

ELEMENTOS CLIMÁTICOS Y SU RELACIÓN CON LA FLUCTUACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

Climatic Elements and Their Relationship to Fluctuations in the Water Table

Pablo Miguel Coras-Merino¹

RESUMEN

Las inundaciones de los terrenos agrícolas, sean por avenidas, tormentas o sobreriego, ocasionan encharcamiento de la parte superior del suelo o elevación del nivel freático, lo cual repercute en la disminución o pérdida total de la producción agrícola, como consecuencia de la falta de aireación. El presente trabajo se realizó en el ex lago de Texcoco, estado de México; los datos mensuales utilizados fueron precipitación, evaporación y variación del nivel freático de 125 pozos de observación de tres años consecutivos. Para la definición de las unidades hidrológicas, se usó un método gráfico que consiste en el traslape de hidrogramas de pozos de observación y se corroboró con el coeficiente de correlación (r). Para cuantificar la relación de las variables climáticas y la variación de humedad en el suelo, estimada a partir de la relación precipitación-evapotranspiración real, con las fluctuaciones del nivel freático, se agruparon en diferentes formas y se obtuvo su coeficiente de correlación (r) para cada una de éstas. Se definieron cinco unidades hidrológicas; se utilizó, para fines del estudio, la designada con "A". El periodo crítico de exceso de agua superficial o subsuperficial fue de "agosto a noviembre". La variable ΔS fue la que presenta mayor correlación con la variación del nivel freático ($r = -0.61$).

Palabras clave: precipitación, evaporación, manto freático.

SUMMARY

Flooding of agricultural land, because of torrents of water, storms, or over-irrigating, causes water to pool on the soil surface and/or to raise the water table. This can have repercussions in the reduction or total loss of

¹ Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México. (mpcoras@correo.chapingo.mx)

farm production as a consequence of the lack of aeration. This study was conducted on the exposed bed of ex-Lake Texcoco, state of Mexico. The data collected monthly were precipitation, evaporation, and variation in the water table of 125 observation wells over three consecutive years. For the definition of hydrological units, a graphic method was used and corroborated statistically (r). To quantify the relationship of climatic variables and the variation in soil moisture estimated from actual precipitation-evapotranspiration data to the fluctuations in the water table, the data were grouped in different ways, and the correlation coefficient (r) for each of these was obtained. Five hydrological units were defined and, for the purposes of this study, the unit designated as "A" was used. The critical period of surface and/or subsurface water excess was from August to November. ΔS was the variable that correlated most highly with variation in the level of the water table ($r = -0.61$).

Index words: precipitation, evaporation, water table.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de agua de mayor importancia que pueden producir recarga del manto freático son: precipitaciones, riego y escurrimiento subterráneo. De acuerdo con el balance hidrológico del subsuelo que supone el diseño de una red de drenaje, el estimador relevante de la recarga del manto es la acumulación de agua de lluvia o riego en el perfil del suelo, obtenido como la diferencia entre la entrada y salida del agua. De este modo, interesan dichos flujos de agua en el perfil del suelo hasta la profundidad considerada de importancia para la futura explotación agrícola (Pizarro, 1985).

El régimen de precipitación es el primer factor de recarga de la capa freática y la evaporación activa como un regulador natural de descarga. Además, existen otros factores, como la topografía y la permeabilidad en los diversos horizontes del suelo, que pueden atenuar o agravar el problema.

Para solucionar efectiva y eficientemente un problema de drenaje se necesita conocer la causa real

del problema. Para encontrarla, deben analizarse y evaluarse los factores que recargan el sistema subsuperficial de agua y determinar su efecto en la capa de agua. La definición de unidades hidrológicas es de gran importancia en áreas con problemas de drenaje, para tomar decisiones de prevención o control (De Ridder, 1978).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo definir las unidades hidrológicas de la zona del ex lago de Texcoco, edo. de México, encontrar el período crítico de exceso de agua en la superficie o en el subsuelo y determinar cuál de las variables climáticas tiene mayor influencia en las fluctuaciones del nivel freático.

Una fracción del agua de lluvia y de riego se infiltra en el terreno. Si éste tiene un contenido bajo de humedad, el agua infiltrada se retiene en un cierto espesor de suelo e impide que se infiltre a mayor profundidad, hasta que en la capa superior se alcanza el límite superior de humedad. Entonces, comienzan a actuar dos fenómenos de efectos opuestos; por un lado, la transpiración y evaporación disminuyen la humedad del suelo; por otro, las nuevas lluvias y riegos la aumentan. Si las aportaciones de agua superan a las extracciones, el agua en exceso se infiltra cada vez a más profundidad, ubicando los estratos de suelo que atraviesa con un contenido superior de humedad.

De esta manera, se puede alcanzar un estrato impermeable, o poco permeable, que permita el paso del agua a una velocidad inferior a la que llega procedente de las capas superiores. En estas condiciones, el suelo situado encima del estrato impermeable se satura con las nuevas aportaciones de agua que llenan todos los poros del suelo. Si continua entrando agua, la zona saturada se va elevando y se aproxima a la superficie. El agua que ocupa esta zona saturada se denomina agua freática y el límite superior es una superficie conocida como capa freática (Pizarro, 1985; Martínez, 1986; Palacios-Vélez, 2001).

La capa freática está sometida a oscilaciones, debido a la variación de los factores de carga y descarga. En la época de lluvia se eleva y en la época seca desciende, como consecuencia de la evapotranspiración.

Van der Sluijs y De Gruijter (1985) determinaron que, en Holanda, el nivel freático muestra una fluctuación estacional con niveles altos en invierno y bajos en verano. Lo anterior se debe a que la precipitación está casi igualmente distribuida en el año y la evapotranspiración depende de la estación. En invierno hay un exceso de

lluvia que causa altos niveles freáticos. En primavera, la evapotranspiración comienza a exceder a la precipitación y, junto con el drenaje natural del terreno, ocurre una caída en el nivel freático hasta finales del verano u otoño. Con la reducción de la evapotranspiración, el exceso de lluvia provoca que se eleve el nivel freático. Las diferencias anuales entre precipitación y evapotranspiración y su distribución a través del año causan diferencias anuales en las fluctuaciones del nivel.

Herrera *et al.* (1994) determinaron, para las condiciones de Cuba, que debido a las características edáficas (suelos gleysoles) y topográficas y al régimen de lluvia (1179 mm media anual), en las áreas agrícolas, se produce un manto freático que, en ocasiones, llega a la superficie y desaparece en el periodo seco, debido a que la evapotranspiración es superior a la precipitación.

Para conocer la profundidad y variación en el tiempo de la capa freática de un área específica, el procedimiento habitual consiste en realizar perforaciones en diferentes puntos equidistantes y esperar a que el agua se estabilice.

De Ridder (1978) indicó que la presentación de las lecturas del nivel freático con respecto al tiempo se denomina hidrogramas de pozos de observación, los cuales son importantes para evaluar las condiciones del agua subsuperficial y proporciona la siguiente información: a) la velocidad de ascenso y descenso del nivel del agua; b) la profundidad de la capa de agua por debajo de la superficie del terreno, lo cual revela períodos del año crítico; c) en combinación con los componentes del balance del agua (precipitación, riego, bombeo de pozos, evaporación, etc.), ayuda a comprender la causa de las variaciones de la capa de agua; d) hidrogramas que cubren varios años, indican la tendencia del comportamiento del agua subsuperficial.

Según De Ridder (1978) y Dieleman y Trafford (1978), una vez establecida una red de pozos de observación, las medidas de nivel freático deben hacerse durante algunos años, incluyendo secos y húmedos. La comparación de los hidrogramas de los pozos de observación permite distinguir diferentes grupos que muestran una respuesta similar al modelo de recarga y descarga de la zona. La amplitud de la fluctuación del nivel del agua en los diversos puntos de registro no necesariamente debe ser la misma. Las zonas en las que se sitúan tales pozos pueden considerarse unidades hidrológicas.

El nivel freático de un cierto pozo, en una unidad hidrológica, puede correlacionarse con los de otros pozos de ese grupo. Si dos se correlacionan satisfactoriamente, uno de los dos puede eliminarse de la red. Tal análisis puede conducir a la selección de un número de pozos "estándar", reduciéndose la red.

MATERIALES Y MÉTODOS

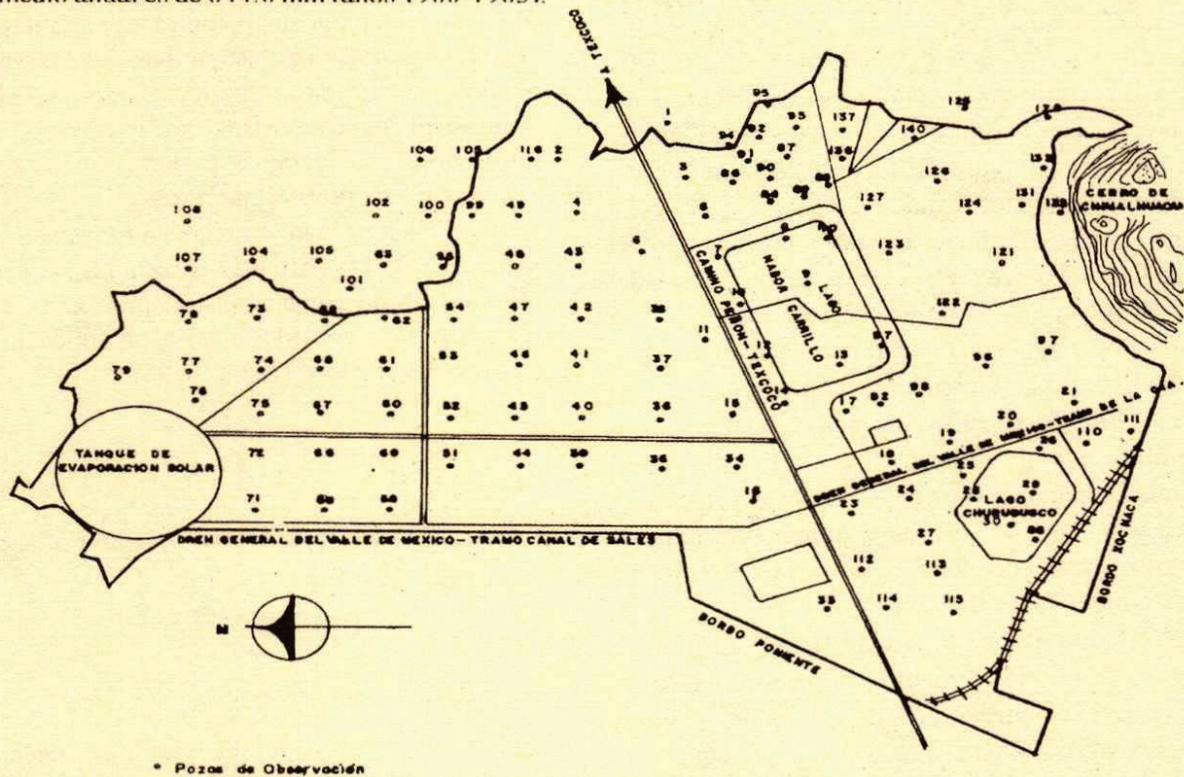
El ex lago de Texcoco se localiza dentro del Valle de México, en la parte sur de la Mesa Central de México. Las coordenadas del lugar son: 19° 36' N, 99° 00' O, a una altitud de 2236 m.

La temperatura media anual es de 15.3 °C y la evaporación media anual es de 1944 mm. La precipitación se distribuye irregularmente en la región; su valor medio anual es de 644.8 mm (años 1980-1983).

de los cuales 89.2% (575.3 mm) cae durante la época lluviosa, comprendida entre los meses de mayo a octubre, el resto (10.8%) se concentra en la época seca que comprende el periodo noviembre-abril (SARH, 1982).

La información básica se obtuvo de registros históricos compilados de 1979 a 2004, de 125 pozos de observación; se optó que los años 1980-1983, porque presentaron datos mensuales ininterrumpidos, confiables y consistentes de variación del nivel freático (Figura 1).

Se utilizaron registros de precipitación y evaporación mensual de los años 1980-1983, en correlación con los datos de los pozos observados durante este periodo. Esta información se obtuvo de la Estación Meteorológica del Departamento de Irrigación y la Comisión del Lago de Texcoco.



S A R H	
COMISION DEL LAGO DE TEXCOCO PROGRAMA AGRICOLA	
PLANO: DE	
Escala: 1:100,000	Fecha:

Figura 1. Ubicación de los pozos de observación del nivel freático.

También se recurrió a planos altimétricos y planimétricos y de ubicación de los pozos de observación de la zona de estudio.

Para la definición de las unidades hidrológicas, se siguieron dos procedimientos.

a) Método gráfico o traslape de hidrogramas

Para cada pozo, de los 125 considerados, se hicieron las gráficas de las fluctuaciones del nivel freático en el tiempo y se compararon entre sí, por medio de traslapes. Las que presentaron tendencias semejantes, se agruparon y, así, se formó una unidad hidrológica (Palacios-Vélez, 2001).

b) Método estadístico

En este caso, con las unidades hidrológicas obtenidas en forma gráfica, para cada una se determinó la correlación entre los pozos, para corroborar las unidades ya establecidas. Para esto, la correlación entre pozos de una misma unidad debió ser mayor o igual que 0.8 (De Ridder, 1978; Rojas, 2002)

Para determinar la relación que presentan las fluctuaciones del nivel freático y las variables del evaporímetro de tanque Tipo A y precipitación, se procedió de la siguiente forma.

Las variables estudiadas fueron la profundidad del nivel freático (H), con respecto a la superficie del terreno; la precipitación (P), la evaporación (E) y la variación de la lámina de agua almacenada en el suelo, que se obtuvo por la diferencia de la precipitación y la evapotranspiración del cultivo, la cual se denotó por ΔS . En condiciones de topografía plana, donde el escurrimiento superficial es nulo, consecuentemente se encharca y la percolación de agua influye directamente en la elevación del nivel freático, éste es el caso del área de estudio (Rojas, 2002).

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, se utilizó el método de evaporímetro de cubeta Clase "A", propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977), el cual se estima con la siguiente relación:

$$E_{To} = K_p \times E \quad (1)$$

donde: E_{To} = evapotranspiración de referencia (mm), K_p = coeficiente de tanque Tipo "A", E = evaporación (mm).

Según la SARH (1984), el ex lago de Texcoco presenta un $K_p = 0.8$ para todos los meses, contemplando que los evaporímetros de cubeta permiten medir los efectos integrales de la radiación, el viento,

la temperatura y la humedad, en función de la evaporación de una superficie libre.

La evapotranspiración de cultivo (ETR) se estimó con la siguiente relación:

$$ETR = E_{To} \times K_c \quad (2)$$

donde: ETR se expresa en mm y K_c = coeficiente de cultivo.

Según Doorenbos y Pruitt (1979), en el caso de pastos, se recomienda tomar un K_c (mínimo) cercano a los K_c (mínimos) de la alfalfa en condiciones de pastoreo deficiente, cuando haya quedado destruida toda la cubierta. Por esta razón, se seleccionó el $K_c = 0.4$.

De las unidades hidrológicas obtenidas, se consideró "la denominada A" porque agrupa nueve pozos de observación y la correlación entre ellos fue mayor que 0.8, para comparar sus H contra las variables P, E y ΔS .

Para realizar las comparaciones, las variables en estudio se agruparon en forma mensual, bimestral, trimestral y tetramestral; las variables también se agruparon considerando períodos secos y húmedos, siguiendo los criterios anteriores.

Para definir la mejor relación funcional entre H con cada una de las variables en estudio, se determinó el coeficiente de correlación (r) para cada una de las agrupaciones consideradas, a partir de la ecuación siguiente (Infante y Zárate, 1998):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n}}{\left\{ \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n} \right] \left[\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \right] \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

donde: x y y son las observaciones hechas en dos características.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Unidades Hidrológicas

En la Figura 2 se muestran las cinco unidades hidrológicas: A (nueve pozos, $r = 0.93$), B (nueve pozos, $r = 0.84$), C (cuatro pozos, $r = 0.80$), D (seis pozos, $r = 0.83$) y E (dos pozos $r = 0.85$); los pozos restantes, 95 no agrupados, representan cada uno una unidad

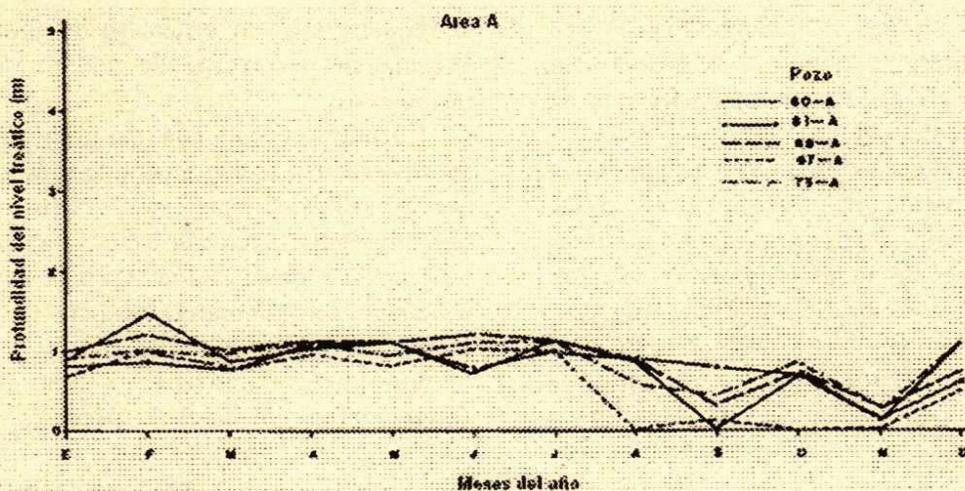


Figura 3. Variación del nivel freático en el tiempo, Pozos de observación 60, 61, 67, 68 y 73.

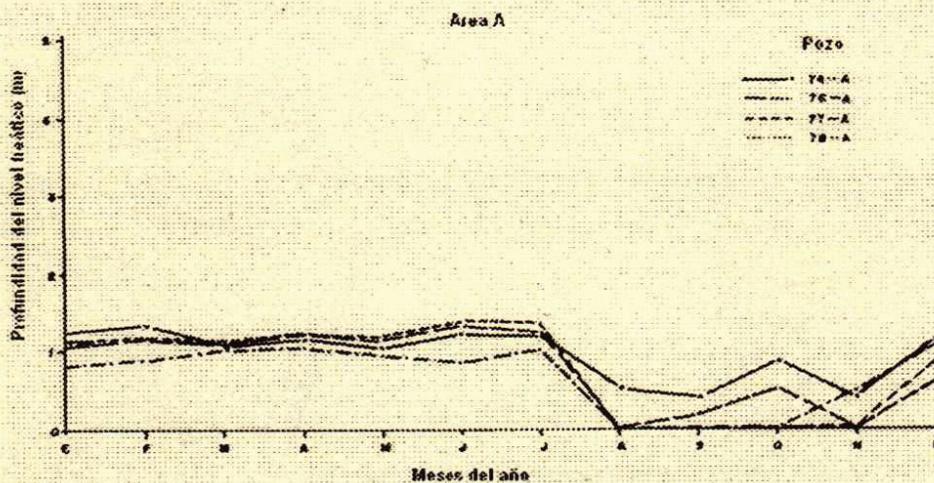


Figura 4. Variación del nivel freático en el tiempo, Pozos de observación 74, 76, 77 y 78.

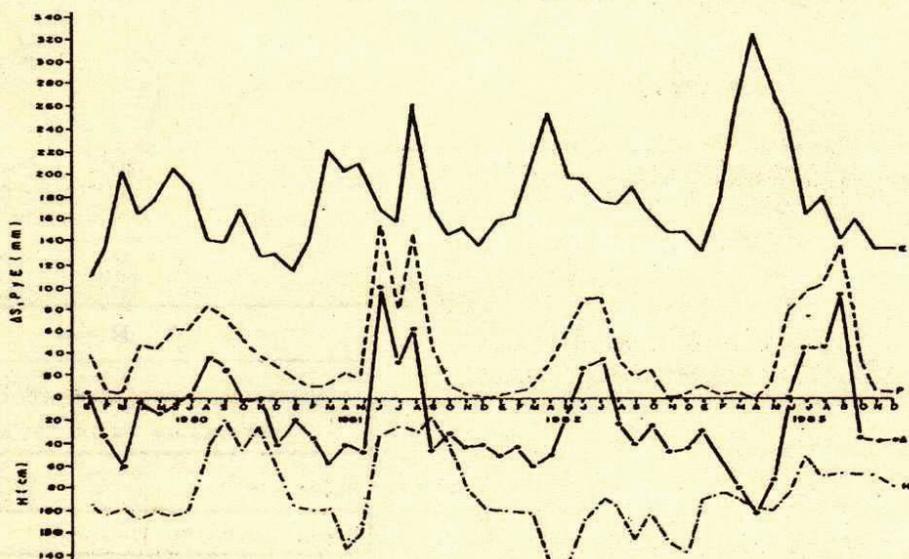


Figura 5. Fluctuación mensual: nivel freático (H), precipitación (P), evaporación (E) y ΔS .

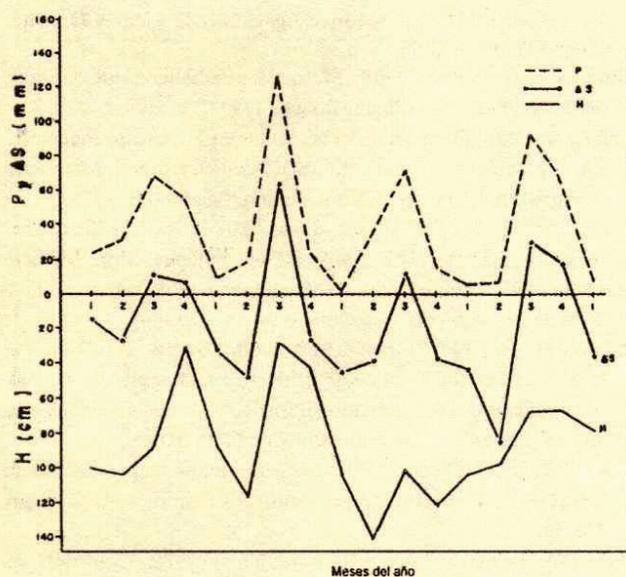


Figura 6. Fluctuación trimestral: nivel freático (H), precipitación (P) y ΔS .

se observa que existe relación entre H y cada una de las variables climáticas estudiadas; para poder cuantificarla se obtuvo el coeficiente de correlación entre H y P, que fue de -0.45; entre H y E, que fue de 0.26; y el de H y ΔS , cuyo valor fue de -0.46. Como el coeficiente de correlación que se presentó entre H y E fue bajo, la E se eliminó de las demás agrupaciones consideradas.

De las otras agrupaciones, la que presentó mayor coeficiente de correlación fue la trimestral y tetramestral (Figura 6 y 7), considerando períodos secos y húmedos, entre H vs ΔS ; para ambos casos, éste fue de -0.61. Después le siguió la agrupación tetramestral, en períodos secos y húmedos, entre H y P, con valor de -0.58.

En el Cuadro 1 se presentan los coeficientes de correlaciones obtenidos entre la variable H y las variables climáticas para las agrupaciones en estudio. En todos los casos resulta que ΔS fue superior, ya que esta variable integra el efecto de la precipitación y la evapotranspiración del cultivo; además de la correlación que ayudó a explicar la causa y efecto.

CONCLUSIONES

- La técnica utilizada para la definición de cinco unidades hidrológicas es adecuada, lo que permite reducir el número de pozos de observación. Esto repercute en los costos de operación y mantenimiento.

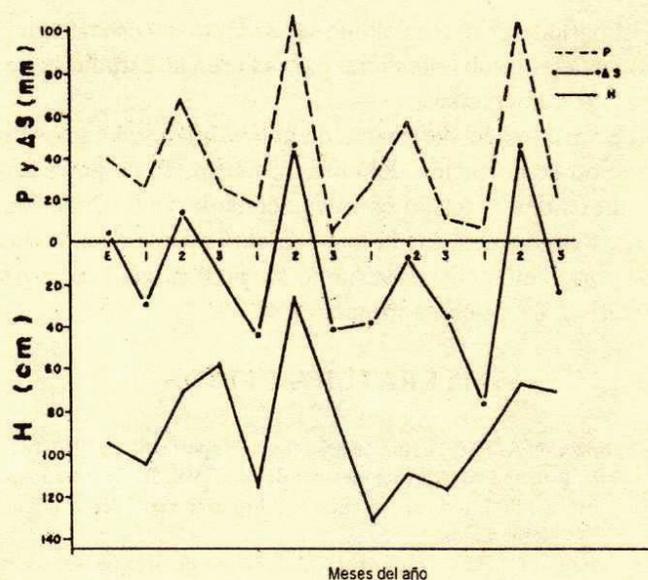


Figura 7. Fluctuación tetramestral: nivel freático (H), precipitación (P) y ΔS .

Cuadro 1. Coeficientes de correlación entre la fluctuación del nivel freático (H) y las variables agroclimáticas.

Variable	Agrupación	Coefficiente de Correlación (r)
P	Mensual	-0.45
E	Mensual	0.26
ΔS	Mensual	-0.46
P	Bimestral	-0.42
ΔS	Bimestral	-0.50
P	Trimestral	-0.39
ΔS	Trimestral	-0.48
P	Tetramestral	-0.41
ΔS	Tetramestral	-0.49
P	Promedio móvil bimestral	-0.47
ΔS	Promedio móvil bimestral	-0.54
P	Promedio móvil trimestral	-0.48
ΔS	Promedio móvil trimestral	-0.55
P	Promedio móvil tetramestral	-0.50
ΔS	Promedio móvil tetramestral	-0.55
P	Bimestral (seco y húmedo)	-0.49
ΔS	Bimestral (seco y húmedo)	-0.56
P	Trimestral (seco y húmedo)	-0.53
ΔS	Trimestral (seco y húmedo)	-0.61
P	Tetramestral (seco y húmedo)	-0.58
ΔS	Tetramestral (seco y húmedo)	-0.61

Agrupación: mensual-E, F, M, A, J, J, A, S, O, N, D.; bimestral-F-M, A-M, J-J, A-S, O-N, D-E.; trimestral-F-M-A, M-J-J, A-S-O, N-D-E.; tetramestral-F-M-A-M, J-J-A-S, O-N-D-E.

P = precipitación, E = evaporación, ΔS = P - E.

- El período crítico en el que se presentó exceso de agua superficial o subsuperficial para el área de estudio es de agosto a noviembre.

- La variable ΔS diferencia de la precipitación menos la evapotranspiración del cultivo, agrupada en períodos trimestrales y tetramestrales, considerando períodos secos y húmedos, fue la que presentó mayor coeficiente de correlación con la variable H, profundidad de nivel freático, en ambas agrupaciones; éste fue $r = -0.61$.

LITERATURA CITADA

- De Ridder, N.A. 1978. Estudios del agua subsuperficial. pp. 170-181. In: Principios y aplicaciones del drenaje. Vol. III. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands.
- Dicleman, P.J y B.D. Trafford. 1978. Ensayos de drenaje. Estudios FAO. Riego y Drenaje 28. Roma, Italia.
- Doorenbos J. y W.O. Pruitt, 1979. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje 24. Roma, Italia.
- Herrera, J., A. Castellanos, C. Alemán, J. Reyes, G. López, J.A. Rodríguez, P. Bernal, L. Torres, M. Felipe y P. González. 1994. Fundamentación técnica de la propuesta de transformación de la técnica de riego y operación de los sistemas de riego y drenaje en la zona sur de la ECV "Nueva Paz". Secuencia de construcción y puesta en marcha de las inversiones.
- Informe IIRD. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Ciudad Habana, Cuba.
- Infante, S. y G. Zárate. 1998. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Trillas. México, D.F.
- Martínez, J. 1986. Drenaje agrícola. Volumen I. Serie de Ingeniería Rural y Desarrollo Agrario Manual Técnico Núm. 5. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
- Palacios-Vélez, O. y S. C. Landeros, 2000. Drenaje de tierras agrícolas. SEMARNAP, CNA, IMTA. Jiutepec, Mor., México.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2a. edición. Agrícola Española. Madrid, España.
- Ritzema, H. P. 1994. Surface flow to drains pp. 263-304. In: H. P. Ritzema (ed.). Drainage principles and applications. 2da. ed. Publication 16. International Institute for Land Reclamation and Improvement. Wageningen, The Netherlands.
- Rojas. M.R. 2002. Diseño de drenaje superficial. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- SARH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1982. Comisión del Lago de Texcoco. Memorias 1977-1982. pp. 145-165. Volumen II. México, D.F.
- SARH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1984. Estudio hidrometeorológico de la subcuenca lago de Texcoco. Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional. México, D.F.
- Van der Sluijs, P. y J.J. de Gruijter. 1985. Water table classes: a method to describe seasonal fluctuation and duration of water tables on Dutch soil maps. Agric. Water Manage. 2: 109-125.