

VALIDACION DEL MODELADO BAYESIANO DE LLUVIAS APLICADO A BALANCES HIDRICOS PARA ESTIMAR RECARGAS SUBTERRÁNEAS

Zimmermann, Erik⁽¹⁾⁽²⁾ y Airasca, María Fernanda⁽²⁾

(1) CONICET - (2) Centro Univ. Rosario de Invest. Hidroambientales, Fac. Cs.Ex, Ing. y Agrim., UNR. Riobamba 245 bis (2000) Rosario. TeleFax: +54-341-4808541, erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

El balance de Thornthwaite y Mather constituye una herramienta simple aplicada con frecuencia para estimar excedentes hídricos que no son almacenados en el perfil del suelo. Combinándolo con el método empírico del CN (USDA-SCS, 1986), el cual se aplica a lluvias diarias, permite estimar el escurrimiento y de esta forma, mediante diferencias entre excedentes y escurrimientos, calcular la infiltración neta que podría recargar un acuífero freático. Para aplicar ambos métodos en forma seriada (durante una secuencia de años) es necesario predecir el número de eventos lluviosos mensuales (N) y las láminas precipitadas por evento (Pn) cuando la información disponible está agregada mensualmente. Para ello, se propuso una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar N condicionando el pronóstico a la lluvia mensual junto a una distribución probabilística exponencial para generar las Pn, la cual fue validada en estaciones de la región meridional de Santa Fe, obteniendo resultados muy satisfactorios. En este trabajo, las estimaciones de las recargas subterráneas anuales obtenidas por balance hídrico se comparan con estimaciones realizadas mediante variaciones de niveles freáticos, en la estación INTA Rafaela y Agroexperimental de Zavalla (UNR). En ambos casos, las recargas media anuales estimadas por ambos métodos difieren en un 1 % y sus desvíos estándares entre 3% y 22%, para series entre 20 y 28 años de datos.

PALABRAS CLAVE: Recarga freática, balance hídrico, aproximación bayesiana

ABSTRACT

The Thornthwaite and Mather water budget is a simple and frequently applicable tool to estimate surpluses of water, which are not stored in the soil profile. Combining it with the empiric CN-method of the US Soil Conservation Service (USDA-SCS), which is applied to daily rainfall records, it is possible to estimate the runoff, and this way, from the difference between surpluses and runoff, to estimate the net infiltration that would recharge a phreatic aquifer. In order to apply both methods during a sequence of years it is necessary to predict the number of rain events per month (N) and the rainfall depth for each event (Pn) when monthly data are available. Consequently, a methodology based on the Bayes's theorem to estimate N conditioning the forecast to the monthly rainfall, joined to an exponential distribution to generate Pn knowing the monthly rainfall was proposed. These methods were checked satisfactorily with data rainfall of stations placed in the southern of Santa Fe province. In this work, the estimations of annual groundwater recharges obtained by water budget are compared with estimations carried out by water-level fluctuations in the INTA Rafaela station and Zavalla station (UNR). In both cases, mean annual recharges estimated by both methods have a difference of 1%, and its standard deviations ranged from 3% to 22%, for data serie ranged from 20 to 28 years.

KEY WORDS: phreatic recharge, water-balance, bayesian approach

INTRODUCCION

En la mayoría de las situaciones, la información disponible para estimar valores de recarga en acuíferos freáticos es escasa, lo cual impide la aplicación de métodos directos de evaluación (ej. análisis de fluctuaciones de niveles freáticos, balances hídricos localizados, técnicas isotópicas, etc.). Es aquí donde cobran relevancia las metodologías sencillas que insumen información frecuentemente disponible.

El método de balance hídrico de Thornthwaite, que requiere datos de temperaturas y precipitaciones medias mensuales, es un ejemplo de ello. El método puede utilizarse para estimar la infiltración neta, la cual se corresponde aproximadamente con el total de la recarga subterránea. La metodología de Thornthwaite y Mather contempla la estimación de la evapotranspiración mensual y el escurrimiento superficial mensual puede estimarse aplicando el método de la curva número del Servicio de Conservación de Suelos (USDA-SCS, 1986). Existen antecedentes previos de aplicación conjunta de ambos métodos, dando lugar al balance modificado de Thornthwaite-Mather (Scozzafava y Tallini, 2001).

El balance hídrico mensual de Thornthwaite puede aplicarse en condiciones medias (balance medio anual) como así también en forma de balances seriados, utilizando información mensual secuencial a lo largo de una serie de años. Esta última forma de aplicarse permite una estimación seriada de las variables del balance en las serie de años analizada y de sus desviaciones respecto a los valores medios, lo cual es muy importante a la hora de pronosticar evoluciones en el tiempo.

En la aplicación del balance modificado en forma seriada, considerando que la metodología de la curva número se aplica a eventos aislados y no a láminas de lluvia mensual, se requiere de la siguiente información: (a) el número de eventos lluviosos ocurridos en cada mes y (b) la lámina precipitada en cada uno de ellos. Dado que esta información con frecuencia es difícil de obtener se propuso, en primera instancia y para resolver el apartado (a) anterior, una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar el número de ocurrencias de eventos lluviosos condicionado a la lámina de lluvia mensual (Zimmermann, 2003a) y en segundo lugar, para resolver el apartado (b) una función de densidad de probabilidad para la lámina de lluvia de un evento simple considerando el número de eventos lluviosos pronosticados para el mes (Zimmermann, 2003b).

En este trabajo, con el propósito de validar la metodología basada en el balance hídrico modificado, se aplica la misma a la información climática de una estación INTA (Instituto Nacional de Técnicas Agropecuarias) localizada en Rafaela y una estación agroexperimental operada por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, ubicada en la localidad de Zavalla. Ambas estaciones están emplazadas en la provincia de Santa Fe, Argentina. En ambos casos, los resultados de los balances se comparan con las recargas estimadas mediante el método de fluctuaciones de niveles freáticos.

BALANCE HÍDRICO MENSUAL SERIADO PARA ESTIMAR LA INFILTRACION NETA

Scozzafava y Tallini (2001) propusieron un cambio al método de Thornthwaite y Mather para determinar la contribución exclusiva de la infiltración neta, resultado que no puede lograrse con el método estándar. Allí, el sobrante de agua se refiere a todo el exceso de agua que no tiene por destino la humedad del suelo, sin distinguir la infiltración neta del escurrimiento superficial. Para diferenciar las dos contribuciones, los autores, propusieron estimar el escurrimiento mensual (Q) con el método de SCS-CN. El valor de Q así estimado se sustrae a la lluvia total (P) y el balance de agua se computa en base a un valor de lluvia ficticia (PF) que es igual a $P - Q$. La PF es la cantidad de agua disponible para la infiltración neta y para

la evapotranspiración real. De esta manera, las ecuaciones originales del balance y el cálculo de los excedentes son válidos para estimar la infiltración neta, cuando Q ya se ha sustraído. El planteo del balance analizado por los autores corresponde a condiciones medias para una serie de años, aquí será aplicado en forma secuencial para una serie de años.

El método del SCS-CN emplea un parámetro entero (CN) cuya variación tiene en cuenta varios factores, incluyendo el tipo de suelo (espesor, textura, estructura, etc.), uso de la tierra, condición de humedad antecedente y pendiente. En el método se propone una fórmula de base empírica asociada al CN y contrastada con mediciones en parcelas experimentales, que permite cuantificar la máxima capacidad de almacenamiento instantáneo de humedad (S) que tiene el complejo suelo-vegetación durante un evento de precipitación dado. El escurrimiento (Q_n) para el evento considerado se calcula mediante expresiones empíricas que relacionan la capacidad S y la precipitación acumulada durante el mismo (P_n). Dado que el procedimiento de Thornthwaite utiliza como datos disponibles valores mensuales, para estimar el escurrimiento mensual Q ($Q = \sum Q_n$) es necesario conocer el número de días lluviosos por mes y la lámina de lluvia por cada evento.

APROXIMACIÓN BAYESIANA PARA LA ESTIMACION DEL NUMERO MENSUAL DE OCURRENCIAS DE EVENTOS LLUVIOSOS.

Se supone que se cuenta con valores de precipitación mensual, P, y un número al azar de eventos de lluvia N, en el mes considerado. También se suponen conocidas la probabilidad a priori del número de eventos para el mes dado $f(N)$. Al respecto, se podría adoptar una función de distribución de probabilidad para N, ajustada para cada mes de año. Se considera que el pronóstico mejoraría si se utiliza la precipitación mensual P como información adicional para estimar N.

Suponemos conocida la densidad de probabilidad condicional $f(P|N)$ correspondiente al monto de lluvia mensual asociado al número de eventos N. Entonces, según el teorema de Bayes puede determinarse la probabilidad a posteriori, $f(N|P)$, de la siguiente manera:

$$f(N|P) = \frac{f(P|N)f(N)}{f(P)} \quad (1)$$

siendo $f(P)$ la probabilidad que la precipitación del mes dado sea P. Según el teorema de probabilidades totales, se tiene que:

$$f(P) = \sum_{j=1}^{N_{\max}} f(P|N_j)f(N_j) \quad (2)$$

donde N_{\max} es un número del máximo de eventos posible durante un mes que se analiza. Proponiendo una función de distribución de eventos de lluvia del tipo Poisson (Todorovic 1967) con parámetro λ_1 , dado por el número medio de eventos, la función de la distribución de N puede escribirse de la siguiente manera:

$$f(N) = \frac{\lambda_1^N e^{-\lambda_1}}{N!} \quad (3)$$

Todorovic (1967, citado por Antigüedad et al., 1995) propuso una función de distribución acumulada para la precipitación total, P, producida por N tormentas mediante una distribución del tipo Gamma, de la cual puede extractarse por derivación la función de

densidad de probabilidad $f(P|N)$, según la siguiente formulación:

$$f(P|N) = \frac{\lambda_2^N e^{-\lambda_2 P} P^{N-1}}{(N-1)!} \quad (4)$$

El significado físico de λ_2 es la inversa de la lámina media de la precipitación producida por una sola tormenta. La misma puede estimarse como:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{P_m} \quad (5)$$

donde P_m es la lámina media mensual. Combinando las ecuaciones (1), (2), (3), y (4) la función de distribución de la probabilidad *a posteriori* puede determinarse mediante (Zimmermann, 2003a):

$$f(N|P) = \frac{\frac{\lambda_2^N e^{-\lambda_2 P} P^{N-1}}{(N-1)!} \frac{\lambda_1^N e^{-\lambda_1}}{N!}}{\sum_{j=1}^{N_{\max}} \frac{\lambda_2^{N_j} e^{-\lambda_2 P} P^{N_j-1}}{(N_j-1)!} \frac{\lambda_1^{N_j} e^{-\lambda_1}}{N_j!}} \quad (6)$$

siendo N_{\max} un número arbitrario que representa la máxima cantidad de días de lluvia posible.

Algoritmo para definir N óptimo condicionado a valores de P

1. Datos disponibles: Una serie de precipitaciones mensuales, P , y los valores de los promedios mensuales para los números de eventos de lluvia, N_m , y la respectiva lámina media mensual, P_m .
2. Asignar parámetros de las distribuciones probabilísticas: $\lambda_1 = N_m$ y λ_2 estimada con (5).
3. Calcular para cada año y cada mes valores de la probabilidad *a posteriori* $f(N|P)$ usando (6), donde N varía de 1 a N_{\max} .
4. Seleccionar un valor óptimo de N , N_{op} , para cada mes y año tal que $f(N_{op}|P)$ es la mayor de $f(N|P)$, con $N=1..N_{\max}$.

APROXIMACIÓN ESTADÍSTICA PARA ESTIMAR LAMINAS DE LLUVIA.

Estimado el número de ocurrencias mensuales de los eventos de lluvia fue necesario determinar la lámina precipitada en cada uno de ellos. Muchos autores sugieren distribuciones exponenciales para representar láminas de lluvia, tiempos entre eventos y duraciones (Eagleson, 1972; Arnaud y Lavabre, 1999). Seoane y Valdés (1994) proponen dos funciones bivariadas para la intensidad y la duración de los eventos usando densidades marginales exponenciales. En la región meridional de la provincia de Santa Fe, se ha podido demostrar que la distribución exponencial fue una de las más robustas para reproducir el conjunto de los estadísticos muestrales de las láminas de lluvia diaria (Zimmermann et al., 1996; Riccardi y Zimmermann, 2000). Esto también se verificó para agrupamientos mensuales, estacionales y anuales de las láminas diarias (Riccardi y Zimmermann, 2000). La distribución exponencial presenta, además, la ventaja de ofrecer simplicidad al ser un modelo de un solo parámetro y con una expresión explícita para la función de distribución de probabilidad inversa. La expresión correspondiente a la función de distribución acumulada exponencial para una lámina de lluvia P_n correspondiente a un evento simple del mes considerado es:

$$F(P_n) = 1 - e^{-\lambda_3 P_n} \quad (7)$$

donde $n = 1..N$. Conocido el valor de frecuencia acumulada puede generarse un valor de lámina de lluvia correspondiente, expresando (7) en función de P_n :

$$P_n = -\frac{1}{\lambda_3} \ln[1 - F(P_n)] \quad (8)$$

Además debe cumplirse que:

$$\sum_{n=1}^N P_n = P \quad (9)$$

Para la definición de $F(P_n)$ puede emplearse las fórmulas empíricas de frecuencias observadas para una muestra (posición de graficación según Chow et al., 1994). Estas formulaciones empíricas pueden ser representadas por una expresión general como la siguiente:

$$F(P_n) = \frac{n - b}{N + 1 - 2b} \quad (10)$$

donde n es el número de orden de la muestra ordenada en forma creciente, N es el número de ocurrencias eventos lluviosos en el mes considerado y b es un parámetro que fluctúa entre 0 y 0,5. Aquí se ha adoptado la formulación empíricas extremas de Hazen porque presentó la mejor adaptación a un conjunto de 5.600 tormentas regionales de la provincia de Santa Fe, pronosticando láminas de lluvia que guardaban una buena correlación con las láminas observadas mediante un coeficiente de determinación superior a 0,82 en la mayoría de los casos (Zimmermann, 2003b). Para el caso de la formulación de Hazen donde $b = 0,5$, reemplazando (10) en (8) y aplicando en (9) se llega a que:

$$P = -\frac{1}{\lambda_3} \ln\left[\frac{N - 0.5}{N}\right] - \frac{1}{\lambda_3} \ln\left[\frac{N - 1.5}{N}\right] - \dots - \frac{1}{\lambda_3} \ln\left[\frac{1.5}{N}\right] - \frac{1}{\lambda_3} \ln\left[\frac{0.5}{N}\right] \quad (11)$$

Resolviendo para el parámetro λ_3 se tiene que:

$$\lambda_3 = -\frac{\sum_{n=1}^N \ln\left(\frac{N - n + 0.5}{N}\right)}{P} \quad (12)$$

Algoritmo para definir N láminas de eventos de lluvia.

1. Datos disponibles: La precipitación mensual, P , y el número de eventos lluviosos para el mes considerado, N .
2. Calcular el parámetro λ_3 con (12)
3. Generar N láminas de lluvia aplicando conjuntamente las ecuaciones (8) y (10), donde n varía en el intervalo $[1..N]$ y b se define según la formulación empírica empleada.

VALIDACION DEL MODELO DE GENERACION DE EVENTOS LLUVIOSOS

La disponibilidad de información pluviométrica en la región de estudio permitió el contraste de la metodología propuesta con los registros de láminas diarias de eventos de lluvia, a lo largo de una serie de años y en diferentes estaciones de medición. Se seleccionaron cuatro

estaciones de un conjunto de veinte, las que presentan períodos de registros superiores a 50 años, buena cobertura geográfica de la región y de buena calidad de la información, totalizando alrededor de 7.600 eventos de lluvia. Los coeficientes de correlación obtenidos para la generación de número de eventos lluviosos, contrastando éstos con los observados mediante regresión lineal simple, oscilaron entre 0,67 y 0,81. Respecto al pronóstico de láminas de lluvia, las estimadas aplicando el algoritmo propuesto a las series mensuales de precipitación de cada estación y considerando el número de eventos N observado, se aproximaron en gran medida a las observadas, y la tendencia media de los pronósticos fue muy satisfactoria. Los coeficientes de correlación obtenidos para la generación de láminas de eventos lluviosos, contrastando éstos con las observadas mediante regresión lineal simple, oscilaron entre 0,90 y 0,91.

La utilidad final de la metodología se evaluó mediante comparación de las láminas de escurrimiento mensual estimadas utilizando las precipitaciones observadas y las pronosticadas con los algoritmos para generar número de ocurrencias de lluvia y las láminas de los eventos de precipitación. Para cumplir con este propósito se estimaron escurrimientos por eventos aplicando el método del USDA-SCS a los registros observados de precipitaciones y a los eventos generados sintéticamente mediante la aplicación conjunta de los algoritmos para estimar N y láminas de lluvia. Los coeficientes de correlación obtenidos mediante regresión lineal simple, oscilaron entre 0,89 y 0,93. A manera de ejemplo se muestra los escurrimientos generados a partir de lluvias observadas (en abcisas) y lluvias generadas sintéticamente (en ordenadas) para la estación de Santa Teresa. El valor del parámetro CN considerado fue de 78, representativo de condiciones medias de suelos, cobertura y humedad en la región. Puede observarse que la congruencia entre las rectas ajustadas a las estimaciones (líneas de trazo) y las líneas de coincidencia indican que la tendencia media de los pronósticos es satisfactoria.

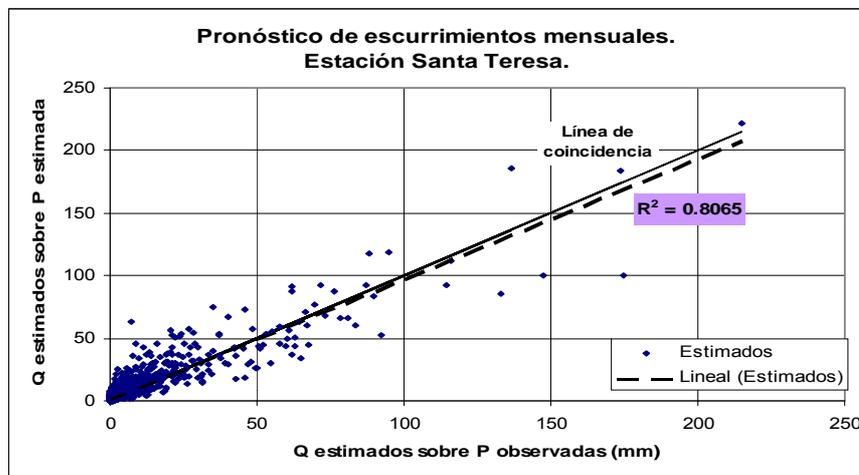


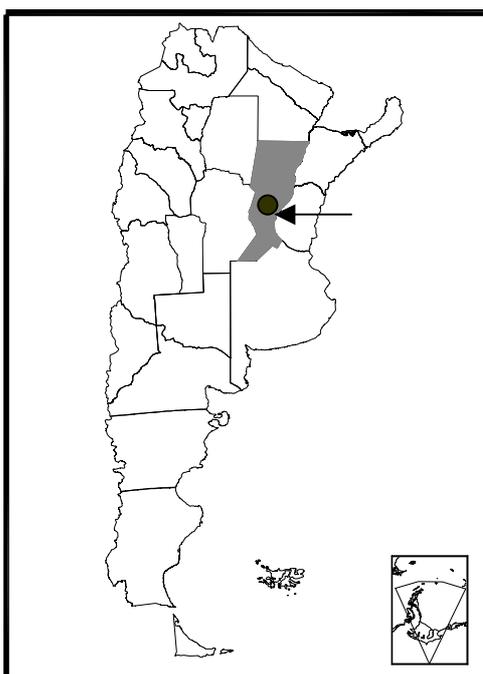
Figura 1. Pronóstico de escurrimientos. Est. S. Teresa

VALIDACION DEL PROCEDIMIENTO DE BALANCE PARA ESTIMAR RECARGAS

Comprobado que el modelo bayesiano permite estimar indirectamente láminas de escurrimiento mensual de manera satisfactoria, una segunda instancia de validación consistió en la comparación de la infiltración neta estimada por balance modificado de Thornthwaite y otra metodología diferente para estimar recargas directas, optándose por el método de fluctuaciones de nivel freático debido a que se contaba con registros de niveles en dos estaciones de medición ubicadas en la región: la estación INTA de Rafaela y la estación agrometeorológica de Zavalla (dependiente de Universidad Nacional de Rosario).

Validación con registros de INTA Rafaela

El balance modificado de Thornthwaite y Mather se aplicó a los registros climáticos de la estación INTA Rafaela (Fig. 2) comparándolo con la estimación de la recarga a través de las fluctuaciones del nivel freático registradas por medio de 20 años de datos diarios para registros freaticométricos en la estación (Venencio y Varni, 2003). El nivel freático fluctuó entre la superficie del terreno y los 7 m de profundidad. La localidad está ubicada en la llanura chaco-pampeana, de clima templado húmedo, caracterizada por un relieve de baja pendiente topográfica. En el perfil del suelo de Rafaela, incluyendo el horizonte C, predomina la fracción limosa en un 65 % con respecto a un 32 % de la arcilla. El resto lo cubre la fracción arenosa. Las principales unidades estratigráficas que se encuentran en el



área estudio están representadas por sedimentos de diferentes edades y ambientes de sedimentación, que son de amplia difusión en un gran sector de la llanura Chaco Pampeana. En la parte superior del paquete sedimentario se encuentran los limos de la Formación Pampeano, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis es del orden de los 70 metros. Para la aplicación del balance se relevó información pluviométrica de la estación para la serie 1982-2001, contando con una serie de precipitaciones mensuales, P . La misma fue procesada determinando las precipitaciones medias mensuales del período, P_m y los valores de los promedios mensuales para los números de eventos de lluvia, N_m . En este caso se contaba con las láminas diarias de lluvia, lo que permitió obtener los promedios últimos en forma directa. En caso de no contar con dicha información los valores de N_m deberán obtenerse de estadísticas de dicha estación o bien de estaciones de la región.

Figura 2. Localidad de Rafaela en la Provincia de Santa Fe.

Paralelamente se relevó información de temperaturas medias mensuales para cada mes de la serie 1982-2001, permitiendo la estimación de la evapotranspiración mensual aplicando la metodología de Thornthwaite, y de esta manera resolver el balance hídrico. Se estimó un número de curva CN de 70 en función del tipo de cobertura del suelo y un estado de humedad medio en el período. La capacidad de almacenamiento del perfil de suelo fue estimada en 150 mm para la capacidad de campo y de 53 mm para el punto de marchitez permanente. Consecuentemente, aplicando el balance hídrico modificado se estimó la infiltración neta mensual asimilable a la recarga freática. Los valores mensuales se acumularon anualmente para ser comparativos con las recargas estimadas y publicadas por Venencio y Varni (2003). Estos autores adoptaron el método de la fluctuación del nivel freático para estimar las recargas freáticas en el área de estudio y en este trabajo se tomaron las estimaciones para las comparaciones. Según este método, se asume que el agua que llega al nivel freático pasa a integrar el almacenamiento subterráneo y es considerada recarga, independientemente que vaya a integrar el flujo subterráneo regional o no, por lo que el valor que se halle constituye un valor de recarga puntual que puede ser mayor o igual que la recarga al flujo subterráneo regional. Los autores realizaron un análisis minucioso del comportamiento del nivel freático frente a eventos de precipitación a nivel diario, a fin de poder discriminar aquellos ascensos manifestados por la recarga natural que llega al acuífero. Asumiendo esta premisa, la recarga es directamente proporcional al almacenamiento específico y a la variación del nivel freático en un tiempo dado. Los

ascensos de nivel para las series se obtuvieron restando al nivel del pico del hidrograma, el último nivel registrado previo al inicio del ascenso. A través de la representación gráfica de los ascensos de nivel respecto a las precipitaciones que los generaron, se obtuvo un almacenamiento específico del 7.3 %. Se observó que los valores medios y los desvíos estándares para ambas metodologías se asemejaron claramente. Se desprende que en términos generales un 14% de la precipitación se transforma en la recarga freática. La Figura 3 muestra la aproximación de los valores de recarga mediante ambas metodologías.

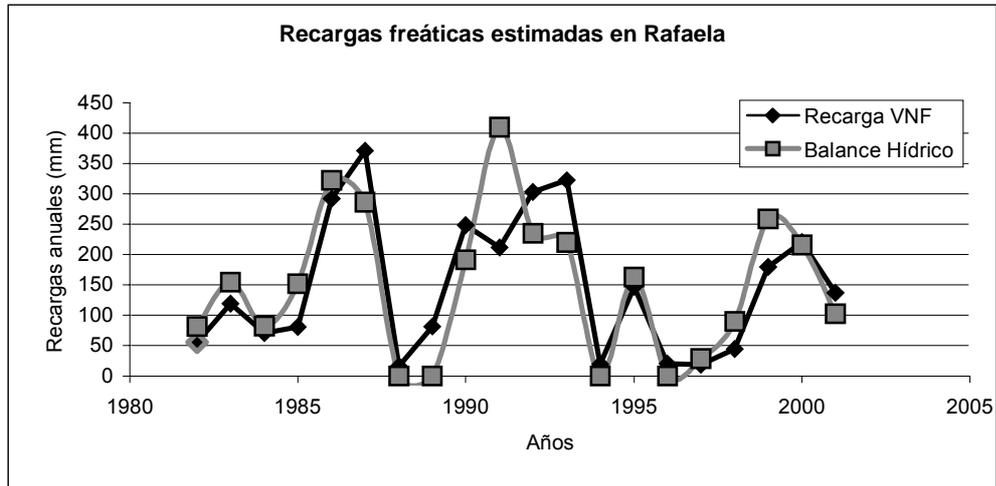
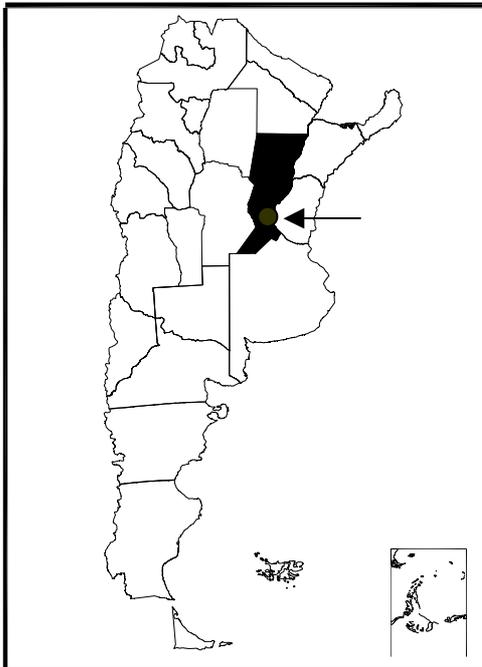


Figura 3. Recargas freáticas estimadas mediante balance y variaciones del nivel freático

Validación con registros de Estación Agroexperimental de Zavalla



El balance modificado de Thornthwaite y Mather se aplicó a los registros climáticos de la estación agroexperimental de Zavalla (Fig. 4), operada por personal de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, comparándolo con la estimación de la recarga a través de las fluctuaciones del nivel freático registradas a lo largo de 28 años de datos diarios para registros freatimétricos en la estación (Airasca y Zimmermann, 2004, comunicación personal). El nivel freático fluctuó entre los 3,50 m y los 8,50 m de profundidad. La localidad está ubicada en la llanura chaco-pampeana, de clima templado húmedo, caracterizada por un relieve de moderada pendiente topográfica. Cuando las condiciones físicas del sistema lo admiten, la recarga en tránsito puede llegar al nivel freático manifestándose con ascensos del nivel freático.

Figura 4. Localidad de Zavalla en la Provincia de Santa Fe.

El módulo pluviométrico es de 1007 mm (Serie 1973-2003) y la temperatura media anual es de 17,1 °C (Serie 1973-2003). En el perfil del suelo, incluyendo el horizonte C, predomina la fracción limosa en un 70 % con respecto a un 26 % de la arcilla. El resto lo cubre la fracción arenosa. Las principales unidades estratigráficas que se encuentran en el área estudio son las mismas que están representadas en Rafaela. En la parte superior del

paquete sedimentario se encuentran los limos de la Formación Pampeano, integrada por limos y arcillas de colores castaños. El espesor en el sector de análisis es del orden de los 30 metros. Para la aplicación del balance se relevó información pluviométrica de la estación para la serie 1973-2000, contando con una serie de precipitaciones mensuales, P. La misma fue procesada determinando las precipitaciones medias mensuales del período, P_m , y los valores de los promedios mensuales para los números de eventos de lluvia, N_m . En este caso se contaba con las láminas diarias de lluvia, lo que permitió obtener los promedios últimos en forma directa. Paralelamente se relevó información de temperaturas medias mensuales para cada mes de la serie 1973-2000, permitiendo la estimación de la evapotranspiración mensual aplicando la metodología de Thornthwaite, y de esta manera resolver el balance hídrico. Se estimó un número de curva CN de 80 en función del tipo de cobertura del suelo y un estado de humedad medio en el período. La capacidad de almacenamiento del perfil de suelo fue estimada en 200 mm para la capacidad de campo y de 70 mm para el punto de marchitez permanente. Consecuentemente, aplicando el balance hídrico modificado se estimó la infiltración neta mensual asimilable a la recarga freática. Los valores mensuales se acumularon anualmente para ser comparativos con las recargas estimadas aplicando el método de fluctuaciones de niveles freáticos a los registros de la estación (Airasca y Zimmermann, 2004, comunicación personal). Se consideró un almacenamiento específico del 4,5 %, valor que fuera ajustado mediante modelación numérica del flujo subterráneo (Zimmermann, 2003c). Se observa que los valores medios y los desvíos estándares para ambas metodologías se asemejan claramente. Se desprende que en términos generales un 4,5% de la precipitación se transforma en la recarga directa. La Figura 5 muestra la aproximación de los valores de recarga mediante ambas metodologías.

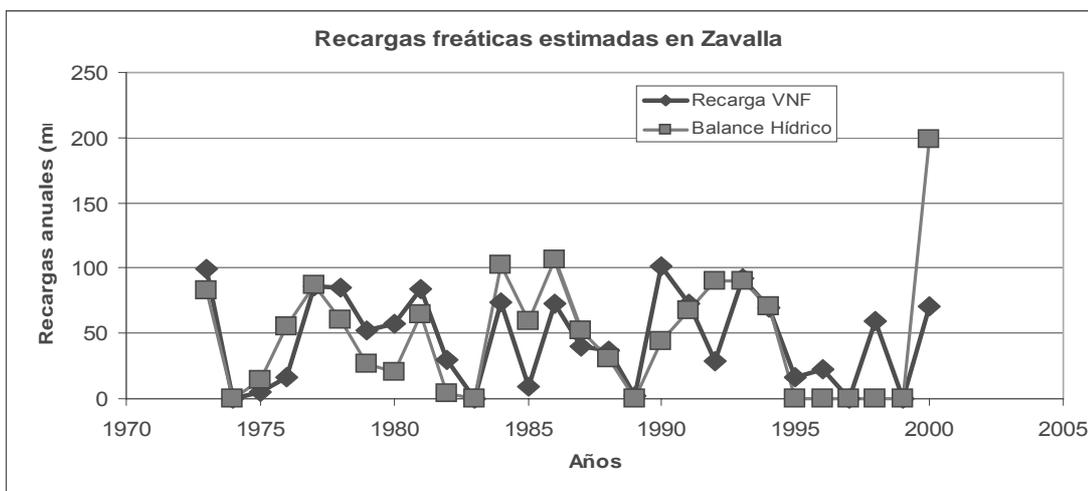


Figura 5. Recargas freáticas estimadas mediante balance y variaciones del nivel freático

CONCLUSIONES

El balance hídrico mensual de Thornthwaite y Mather, aplicado conjuntamente con el método empírico del USDA-SCS, permite estimar la infiltración neta, la que puede asimilarse a la recarga que alimentaría un acuífero freático. Para aplicarse el método del USDA-SCS en forma seriada durante una secuencia de años es necesario conocer el número de ocurrencias de eventos lluviosos, N, en cada mes considerado y las láminas de lluvia para cada evento, información que frecuentemente no está disponible.

Se propuso una metodología basada en el teorema de Bayes para estimar N condicionando el pronóstico a la lámina mensual. Conjuntamente se propone una distribución probabilística exponencial que permite generar láminas de lluvia conociendo la

lámina acumulada mensual. La metodología propuesta fue validada en estaciones de la región meridional de Santa Fe. Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios al compararse más de 7600 pronósticos de ocurrencias lluviosas y láminas de lluvia con los registros observados. Las metodologías propuestas para generar número de ocurrencias y láminas de lluvias permiten: (a) la correcta aplicación del balance de Thornthwaite y Mather junto con el método del USDA-SCS y (b) un buen pronóstico de escurrimientos mensuales y de la infiltración neta asimilable a la recarga directa del acuífero.

El balance modificado de Thornthwaite y Mather permitió estimar infiltraciones netas las que fueron validadas con estimaciones de las recargas obtenidas mediante el método de fluctuaciones de nivel freático en las estaciones de INTA Rafaela y Zavalla (UNR). Los resultados alcanzados son satisfactorios, ya que los promedios, desvíos estándares y secuencias de valores acumulados anuales son apreciablemente semejantes.

REFERENCIAS

- Antigüedad I, García Muñiz J, and Llamas J.** (1995) A mathematical model for precipitation in the Basque Country, Spain. *Hydrological Sciences Journal*. **40** (3). 291-301. IAHS Press. Wallingford. UK.
- Arnaud P. and Lavabre J.** (1999) Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal*. **44** (3). 433-445. IAHS Press. Wallingford. UK.
- Chow VT, Maidment D. and Mays L.** (1994) Hidrología Aplicada; Edit Mc Graw-Hill Interamericana SA; ISBN 0-07-010810-2; Colombia.
- Eagleson, P. S.** (1972) Dynamics of floods frequency. *Water Resources Research*. **8** (4), 878-898.
- Riccardi G y Zimmermann E.** (2000) Modelo Probabilístico de tormentas puntuales aplicado a Rosario Aero (Santa Fe, Argentina). XVIII Congreso Nacional del Agua. Termas de Río Hondo, Argentina.
- Scozzafava M. and Tallini M.** (2001) Net Infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology Journal*. **9** (5). 461-475. Springer-Verlag. Germany.
- Seoane R. y Valdés J.** (1994) Desarrollo de una función de distribución derivada para la estimación de caudales extremos en cuencas con datos escasos. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. IARH. Chile. 193-204.
- Thornthwaite CW, Mather JR** (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, 5th printing. Vol 10 N° 3, CW Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Elmer, NJ, USA.
- Todorovic P.** (1967) Applied probability course notes. Fort Collins, Colorado, USA.
- USDA-SCS** (1986) National engineering handbook, sect 4, hydrology. US Department of Agriculture-Soil Conservation Service, Washington, DC, USA.
- Venencio MV, Varni M.** (2003) Estimación de la recarga y del almacenamiento específico a través del análisis de registros de nivel freático. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea. Rosario. Argentina, Vol. 1: 153-160.
- Zimmermann E, Navarro R. y Silber M.** (1996), Un modelo probabilístico para la generación de tormentas sintéticas. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR-LAD, Guayaquil, Ecuador.
- Zimmermann E. (2003a)** Aproximación Bayesiana Para La Estimación De Ocurrencias De Lluvia Aplicada A Balances Hidricos Mensuales Seriadados. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea. Rosario. Argentina, Vol. 1: 1-10. ISBN 950-673-395-3.
- Zimmermann E. (2003b)** Aproximación Estadística Para Estimar Láminas De Lluvia Aplicada A Balances Hidricos Mensuales Seriadados. III Congreso Argentino de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales en Hidrología Subterránea. Rosario. Argentina, Vol. 1: 11-20. ISBN 950-673-395-3.
- Zimmermann E.** (2003c) Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. 2. Estrategias para la calibración. Boletín Geológico y Minero. Vol 114. No 2: 159-169. Madrid. España.
- Zimmermann E.** (2003d) Aproximación Bayesiana Para La Estimación De Ocurrencias De Eventos Lluviosos Aplicada A Balances Hidricos Mensuales Seriadados. Cuadernos del CURIHAM. PHI-UNESCO. 8 (2).