al horizonte inferior desde el primer día de aplicación del modelo hasta el día i-1 (mm)

Reemplazando (6) en (5) y despejando t tenemos:

$$t = \left[\frac{\theta_i + U + \sum IHB_{i-1}}{a} \right]^{1/b} \quad (7)$$

ahora bien:

$$\text{velocidad de infiltración} = c t^d \text{ (cm/min)} \quad (8)$$

$$\text{donde: } c = axb$$

$$d = b - 1$$

Reemplazando (7) en (8), tenemos:

$$\text{velocidad de infiltración en el día } i = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum IHB_{i-1}}{a} \right]^{1/b} \quad (\text{cm/min})$$

pero $d = b - 1$, entonces:

$$\text{Velocidad de infiltración el día } i = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum IHB_{i-1}}{a} \right]^{1-1/b} \quad (\text{cm/min})$$

tal que, capacidad de infiltración diaria (CID) en el día i:

$$CID = c \left[\frac{\theta_i + U + \sum IHB_{i-1}}{a} \right]^{1-1/b} \times 14.400 \quad (\text{mm/día})$$

La capacidad de infiltración diaria se evalúa en cada evento de precipitación interior diaria. Si el monto de PPI en mm/día es menor que CID, entonces PPI infiltra en la estrata radicular y es retenida en ella hasta que la capacidad de campo de la

estrata es alcanzada en sucesivos eventos de precipitación; cuando ello ocurre el exceso de agua percola al horizonte inferior, constituyéndose en percolación (P). Si el monto de la lluvia es mayor que CID, ésta infiltra en el horizonte radicular en el monto correspondiente a CID y la diferencia corresponde a escurrimiento superficial (ES).

Según se deduce del párrafo anterior, la percolación bajo la estrata radicular se calcula como la diferencia entre θ_f y la capacidad de campo de la estrata radicular, cuando la θ_f es mayor que la capacidad de campo. Es decir, la infiltración a la estrata inferior corresponderá al exceso de agua que recibe la estrata radicular por sobre la capacidad de campo de la misma, como consecuencia de CID. Por esta razón la infiltración a la estrata inferior no se considera *a priori* en la ecuación de balance hídrico, sino que se deduce de ella. Algunos autores sostienen que induce a error utilizar los resultados obtenidos de mediciones indirectas o puntuales de infiltración, como cilindro infiltrómetro, en evaluaciones extensivas de balance hídrico, debido a la variación de la profundidad de los horizontes, cambios de estructura y agrietamiento, el microrrelieve, tipo de cobertura, y a la imposibilidad de registrar variaciones debidas a intensidad de precipitación. Mayor precisión se obtendría con simuladores de lluvia, lisímetros, infiltrómetros tipo North Fork y otros (National Academy of Sciences 1962), (Pascale 1972).

Según lo anterior, es necesario tomar el mayor número posible de registros de cilindros infiltrómetros, a fin de poder obtener una curva de infiltrometría lo más representativa posible.

OBTENCION DE LA ETA DEL BOSQUE

La curva de variación diaria del contenido de humedad del suelo radicular del bosque, obtenida por simulación, podrá seguir tres caminos en relación a los valores de contenido de agua del suelo radicular registrado en el bosque, y ésta tendrá las siguientes características distintivas:

I. La curva simulada de variación de humedad del suelo radicular del bosque seguirá la misma tendencia que los registros de terreno, y cumplirá con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad del suelo, si el bosque evapotranspira a tasas iguales que una pradera natural creciendo en las mismas condiciones de clima y suelo.

II. La curva simulada de variación de humedad del suelo del bosque irá por debajo de los registros, especialmente en el período de desecación, y no cumplirá con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad si el bosque evapotranspira a tasas menores que una pradera natural creciendo en las mismas condiciones de clima y suelo. Esto acontecerá porque los K_c de pradera natural utilizados en la simulación serán mayores que los auténticos K_c del bosque, y la extracción de agua estimada por simulación será mayor que la real, haciendo que la curva vaya sistemáticamente bajo los registros. La cobertura al suelo ofrecida por las copas de los árboles podría implicar una menor ETA anual debido a que el proceso de evaporación del suelo probablemente esté muy reducido. En este caso se deberán disminuir iterativamente los K_c usados y simular hasta que la curva se levante, iguale los registros, y por añadidura cumpla con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad. Estos K_c reducidos serán los auténticos del bosque y permitirán una correcta estimación de ETA anual.

III. La curva simulada de variación de humedad del suelo del bosque irá sobre los registros, especialmente en el período de desecación, y no cumplirá con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad, si el bosque evapotranspira a tasas mayores que una pradera natural creciendo en las mismas condiciones de clima y suelo. Esto acontecerá porque los K_c de pradera natural utilizados en la simulación serán menores que los auténticos K_c del bosque y la extracción de agua estimada por simulación será mayor que la real evapotranspiración del bosque, haciendo que la curva vaya sistemáticamente sobre los registros. En este caso se deberán aumentar iterativamente los K_c usados y simular hasta que la curva baje, iguale los registros y por añadidura cumpla con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad. Estos K_c aumentados serán los auténticos del bosque y permitirán una correcta estimación de ETA anual.

El grado de igualdad de la curva simulada y los registros puede determinarse estadísticamente mediante una prueba de t para las medias de las observaciones pareadas de los registros experimentales de humedad de suelos y las estimaciones del modelo en el mismo día, en milímetros.

Los registros se pueden representar como un gráfico de puntos, cuyos valores son las mediciones de porcentaje de humedad de suelo del bosque

convertidos a milímetros de agua a través de la densidad aparente y la profundidad de la estrata radicular (Black 1965). El contenido de agua se registra a partir del mes más seco una vez a la semana y 24 horas después de cada evento de precipitación interior.

Es difícil comparar el proceso de evapotranspiración de una pradera natural y un bosque porque son universos de movimiento de agua distintos. Si forzamos esta comparación, es sólo por hacer un primer acercamiento al verdadero valor de las tasas de evapotranspiración de bosques, acercamiento *ex profeso* erróneo, necesario para obtener tasas buenas por iteración. Esta es una forma bastante común de lograr buenas estimaciones en ensayos biológicos, a partir de comparaciones que en un primer momento pueden aparecer antojadizas.

Si la profundidad del horizonte radicular de las praderas naturales y los bosques fueran iguales (lo cual es escasamente probable), ambas formaciones vegetales evapotranspirarían a tasas muy parecidas, con pequeñas variaciones debidas a la densidad, porque a igual profundidad, la variación de la capacidad de contener agua del suelo está determinada por su densidad, pero sólo hay una forma de perder esa agua contenida, para cumplir con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad.

Lo cierto es que la profundidad del horizonte radicular de la pradera natural es significativamente menor que el horizonte radicular del bosque, y por lo tanto el suelo del bosque contiene más agua que debe ser extraída a tasas mayores para cumplir la ley de igualdad en el mínimo contenido de humedad. Pero estas tasas de extracción están a su vez limitadas por un valor máximo alcanzable representado por ETP, como valor máximo de evapotranspiración de un cultivo que cubre completamente un suelo, expresión del máximo poder evaporante de la atmósfera.

En Chile, en climas de bosque templado, a partir del mes de agosto y hasta los meses de enero-febrero es difícil registrar más de 500 milímetros de ETP, y en un suelo de densidad media, por ejemplo 1.53 gr/cc, esta cantidad de agua está en 1.68 m de profundidad. Es decir, los sistemas radiculares de bosques podrían sacar agua, por mecanismos conocidos, sólo de estratas que se aproximen a esta profundidad de suelo; curiosamente 1.68 m de horizonte radicular es un valor bastante común en suelos de texturas medias, siendo probable que la profundidad de crecimiento del

sistema radicular de los bosques se haya adaptado a la máxima capacidad de extraer agua expresada por la ETP de la región.

Por lo mismo induce a error hablar de árboles que funcionan como bombas extractoras de agua, porque los árboles no extraen agua a voluntad, sino que la extracción es un fenómeno físico enmarcado en principios de validez universal.

Restricciones en el uso de la metodología. No es posible aplicar este método en ambientes de bosque donde la evapotranspiración no deje huella en la estrata de suelo donde crece el sistema radicular del bosque, como en climas muy húmedos o muy fríos sin temporada seca donde los suelos no sufren procesos de secamiento bien definidos, por ejemplo suelos de ñadis, hualves, suelos podzolizados de las formaciones de alerce (*Fitzroya cupressoides*), suelos con estratas impermeables de fierrillo o en suelos de los bosques antárticos.

Ecuación de balance hídrico para bosque. El régimen de evapotranspiración en bosques es un proceso compartimentalizado en que el agua se conduce por caminos distintos a los que se registran en la evapotranspiración de praderas o cultivos en general, donde el poder evaporante de la atmósfera actúa directamente sobre el suelo y toda la formación vegetal al mismo tiempo.

En bosques, en cambio, el poder evaporante de la atmósfera actúa principalmente sobre el follaje de los doseles de copas, produciendo evaporación del agua interceptada por hojas, ramas y ramillas, generando además las diferencias de potencial que causan el ascenso de agua por los troncos, desde el suelo hasta los estomas de las hojas. La pérdida de agua de la estrata radicular del suelo de un bosque se debería fundamentalmente a la transpiración de los árboles y muy escasamente a procesos de evaporación del suelo. Si este supuesto es verdadero, hablar de evapotranspiración de bosques conduciría a interpretaciones erróneas, si con ese término queremos describir toda el agua que evaporan los ecosistemas de bosque.

La cantidad de agua evapotranspirada desde una masa boscosa puede ser extraordinariamente alta considerando la evaporación del agua interceptada por las copas, pero desde la perspectiva del suelo la extracción de agua procederá como consecuencia del proceso de transpiración casi exclusivamente y podría no ser marcadamente diferente, en

cuanto a extracción, a la verificada en la pradera natural en las mismas condiciones de suelo y clima.

Por esta razón, la ecuación universal de balance hídrico no es lo suficientemente universal como para explicar los movimientos de agua en ambientes de bosque, pero se puede usar como una herramienta muy precisa y exacta para explicar el movimiento de agua a nivel del suelo del bosque. En propiedad, la expresión $PP - ES - P - ETA \pm \Delta\theta = 0$ es una ecuación de balance hídrico para el suelo del bosque, porque la precipitación considerada es la recibida en el piso del bosque, que denominamos precipitación interior, y por lo mismo no considera la intercepción.

Una ecuación de balance hídrico que explique los movimientos del agua en todo el ambiente de un bosque, tendrá la siguiente forma general:

$$PP - INT - NINT = 0 \quad (9)$$

donde:

- PP = precipitación fuera del bosque (mm)
- INT = precipitación interceptada (mm)
- NINT = precipitación no interceptada (mm).

Esta ecuación general de balance hídrico para bosques expresa que toda el agua que precipita sobre un bosque seguirá dos caminos mutuamente excluyentes, será interceptada o no lo será. Ahora bien, la precipitación interceptada (INT) sigue a su vez tres caminos, parte de ella se evapora de las hojas, las ramillas, ramas y el propio tronco de los árboles, otra parte desciende al piso del bosque por escurrimiento de fuste y una tercera parte gotea de las hojas, ramillas y ramas saturadas de agua, es decir:

$$INT = INTE + EFU + GC \quad (10)$$

donde:

- INTE = intercepción evaporada (mm)
- EFU = escurrimiento de fuste (mm)
- GC = goteo de copas (mm).

A su vez la precipitación no interceptada (NINT) es precipitación que alcanza el suelo del bosque y, por lo tanto, la ecuación que explica la distribución de esta agua tiene la forma de la ecuación universal de balance hídrico para el suelo del bosque definida anteriormente, es decir:

$$NINT - ES_{nint} - ETA_{nint} - P_{nint} \pm \Delta\theta_{nint} = 0$$

despejando:

$$NINT = ES_{nint} + ETA_{nint} + P_{nint} \pm \Delta\theta_{nint} \quad (11)$$

donde:

- ES_{nint} = escurrimiento de la precipitación no interceptada (mm)

ETA_{nint} = evapotranspiración actual de la precipitación no interceptada (mm)

P_{nint} = percolación de la precipitación no interceptada (mm)

$\pm \Delta\theta_{nint}$ = diferencia de contenido de agua del suelo radicular, entre dos mediciones ($\theta_t - \theta_0$), atribuible a la precipitación no interceptada (mm).

Reemplazando (10) y (11) en (9), tenemos:

$$PP - (INTE + EFU + GC) - (ES_{nint} + ETA_{nint} + P_{nint} \pm \Delta\theta_{nint}) = 0 \quad (12)$$

Ahora bien, considerando que EFU y GC son precipitación (agua que llega al piso del bosque), ambos factores se pueden explicar en términos de ETA, ES, P y $\Delta\theta$, pudiendo obtenerse por agregación de términos similares una ecuación de balance hídrico para bosque.

EFU es precipitación y puede expresarse como ecuación de balance hídrico, pero además es de bajo monto y localizada en un área reducida no logrando sobrepasar la capacidad de infiltración del suelo alrededor de los troncos, por lo tanto no produce escurrimiento superficial o si ocurre lo hace como evento puntual que se infiltrará rápidamente; entonces:

$$EFU - ETA_{efu} - P_{efu} \pm \Delta\theta_{efu} = 0$$

despejando:

$$EFU = ETA_{efu} + P_{efu} \pm \Delta\theta_{efu} \quad (13)$$

donde:

ETA_{efu} = evapotranspiración actual del agua de escurrimiento de fuste (mm)

P_{efu} = percolación del agua de escurrimiento de fuste (mm)

$\Delta\theta_{efu}$ = diferencia de contenido de humedad del suelo radicular, atribuible al escurrimiento de fuste, entre dos mediciones (mm).

El goteo de copas (GC) también es precipitación y su expresión como ecuación de balance hídrico, es:

$$GC - ES_{gc} - ETA_{gc} - P_{gc} \pm \Delta\theta_{gc} = 0$$

despejando:

$$GC = ES_{gc} + ETA_{gc} + P_{gc} \pm \Delta\theta_{gc} \quad (14)$$

donde:

ES_{gc} = escurrimiento del agua del goteo de copas (mm)

ETA_{gc} = evapotranspiración actual del agua de goteo de copas (mm)

P_{gc} = percolación del agua de goteo de copas (mm)

$\Delta\theta_{gc}$ = diferencia de contenido de humedad del suelo radicular, atribuible al goteo de copas, entre dos mediciones (mm).

Reemplazando (13) y (14) en (12), tenemos:

$$PP - (INTE + ETA_{cfu} + P_{cfu} \pm \Delta\theta_{cfu} + ES_{gc} + ETA_{gc} + P_{gc} \pm \Delta\theta_{gc}) - (ES_{nint} + ETA_{nint} + P_{nint} \pm \Delta\theta_{cfu}) = 0,$$

despejando:

$$PP - INTE - ETA_{cfu} - P_{cfu} \pm \Delta\theta_{cfu} - ES_{gc} - ETA_{gc} - P_{gc} \pm \Delta\theta_{gc} - ES_{nint} - ETA_{nint} - P_{nint} \pm \Delta\theta_{nint} = 0$$

ordenando los factores de la ecuación y agrupando, tenemos:

$$PP - INTE - (ETA_{cfu} + ETA_{gc} + ETA_{nint}) - (ES_{gc} + ES_{nint}) - (P_{cfu} + P_{gc} + P_{nint}) \pm \Delta\theta_{cfu} \pm \Delta\theta_{gc} \pm \Delta\theta_{nint} = 0 \quad (15)$$

pero:

$$ETA_{cfu} + ETA_{gc} + ETA_{nint} = ETA \quad (16)$$

Porque matemáticamente el agua extraída del suelo por los árboles mediante evapotranspiración (ETA), es la sumatoria de las evapotranspiraciones parciales de las aguas infiltradas que aportaron el escurrimiento de fuste, el goteo de copas y la precipitación no interceptada.

Asimismo:

$$ES_{gc} + ES_{nint} = ES \quad (17)$$

Porque el escurrimiento superficial (ES) es la sumatoria de los escurrimientos parciales de las aguas que aportaron el goteo de copas y la precipitación no interceptada (el escurrimiento de fuste no produce escurrimiento superficial).

También:

$$P_{cfu} + P_{gc} + P_{nint} = P \quad (18)$$

Porque la percolación a los horizontes inferiores (P) es la sumatoria de las percolaciones parciales de las aguas infiltradas que aportaron el escurrimiento de fuste, el goteo de copas y la precipitación no interceptada,

y

$$\Delta\theta_{cfu} + \Delta\theta_{gc} + \Delta\theta_{nint} = \Delta\theta \quad (19)$$

Similar a la explicación anterior.

Reemplazando (16), (17), (18) y (19) en (15), tenemos la ecuación de balance hídrico para bosques:

$$PP - INTE - ETA - ES - P \pm \Delta\theta = 0 \quad (20)$$

La precipitación que cae sobre el dosel de copas de un bosque sin sotobosque o muy reducido, sigue cuatro grandes caminos, una parte es interceptada por el dosel y evaporada a la atmósfera, otra es evapotranspirada a través de las hojas y tejidos verdes, desde el suelo radicular siguiendo el camino vascular de los troncos y también desde la propia superficie del suelo extraída por la escasa demanda atmosférica al interior del bosque, otra escurre por la superficie del suelo, otra percola bajo el horizonte radicular y parte permanece en el horizonte radicular en cantidades que variarán según sea el lapso de tiempo considerado. La ecuación de balance hídrico para bosque tiene sólo una

incógnita, la interceptación evaporada (INTE), de manera que se puede obtener una estimación de ella valorizando los demás parámetros.

PP es la precipitación fuera del bosque o precipitación propiamente tal. Para efectos de la evaluación de la ecuación, se pueden usar los registros pluviométricos de la estación meteorológica más cercana al bosque y que además esté dentro de la isoyeta, o el registro de un pluviómetro instalado en un área despejada alejada al bosque.

La evapotranspiración actual (ETA) y el escurrimiento (ES) se obtienen según la metodología detallada anteriormente y $\Delta\theta$ se obtiene por simulación de la variación diaria del contenido de humedad del suelo radicular.

INTE se estima deduciéndola de la ecuación de balance hídrico para bosque:

$$INTE = PP - ETA - ES - P \pm \Delta\theta.$$

La ecuación de balance hídrico para bosque puede no representar todos los movimientos del agua en el ambiente. Si todos los factores se pudieran medir experimentalmente con precisión y exactitud en forma independiente unos de otros, puede no resultar igual a cero, debido a caminos no conocidos que el agua puede seguir dentro de un bosque.

Por ejemplo, es posible que parte del agua del escurrimiento de fuste entre a través de la corteza hasta el xilema y sea transpirada, lo mismo puede ocurrir en ramillas y ramas e incluso hojas. También puede haber evaporación de goteo de copas y precipitación no interceptada que sea atrapada por los troncos.

Sin embargo estas anomalías, por significativas que sean, no alterarán los valores de las variables estimadas de la ecuación hasta hacerla distinta de cero porque el escurrimiento, la evapotranspiración y la variación de humedad del suelo radicular son expresiones finales del movimiento de agua en el bosque y sus valores, en una temporada completa de lluvias, compensa todas las anomalías existentes.

Por otra parte, si hubiera una subestimación de alguna variable estimada o registrada, redundaría en una sobreestimación del valor de la interceptación evaporada, porque ésta se deduce de las otras.

Viceversa, si se sobreestima ETA, ES o $\Delta\theta$, incluso en presencia de PP correctamente registrado, entonces INTE será subestimada para que la ecuación cumpla con la condición de igualdad a cero. La ecuación de balance hídrico al interior del bosque es una ecuación de primer grado del

tipo $ax + by + cz = 0$, tal que si se mantiene constante la variable x , un aumento de y implica una disminución de z .

En definitiva, los errores que se cometan en la estimación o registro de ETA, ES, θ y PP, o por anomalías no detectadas en el camino del agua en el bosque, afectarán el valor de INTE y la ecuación mantendrá la igualdad a cero.

Con todo, hay una garantía que ETA deberá estar bien estimada si la variación de humedad del suelo radicular cumple con el principio de igualdad en el mínimo contenido de humedad.

La evapotranspiración en bosques es un proceso anómalo desde el punto de vista del desarrollo histórico del estudio de la evapotranspiración vegetal. Las ciencias agronómicas abordaron el estudio de la evapotranspiración, a principios de siglo, para mejorar el manejo productivo de los cultivos alimenticios, que son sistemas simples de evapotranspiración, donde las variables de la ecuación de balance hídrico actúan en un universo definido.

En ecosistemas de bosque, el dosel de copas genera un ambiente distinto bajo él. La precipitación recorre climas distintos en el proceso de completar el ciclo, y el poder evaporante de la atmósfera que representa la ETP de los estudios agronómicos se hace cercano a 0 al interior del bosque.

El movimiento del agua en ambiente de bosque puede representarse gráficamente en la extracción de agua de un acuífero mediante una bomba a través de un pozo piezométrico, en que la humedad del suelo del bosque correspondería al acuífero recluso, el dosel de copas a la estrata impermeable que mantiene recluso el acuífero, los troncos de los árboles a los pozos piezométricos y la bomba extractora a la transpiración a través de las hojas,

donde el poder evaporante de la atmósfera ejerce su mayor efecto.

La validación de esta metodología permitirá estimar el monto de agua que se vaporiza de un ambiente de bosque, el que puede ser extraordinariamente alto. Quizás los bosques no transpiren cantidades de agua significativamente mayores que una pradera natural, pero el agua evaporada de la intercepción de las copas puede ser tan alta que la originada en las selvas lluviosas del mundo sea un factor determinante del clima global.

BIBLIOGRAFIA

- BLACK, C. A. 1965. Method of soil analysis. Madison. Wisconsin. U. S. A. American Society of Agronomy, v 2. 1572 p.
- DELFT, J. 1965. Interception and stemflow in stand of Norway Spruce and Beech in West Germany. International Symposium on Forest Hydrology, pp 175-179.
- DOORENBOS, J., W. O. PRUITT. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Paper 24. FAO. 179 p.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1962. Range Research; basic problems and techniques. Washington D. C. National Research Council. Publication and techniques 890. p.:139-147.
- NOVOA, P., P. SEPULVEDA. 1996. Estimación de la variación diaria del agua del suelo, escurrimiento superficial e infiltración, mediante el uso del modelo computacional HIDROSUELO. Agricultura Técnica, 56 (3): 141-154.
- PASCALE, A. J. 1972. Methods of computing the water balance. Barbados. N° 310. In agricultural meteorology proceedings of the WMO seminar on agricultural. 25 p.
- SLATYER, R. O. 1968. The use of soil water balance relationships, in agroclimatology. In: Agroclimatology Methods. Proceedings of the readings symposium. Natural Resources Research III. UNESCO, p. 15-26.
- VASQUEZ, S. 1983. Características del ciclo hidrológico en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. con distinto manejo. Tesis, Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile, Valdivia, 101 p.