

UNA METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION-SIMULACION DE AREAS DE CAPTACION DE LLUVIA *in situ* QUE OPTIMICEN EL APROVECHAMIENTO DE LAS PRECIPITACIONES EN AGRICULTURA DE SECANO¹ /

JAVIER GARCIA BENAVIDES*
MANUEL ANAYA GARDUÑO**
EURO RINCON VELAZCO***

Abstract

Methods and procedures are described for the estimation-simulation of rain water harvest areas in situ (rain harvest-run on lands) to maximize yield considering climates variability. Emphasis is given to the introduction of estocastic components into the model considering univariate and multivariate probabilities. The simulation is made for two tropical sites: Tizayuca in Mexico and Pedregal in Venezuela. To determine optimum rain harvest lands a compound system of models which includes distribution functions for rainfall, evaporation, plant density, probability integration, rain harvest-lands - calculations, etc., is used.

Introducción

La agricultura de secano en las zonas áridas y semiáridas se caracteriza generalmente por encontrarse en ecosistemas potencialmente degradables, por poseer una baja estabilidad productiva de las tierras y por una alta variación de las condiciones climatológicas (precipitación). Todo esto provoca un alto riesgo de las inversiones que se realizan, además de una constante migración de las poblaciones, hacia áreas con mejores condiciones ecológicas y económicas.

Con objeto de subsanar en parte lo anterior, se vienen llevando a cabo en distintos países, prácticas de captación de agua de lluvia *in situ*. Esta práctica es en realidad necesaria y conveniente en regiones con

precipitaciones deficientes, para la producción agrícola. Necesaria, en el sentido de mitigar las deficiencias de agua reinantes y conveniente por sus técnicas implícitas antierosivas que ayudan en la conservación del suelo (1, 10).

La microcaptación de agua *in situ*, universalmente conocida para cultivos en hileras como el maíz, caso que aquí nos ocupa, se refiere básicamente a la "cosecha de agua" o captación que se realiza en parte del espacio de terreno comprendido entre las hileras, para su mejor aprovechamiento por las plantas. La parte del terreno dedicada a esta cosecha, deberá poseer un coeficiente de escurrimiento mayor que el del suelo en condiciones naturales. El agua de escurrimiento captada se dirige entonces a la otra parte del espacio entre hileras, acondicionada para la mejor infiltración y aprovechamiento del agua de lluvia.

El tamaño de la microcuenca o de la distancia entre hileras, en este caso para un suelo dado, es función de los coeficientes de escurrimiento del área de cosecha, así como de la precipitación y uso consuntivo del cultivo, entre otros factores. Un sistema de tipo empírico-lógico que involucre los factores anteriores, podrá entonces aplicarse para detectar *a priori*, aproximadamente, en una localidad dada,

¹ Recibido para publicación el 30 de julio de 1981

* Dirección de Investigaciones. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro, Venezuela.

** Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados Chapingo, México.

*** Ciencias del Agro y del Mar. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, Coro, Venezuela.

si conviene o no captar agua, así como el área de captación más adecuada. Estas estimaciones pueden realizarse, sin embargo, con cierta precisión, si algunos factores como la densidad de siembra son añadidos en el sistema, así como la inclusión de las componentes estocásticas del proceso productivo (precipitaciones). Las estimaciones y simulaciones del área de captación, que optimicen las condiciones ambientales de un lugar dado deben realizarse bajo el criterio de la necesidad de conocer la distribución de probabilidades de las precipitaciones en el sitio bajo estudio y recomendación. Este análisis probabilístico constituye la base necesaria para un análisis de riesgos, teniendo en cuenta la contribución a las aportaciones de agua, de las posibles áreas de captación a instalarse y por lo tanto su contribución al rendimiento máximo por obtener. En este artículo se presentan algunos procedimientos y metodologías para determinar el área de captación que pudiera lograr el rendimiento máximo para un lugar, en una serie suficientemente larga de años, en función de su variabilidad climática.

Materiales y métodos

Áreas bajo estudio

Las estimaciones-simulaciones se llevarán a cabo en dos áreas:

- 1) Pedregal, Edo. Falcón, Venezuela. Lat: 11°01'N. Long: 70°07'O. Alt: 169 m.s.n.m.
- 2) Tizayuca, Edo. de Hidalgo, México. Lat: 19°47'N. Long: 98°57'O. Alt: 2270 m.s.n.m.

Ambas localidades tienen fuertes y frecuentes deficiencias de agua durante el ciclo del cultivo (Cuadro 1).

Alternativas metodológicas

Con objeto de ilustrar mejor el procedimiento metodológico a seguir acerca de la inclusión estocástica (probabilística) en los sistemas que estimen — simulen las áreas de captación se barajan varias alternativas:

- 1) Probabilidad univariada. Los factores involucrados en el sistema se consideran como los totales en el ciclo del cultivo (caso Tizayuca).
- 2) Probabilidad multivariada (trivariada en este caso). Los factores involucrados se consideran actuando en tres fases del ciclo del cultivo (caso Pedregal).
- 3) Función de producción para déficits y excesos de agua (caso Tizayuca).

- 4) Función de producción para precipitación (caso Pedregal).

Probabilidades de lluvia

Las precipitaciones y sus probabilidades de ocurrencia pueden ser observadas (Pedregal) o estimadas (Tizayuca). En el área mexicana, bajo estudio, no se dispone de una estación climatológica. En este caso, las probabilidades de lluvia fueron estimadas para un área extensa de 27 000 km², bajo un proyecto de zonificación de cultivos (5). En dicha área se analizaron espacialmente los parámetros de una distribución de probabilidades de mejor ajuste (5, 6). Las unidades espaciales en las cuales se subdividió el área general anterior, y donde se hipotetizó que para toda la unidad la precipitación y su distribución de probabilidad son homogéneas, tienen una superficie de 13.6 km². Luego el diagnóstico del caso Tizayuca corresponde a una área de 13.5 km² cuyo centro geográfico son las coordenadas indicadas anteriormente. Los valores observados (n = 27) de la precipitación en Pedregal fueron ajustados a una distribución gamma incompleta truncada cuya función de repartición es:

$$P(P \leq P_i) = F_0 + (1 - F_0) \frac{1}{r(\alpha)} \int_0^{P_i} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

$$r(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad [1]$$

donde: α = parámetro de forma
 β = parámetro de escala
 F_0 = frecuencia empírica de valores igual a 0 en la serie.

$$P_s = \text{Valor estandarizado} = \frac{P_i}{\beta}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4/3 D}}{4D} \quad (\text{método de Thom})$$

$$D = \ln \bar{P} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln P_i$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{P}}{\hat{\alpha}}$$

Como prueba de bondad de ajuste se utilizó, por su eficiencia, la prueba de omega cuadrada de Smirnov (9) con la fórmula de trabajo:

$$n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{k=1}^n [F(P_k) - \frac{2K-1}{2n}]^2 \quad [2]$$

F(P_k) = probabilidad acumulada calculada a través de la función gamma incompleta.

$\frac{2K-1}{2n}$ = Probabilidad empírica.

$\frac{2n}{K}$ = número de orden de un valor dado, en una serie ordenada crecientemente.

En toda la presentación de probabilidades en este trabajo se omitirán aquellas superiores o inferiores al 95% y 5%, respectivamente, debido a la falta de precisión en ambas colas.

Uso consuntivo

El uso consuntivo fue estimado por la expresión general

$$UC = Ev \times Kc \quad [3]$$

donde: Ev= evaporación al sol (tanque)
Kc= coeficiente del cultivo

Para la estimación de la evaporación al sol (Ev) se generó el siguiente modelo generalizado para el área (Tizayuca):

$$Evi = 0.1597 (1.0409)^{Txi} (1.2351)^{Li} (0.9979)^{Pi}$$

$$R^2 = 0.795 \quad [4]$$

donde: Evi= evaporación al sol en mm/día para el mes i
Txi= temperatura máxima media del mes i en °C
Li = insolación astronómica en horas y décimos para el mes i (tablas)
Pi = precipitación del mes i en mm

Asimismo, cualquier Txi = f (AL). AL = altura en metros del lugar (r² > 0.82).

Para el cálculo de Kc se eligió un modelo que relaciona el consumo de agua por las plantas con el índice de área foliar (11). El modelo es una función cúbica incompleta propuesta por Norero (11):

$$Kci = K + IAF(Ci^2 - Ci^3)$$

K = parámetro de la función que indica la proporción de evaporación del suelo desnudo.

IAF = índice medio del área foliar.

C = edad de la planta como porcentaje del ciclo vegetativo.

$$\bar{Kc} = \int_0^1 [K + IAF(Ci^2 - Ci^3)] dC$$

de donde

$$\bar{Kc} = K + \frac{IAF}{12} \quad [5]$$

El valor de k utilizado en esta ocasión es 0.27, valor encontrado por Palacios (11) en condiciones climáticas similares a las que nos ocupan.

De los valores obtenidos en (2 y 3) se ajustó un modelo cuadrático que relaciona el IAF y la densidad de siembra:

$$IAF = 0.10359 D - 0.000307 D^2 \quad [6]$$

donde:

D = densidad de siembra (plantas) en miles
/ día

De esta manera el UC puede ser calculado a través de las expresiones [3], [4], [5] y [6] para cualquier combinación climática y densidad de siembra.

Áreas de captación,

Las áreas de captación pueden calcularse por una fórmula de fácil aplicación, ampliamente usada (1, 10)

$$Ac = As + \frac{1}{C} \left(\frac{UC - P}{P} \times As \right) \quad [7]$$

donde: Ac = Tamaño de la microcuenca o distancia entre hileras.
 As = Area de siembra o distancia tradicional entre hileras (90 cm en este caso).
 C = Coeficiente de escurrimiento (valor utilizado 0.5).
 UC = Uso consuntivo del cultivo durante su ciclo vegetativo.
 P = Precipitación acumulada en el ciclo.

La aplicación de esta fórmula se utiliza tradicionalmente, trabajando con valores al 50% de probabilidad (P y UC para una distribución normal).

Funciones de producción

La estimación del rendimiento se estableció a través de dos funciones. Para Tizayuca se consideró como variable independiente a $(P - P_n)$, donde: P = precipitación total en el ciclo del cultivo y P_n = precipitación necesitada, para satisfacer el uso consuntivo, en un área de captación dada. Luego dicha diferencia puede considerarse como las deficiencias o excesos de agua. P_n se calcula:

$$P_n = \frac{180 \times U_{ci}}{Ac_j + 90} \quad [8]$$

siendo P_n la precipitación necesitada para satisfacer un uso consuntivo i , en un área de captación establecida j

El rendimiento se estima:

$$R = R_d \times R_1 \quad [9]$$

donde: R = índice de productividad relativa del maíz (0-1)
 R_d = Factor del índice de productividad por densidad de siembra.
 R_1 = Factor del índice de productividad por deficiencia o excesos de agua.

R_d y R_1 se ajustaron a funciones cuadráticas de la forma:

$$R_1 = 0.881 + 0.002084 (P - P_n) - 0.00000919 (P - P_n)^2 \quad [10]$$

$$R_d = 0.0708 + 0.3188 (IAF) - 0.02735 (IAF)^2 \quad [11]$$

Las funciones se ajustaron a partir de datos procedentes de múltiples ensayos regionales en México (5, 12) para R_1 y de valores encontrados en las referencias (2, 3) para R_d .

Para Pedregal, la función de producción también toma la forma de un modelo multiplicativo de la forma:

$$R = R_d \times R_1^{b_1} \times R_2^{b_2} \times R_3^{b_3} \quad [12]$$

R_d , R_1 , R_2 y R_3 son los factores de los índices de productividad que corresponde a la densidad de siembra y a tres precipitaciones consideradas (P_1 , P_2 y P_3). Estas precipitaciones se refieren a las ocurridas durante la floración (P_3), las de un mes anterior a esta (P_2), y las ocurridas durante el mes de la siembra (P_1). Asimismo:

$$\begin{aligned} R_1 &= -0.674 + 1.522 P_1 - 0.346 P_1^2 \\ R_2 &= -0.929 + 1.543 P_2 - 0.3086 P_2^2 \\ R_3 &= -1.086 + 1.604 P_3 - 0.3086 P_3^2 \\ b_1 &= 0.37, b_2 = 0.34, b_3 = 0.29 \end{aligned} \quad [13]$$

A su vez, para una área de captación dada, los valores de precipitación observada (pluviómetro) sufrirán un incremento por la captación misma. Luego teniendo en cuenta a [7]:

$$P_i = \frac{P_{oi} [90 + C (Ac - 90)]}{90} \quad [14]$$

para $i = 1, 2, 3$.

P_{oi} = precipitación observada en el período i (pluviómetro).

Ac = área de captación dada.

C = coeficiente de escurrimiento.

Para una área de captación dada, existirá una densidad propia en el límite, ya que el área de captación correspondería a la distancia entre hileras. De esta manera, la densidad de siembra podría aumentar por disminución de la distancia entre plantas. En el límite, se usó la restricción de una distancia entre plantas de 25 cm para un arreglo topológico de 2 : 1. Luego, la densidad en el límite para cualquier Ac sería:

$$D = \frac{1000}{Ac \times 0.125} \text{ (miles plantas/ha)} \quad [15]$$

Estimación-simulación del máximo rendimiento a obtenerse en una serie larga de años en función de una área de captación óptima

Caso Tizayuca

Si para una localidad o punto se conoce la función de producción donde se relaciona el rendimiento con una variable independiente y a su vez se conoce una

función de frecuencia o la distribución de probabilidad de ocurrencia de la variable en el tiempo, el rendimiento a obtenerse en una serie de años suficientemente larga, será aquel que se obtiene determinando la contribución al rendimiento de cada uno de los valores alcanzados por la variable en cada intervalo de probabilidad. Es decir:

$$R \Big|_{Ac, D} = \int_{x1}^{xn} P(x) f(x) dx \quad [16]$$

donde P(x) = función de producción, f(x) = función de frecuencia, R = rendimiento a obtenerse en una serie suficientemente larga de años para un área de captación y densidad de siembra dadas. En este caso x = (P - Pn). Para realizar el cálculo se puede discretizar la función de frecuencia en intervalos de probabilidad. De acuerdo a esto se puede utilizar el principio de que la contribución al rendimiento de un intervalo de la variable independiente con valores comprendidos entre x y x + dx es igual a la probabilidad de ocurrencia entre x y x + dx multiplicada por el promedio del rendimiento entre x y x + dx (4, 7).

Los intervalos de probabilidad elegidos para discretizar la función serán: 5, 10, 20 80, 90, 95%.

El intervalo de probabilidad se calculará por diferencia, por ejemplo:

$$\backslash X20 - X10 \mid$$

donde X20 y X10 son los límites (al 20% y 10%) superior e inferior, respectivamente, de un intervalo. Aquí se tienen 8 intervalos del 10% y 2 del 5% de probabilidad. Asimismo, para el cálculo del rendimiento correspondiente a ese intervalo se tendrá:

$$(RX10 + RX20)/2$$

donde RX10 y RX20 son los rendimientos a obtenerse para los límites del intervalo de probabilidad [X20 - X10].

El problema a resolver sería averiguar cuál combinación Ac - D, producirá el máximo rendimiento para una distribución probabilística de (P - Pn) conocida, o lo que es lo mismo, distribuciones conocidas de P y Ev. El primer paso sería calcular una matriz de valores (P - Pn). Cualquier elemento de la matriz para una área de captación y densidad dadas será:

$$(P - Pn)ij$$

y representa el agua faltante o sobrante que se obtendría cuando se establece una área de captación correspondiente al nivel de probabilidad de precipitación i y ocurre una precipitación al nivel de probabilidad j. Sustituyendo en la función de producción los elementos (P - Pn) ij de la matriz se obtendrá una nueva matriz de elementos Rij para la combinación dada Ac - D. El siguiente paso será sumar las contribuciones de cada intervalo de probabilidad y efectuar la comparación para cada combinación Ac - D, buscando la óptima.

La suma de las contribuciones sería para toda Ac - D:

$$\frac{(RX5 + Rx10)}{2} (X10 - X5) + \frac{(RX10 + RX20)}{2} (X20 - X10) + \dots$$

Caso Pedregal

El mismo procedimiento anterior para tres variables independientes se hace muy complejo. En anterior comunicación (8), se indicaba que dada una función generalizada del tipo:

$$R \Big|_{X1, \dots, Xj} = f(P1, P2 \dots Pn)$$

donde R = rendimiento en una localidad con factores de sitio X1, X2 . . . Xj conocidos y P1 y P2 . . . Pn, variables estocásticas como precipitación, etc., la probabilidad de obtener un rendimiento R ≥ Ri era, para tres variables independientes:

$$P(R \geq Ri) = \int_{P1=0}^{\infty} \int_{P2=f(P1)}^{\infty} \int_{P3=f(P1, P2)}^{\infty} f(P1) f(P2) f(P3) d(P1) d(P2) d(P3) \quad [17]$$

Esta expresión representa el cálculo del volumen a un lado del isocuantos correspondiente al rendimiento Ri, para tres variables independientes, cuyas distribuciones de probabilidad son conocidas. El cálculo se repite sistemáticamente para una serie de Ri establecidos dentro de una serie de combinaciones elegidas para los factores de sitio, en esta oportunidad Ac - D. El procedimiento también es complejo. En esta ocasión se pretende obtener resultados similares a través del ajuste de la distribución probabilística de los rendimientos encontrados, sustituyendo sucesivamente una serie (n) de combinaciones de P1, P2, P3 suficientemente larga (datos históricos + simulados) en la función de rendimiento dada:

$$Ri(j, k) = f [(P1, P2, P3) i] \quad [18]$$

para $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, 1$, $k = 1, 2, \dots, m$ siendo Ri el rendimiento que se obtiene para la combinación $(P1, P2, P3) i$ y la combinación $Acj - Dk$.

Para cualquier combinación $Acj - Dk$ y para n combinaciones $(P1, P2, P3) i$ se obtendrá una serie de n valores de R :

$$R1(j, k), R2(j, k), R3(j, k) \dots Rn(j, k)$$

la cual se ajustará a una distribución gamma incompleta truncada, antes indicada [1], probando su bondad de ajuste mediante [2]. De la misma manera anterior si:

$$\frac{\sum Ri(3, 5)}{n} > \frac{\sum Ri(6, 2)}{n} \dots > \frac{\sum Ri(h, g)}{n}$$

entonces la combinación $Ac3 - D5$ será la óptima ya que produce un $\bar{R} = \sum Ri/n$ mayor.

El tamaño de n debe influir en los resultados. La distribución probabilística de los rendimientos tendrá una mayor concordancia con la realidad en la medida que la serie de combinaciones trivariadas $(P1, P2, P3)$ sea más larga. De hecho una serie histórica raramente será lo suficientemente larga como para satisfacer esa condición. Los algoritmos construidos para operar según la expresión [17] en trabajos anteriores, equivalían a 3840 combinaciones posibles entre $P1, P2$ y $P3$ (8). Por lo tanto, es necesario un alargamiento de la serie mediante simulación estocástica.

A partir de las series históricas disponibles de precipitación ($n = 27$) se simularon otras series, con objeto de alargar la primera. Para ello se utilizaron modelos de componentes autorregresivas de 1° y 2° orden:

$$Pi = bo + b1P_{i-1} + \epsilon_i$$

$$Pi = bo + b1P_{i-1} + b2P_{i-2} + \epsilon_i \quad [19]$$

donde Pi = precipitación en el período i .
 ϵ_i = desviación aleatoria de la distribución que caracteriza los datos en el período i .

ϵ_i está afectada por $r(i, i-1)$, siendo r el coeficiente de correlación entre los períodos $i, i-1 \dots$

Diagrama de los principales componentes del modelo empleado

En la Figura 1 se indica el diagrama de los principales componentes del sistema empleado, incluyendo los dos casos de Tizayuca y Pedregal. $\sum Ri_j$ expresada en la figura, debe verse como la sumatoria de las contribuciones al rendimiento de los varios intervalos de probabilidad.

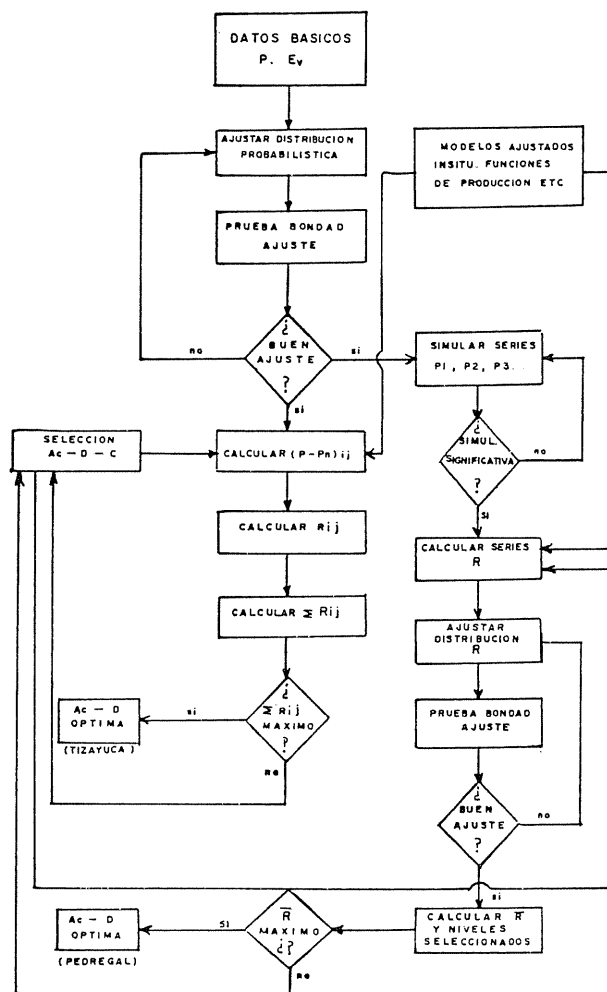


Fig. 1. Diagrama de los principales componentes del modelo empleado.

Resultados y discusión

Probabilidades de lluvia

En el Cuadro 1 se indican las probabilidades de lluvia y evaporación para los niveles indicados ($\leq Pi$). Los valores de Tizayuca para el ciclo del cultivo (5 meses) correspondientes a una distribución gamma, presentaron para A, S y O, respectivamente, valores de $n\omega^2$: 0.091 ($> 50\%$), 0.102 ($> 50\%$) y 0.089

Cuadro 1. Probabilidades de lluvia y evaporación en mm para los niveles indicados ($\leq P_i$).

	%										
	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5
Tizayuca											
(lluvia, ciclo)	846.8	766.5	668.4	597.0	536.9	480.0	423.1	363.0	291.6	193.5	125.2
(evap., ciclo)	676.2	698.3	728.6	751.8	771.7	791.1	811.1	832.8	859.2	897.1	924.3
Pedregal											
(lluvia, agosto)	220.4	164.8	114.0	87.2	66.6	49.8	36.4	25.5	16.1	7.8	3.8
(lluvia, setiembre)	177.6	154.5	130.5	114.6	102.0	99.4	81.2	71.4	61.1	48.5	39.4
(lluvia, octubre)	284.4	237.5	186.6	152.6	129.1	108.8	90.5	73.5	56.4	38.0	26.5

(> 50%), todos indicando un buen ajuste a la distribución gamma. De este cuadro puede observarse que ambas localidades tienen altas probabilidades de registrar precipitaciones limitantes, siendo aparentemente práctica conveniente la captación de agua.

Area de captación óptima para precipitaciones y evaporaciones al 50% de probabilidad (Tizayuca)

Calculando $\frac{\partial R1}{\partial (P - P_n)} = 0$, en [10], se obtiene el máximo rendimiento, ($R1^* = 1$) para 113.4 mm.

Trabajando con:

$$P - P_n = 113.4$$

si se tiene en cuenta las expresiones [3], [5], [6], [7], y [8] y se sustituye $P (50\%) = 480.0$ y $Ev (50\%) = 791.1$ se obtiene:

$$Ac = 14.875 + 3.353D - 0.009937D^2 \quad [20]$$

donde se relaciona Ac y D para $R1^*$; no obstante, muchas de las soluciones no serán lógicas, por la limitación [15]. Considerando esta limitación y sustituirla en [20] se tiene:

$$Ac^3 - 14.875Ac^2 - 268244c + 635968 = 0$$

que presenta una raíz lógica para $Ac \approx 158.67$ cm, ($D \approx 50$ 400 plantas/ha) la cual será el área de captación

que maximiza el rendimiento para los valores, P y $Ev (50\%)$. En la Figura 2 puede observarse lo anterior gráficamente, es decir, la interrelación entre las expresiones [15] y [20]. El punto de corte es la solución $Ac \approx 158.67$ cm; a la derecha de [15] las soluciones no son lógicas. Cualquier otra densidad inferior a 50 400 plantas/ha, producirá según [6] y [11] un rendimiento inferior. De acuerdo a [9]:

$$R = Rd \times R1 = 0.947 \times 1 = 0.947\%$$

que indica el máximo potencial de rendimiento a obtenerse, correspondiendo a la combinación $Ac - D$ anterior, para P y Ev al 50% de probabilidad.

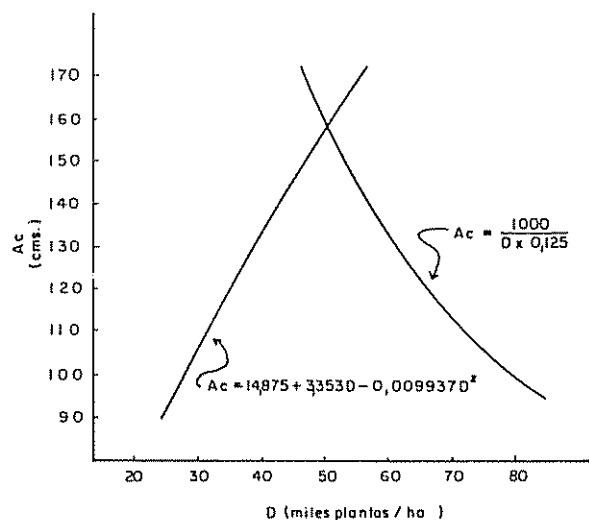


Fig. 2 Relación entre Ac y D para la condición P y Ev

Estimación-simulación del máximo rendimiento a obtenerse en una serie larga de años

$$R1 = (0.684) \times 0.05 + (0.92) \times 0.1 + (0.969) \times 0.1 + \dots + (0.0) \times 0.1 + (0.0) \times 0.05 = 0.4195$$

Caso Tizayuca

$$R = R_d \times R1 = 0.4193$$

En el Cuadro 2 se presentan algunos elementos R_{ij} de la matriz indicada en materiales y métodos, para distintos niveles de probabilidad de ocurrencia de la precipitación- evaporación y combinaciones de $A_c - D$. También se indican las contribuciones al rendimiento de los varios intervalos de probabilidad considerados y la sumatoria de dichas contribuciones. Así, 0.526 corresponde al rendimiento relativo a esperarse cuando $A_c = 90$ cm (no hay captación) y $D = 70\ 000$ plantas/ha y se obtiene de sustituir en [10] un $P - P_n$ calculado para $P(95\%) = 846.8$ mm y $E_v(95\%) = 676.2$ mm. Siguiendo, 0.684 es el rendimiento promedio esperado para un intervalo de probabilidad del 5%:

$$(0.526 + 0.843)/2 = 0.684$$

Asimismo el rendimiento a obtenerse en una serie larga de años será la sumatoria de las contribuciones:

la sumatoria de las contribuciones totalizan en esta oportunidad 90% por no trabajar con los intervalos del 5% en cada cola. En el mismo cuadro también se presenta el área de captación y la densidad de siembra que maximizan R ; éstas son:

$$A_c^* = 144, \quad D^* = 55\ 500$$

valores encontrados por procedimientos iterativos para incrementos $\Delta A_c = 2$ cm y $\Delta D = 500$ plantas/ha, respectivamente. El valor de la densidad que maximiza la condición $A_c = 90$ cm, es decir, sin captación, es $D^* \approx 48\ 000$ plantas/ha. La captación presentó las siguientes ventajas a raíz de la comparación entre estas últimas dos alternativas:

- 1) En cuanto al incremento de R , ($\Delta R = +7.4\%$) indicando que se logra un aumento significativo del rendimiento.

Cuadro 2. Algunos elementos R_{ij} seleccionados. Contribuciones al rendimiento de los intervalos de probabilidad indicados y rendimientos obtenidos para distintas combinaciones $A_c - D$.

	%											R1	R
	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	5		
$A_c = 90$	0.526	0.843	0.998	0.941	0.780	0.530	0.184	0	0	0	0		
$D = 70\ 000$	0.684	0.920	0.969	0.860	0.655	0.357	0.092	0	0	0	0	0.4195	(0.4193)
$A_c = 90$	0.364	0.742	0.978	0.985	0.881	0.688	0.403	0	0	0	0		
$D = 60\ 000$	0.553	0.860	0.981	0.933	0.748	0.545	0.201	0	0	0	0	0.458	(0.4514)
$A_c = 110$	0.116	0.571	0.910	0.998	0.966	0.847	0.638	0.320	0	0	0		
$D = 60\ 000$	0.344	0.740	0.954	0.982	0.906	0.742	0.479	0.160	0	0	0	0.5135	(0.5061)
$A_c = 130$	0	0.399	0.818	0.971	0.997	0.935	0.787	0.536	0.110	0	0		
$D = 60\ 000$	0.200	0.608	0.894	0.984	0.966	0.861	0.662	0.323	0.055	0	0	0.5453	(0.5375)
$A_c = 150$	0	0.063	0.607	0.858	0.972	0.998	0.943	0.796	0.502	0	0		
$D = 50\ 000$	0.032	0.335	0.732	0.915	0.985	0.970	0.870	0.649	0.251	0	0	0.5723	(0.5402)
$A_c = 90$	0.113	0.568	0.908	0.997	0.967	0.848	0.640	0.323	0	0	0		
$D^* = 48\ 000$	0.170	0.738	0.952	0.982	0.907	0.744	0.481		0	0	0	0.5139	(0.4794)
$A_c^* = 144$	0	0.209	0.703	0.914	0.993	0.983	0.890	0.702	0.354	0	0		
$D^* = 55\ 500$	0.052	0.456	0.808	0.953	0.988	0.937	0.796	0.528	0.177		0	0.5699	(0.5534)

2) En cuanto al número de años negativos ($R = 0$), se logra una disminución también significativa ($\approx -10\%$).

Mucha información práctica se puede obtener de resultados presentados según el Cuadro 2. Así por ejemplo, sin necesidad de construir la distribución de frecuencias, se puede observar que para la combinación $Ac = 144$, $D = 55\ 500$ se tiene:

$$P(R \geq 0.7) \approx 50\%$$

$$P(R \leq 0.9) \approx 70\%$$

información muy útil para generar modelos de riesgo y contribuir en la toma de decisiones racionales. Puede observarse, también, que la introducción de las componentes probabilísticas en esta estimación-simulación presentó un Ac óptima diferente a la encontrada trabajando con los valores promedios de P y Ev (158.6 Vs. 144 cm).

Caso pedregal

Simulaciones de la precipitación

La matriz de correlación para las tres precipitaciones empleadas se ve así:

	P1	P2	P3	
P1	1.00			n = 27
P2	0.196	1.00		
P3	0.332	0.079	1.00	

ninguno significativo al 5% de probabilidad (prueba de t). La condición de independencia entre precipitaciones podría entonces aplicarse. No obstante, se prefirió adoptar la condición de no independencia, para mayor exhaustividad metodológica.

Las componentes autorregresivas encontradas son:

$$P2 = 83.6 + 0.191(P1) \pm \epsilon(\gamma)$$

$$P3 = -16.96 + 1.165(P1) + 0.296(P2) \pm \epsilon(\gamma)$$

Las desviaciones $\epsilon(\gamma)$ son generadas por la distribución gamma incompleta. Las determinaciones son $r^2 = 0.0384$ y $r^2 = 0.1516$ para $P2$ y $P3$, respectivamente.

En la Figura 3 se presenta, como ejemplo, la comparación de las series simuladas y las observadas, para el valor acumulado $P1 + P2 + P3$ y para $P1$, obteniéndose valores de $r \geq 0.967$. Puede considerarse que los valores simulados representan bien las series históricas. Los valores de α , β y F_0 para las series simuladas y la histórica no difieren significativamente. Para $P2$ se tiene:

	α	β	F_0
Serie histórica (P2)	5.256	18.504	0
la simulación (P2)	4.831	22.456	0.037
2a simulación (P2)	5.489	18.034	0

Las 3 series disponibles, 1 histórica y 2 simuladas, presentan un total de 81 meses, los cuales al ser sustituidos en grupos de $n = 20, 30, 40 \dots 80$ en la

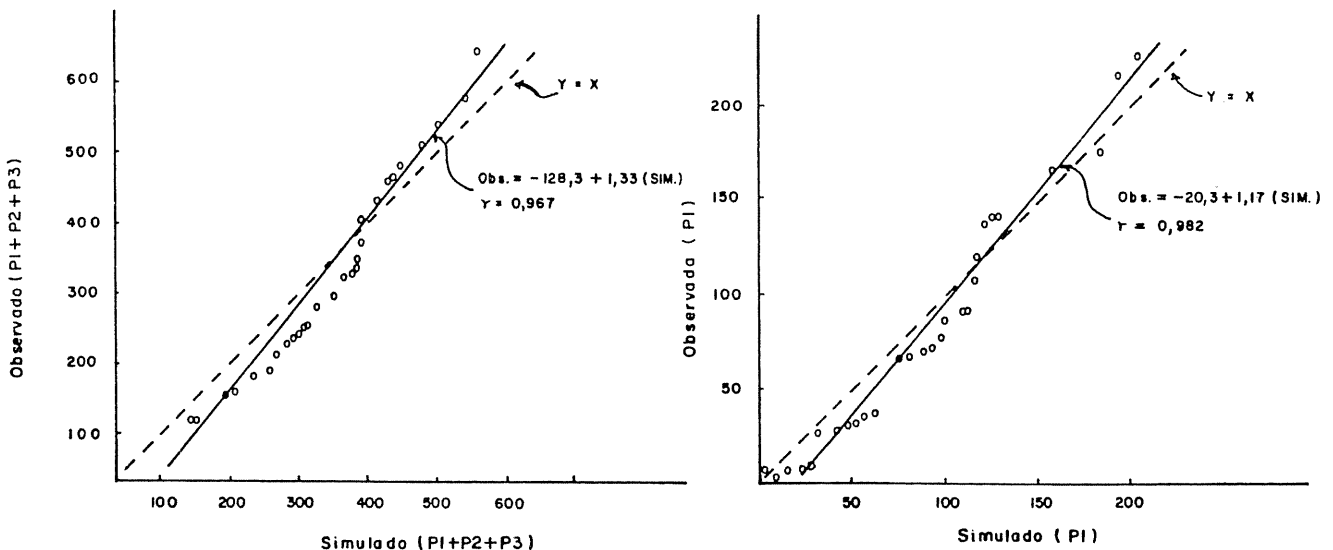


Fig. 3. Comparación entre series históricas y simuladas.

función [12] originaron las distribuciones gamma cuyos parámetros están indicados en el Cuadro 3. En él, puede observarse que el parámetro α varía considerablemente como una función del tamaño de n . El mismo valor de la variable a distribuir (R) tendrá entonces distintas probabilidades de ocurrencia. Como se indicaba en materiales y métodos, una serie histórica de 27 años es a todas luces insuficiente para trabajar con una probabilidad trivariada, debido al alto número de combinaciones de los tres factores que se puede presentar, afectando, como lo hace, al parámetro α y por lo tanto a la distribución probabilística. El alargamiento de la serie histórica a través de la simulación se justifica. Aquí posiblemente hubiese sido necesario trabajar con valores de $n > 80$.

Cuadro 3. Parámetros de la distribución gamma de los rendimientos simulados para distintos valores de n .

n	F_0	α	β
20	0.550	7.695	0.0775
30	0.500	7.632	0.0751
40	0.475	8.599	0.0694
50	0.520	9.667	0.0621
60	0.433	11.010	0.0554
70	0.471	11.527	0.0538
80	0.487	10.003	0.0602

Por procedimientos iterativos con incrementos de $Ac = 2$ cm, se detecta que R^* corresponde para $Ac = 190$ cm y $D = 42$ 100 plantas/ha. Los niveles de probabilidad y los valores de R procedentes de las distribuciones gamma a las cuales se ajustaron los valores de R simulados para las alternativas $Ac = 190$ (máximo) y $Ac = 90$ (sin captación) son:

	40	50	60	70	80	90	95%
190	0	0.29	0.451	0.543	0.636	0.759	0.859
90	0	0	0.264	0.404	0.566	0.699	

Esto indica por ejemplo:

$$P(R \geq 0.759) = 10\%, \quad Ac = 190$$

$$P(R \geq 0.264) = 30\%, \quad Ac = 90$$

En la Figura 4 se observan las funciones de repartición para las áreas de captación antes indicadas. Las bondades del ajuste son significativas según la prueba ω^2 de Smirnov: $n\omega^2(190) = 0.0815 (> 50\%)$ y $n\omega^2(90) = 0.159 (\approx 34\%)$. De estas funciones de repartición o probabilidad acumulada puede obtenerse cualquier nivel de R deseado.

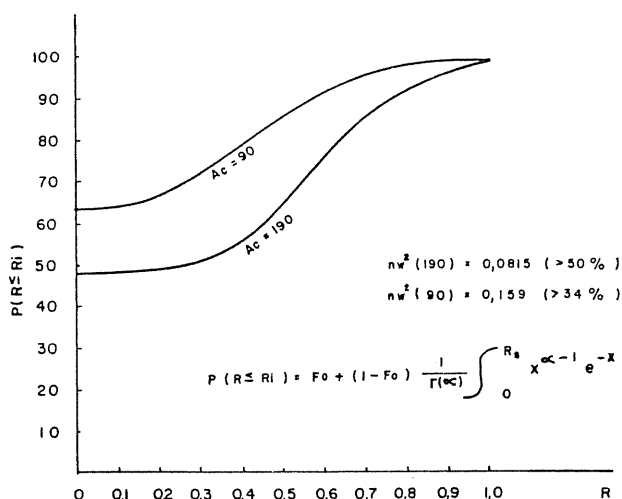


Fig. 4. Probabilidades acumuladas de obtener valores de R para dos áreas de captación.

Por comparación entre las alternativas de $Ac = 190$ y $Ac = 90$ se puede inferir si presenta ventaja captar o no lluvia. Así se tiene:

	90	190	Δ
F_0	63.7	48.7	15.0 %
\bar{x} (todos)	0.167	0.316	0.149
\bar{x} (sólo $\neq 0$)	0.463	0.602	0.139

- 1) La frecuencia de años negativos baja del 63.7% al 48.7% con una ganancia del 15% de años con posibilidad de cosechas.
- 2) El promedio del potencial de rendimiento incluyendo los años negativos ($R = 0$) pasa de 0.167 a 0.316 indicando un aumento en el rendimiento del 14.9% ; analizándolo a través del promedio del rendimiento para los años con cosecha se logra un incremento del 13.9% .

La ventaja de captar agua se agranda, por el alto valor que tiene en la agricultura de subsistencia el aumento en el número de años no negativos ($R \neq 0$). La función de producción [12] si bien creemos que sobreestima el número de años negativos encontrados, no lo hace por comparación con otras alternativas, en un orden mayor del 6%. La elección de este modelo se sustenta en que por su simplicidad y su concepción empírico-lógico ajustado *in situ* aparece mejor para la presentación metodológica.

La discordancia encontrada entre el área de captación que maximiza el rendimiento a través de la inclusión probabilística y aquella calculada para P y Ev (50%), que aquí fue de 14.6 cm, puede ser considerablemente mayor, dependiendo de la forma de la función probabilística de ajuste de las precipitaciones.

Para otros ejemplos y localidades se detectaron diferencias de hasta 32 cm, reafirmando la mayor precisión que se alcanza cuando la Ac óptima se calcula por integración probabilística y no simplemente a través de los valores medios de P y Ev. Cambios de valor del coeficiente C como entrada al sistema, pueden variar considerablemente la Ac óptima. Existe, sin embargo, una relación entre el valor de C y el costo. Para un análisis exhaustivo de la conveniencia de aumentar el valor de C, una inclusión económica es necesaria en el sistema, mediante la confrontación entre costos del aumento de C y su relación con el aumento en rendimiento al poderse incrementar la densidad de plantas (menor Ac). Esto último va aparejado a la incorporación de rastrojo para mejorar los coeficientes de infiltración en el área receptora de agua. Experimentos donde se involucran fertilización, materia orgánica (rastrojo), áreas de captación, densidad de siembra, etc., se realizan actualmente en el Colegio de Postgraduados de Chapingo, México.

Resumen

Se presentan en este artículo, técnicas y procedimientos metodológicos para la estimación-simulación del área de captación de lluvia *in situ*, y la densidad de siembra, que maximicen el rendimiento en agricultura de secano, en una serie suficientemente larga de años. Lo anterior se logra mediante la inclusión de las componentes estocásticas (precipitaciones) en el proceso productivo. El sistema creado presenta dos alternativas en cuanto a la inclusión probabilística: probabilidad univariada y multivariada. Los ejemplos se llevan a cabo para Tizayuca (México) y Pedregal (Venezuela), ambas localidades sometidas a intensos y frecuentes déficits de agua. Todos los ajustes probabilísticos se realizaron en esta oportunidad con la función gamma incompleta truncada

Bibliografía

1. ANAYA, G. M., J. TOVAR S. y A. MACIAS. Métodos de captación de agua de lluvia para zonas agrícolas con temporal deficiente. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 1976.
2. CROP. PHYSIOLOGY, edited by L. T. Evans. Cambridge University Press London 1975, 374 p.
3. FERY, F. L. and JANICK J. Response of corn (*Zea mays* L.) to population pressure. Crop Science 11 – pp. 220-224.
4. FORSYTHE, W. M. Importancia de la variabilidad de las propiedades del suelo para evaluarlas en su manejo. Turrialba 20(4):445-451. 1970.
5. GARCIA BENAVIDES, J. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, 1979. 455 p.
6. GARCIA BENAVIDES, J. y R. ARTEAGA. Estimación de probabilidades de lluvia por un análisis espacial de los parámetros de una distribución de probabilidades de mejor ajuste. In: III Congreso Mundial de Recursos de Agua. México, y Boletín Técnico No. 4. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación, 1979. 27 p.
7. GARCIA BENAVIDES, y E. SOTO NEGRIN. Zonificación ecológica de cultivos. V. Relación entre el rendimiento y variables climáticas simples. Modelos de Predicción Rev. Fac. Agron. (Maracay) IX(2):69-95. 1977.
8. GARCIA BENAVIDES, J. y A. TURRENT F. Predicción del rendimiento de maíz a través de análisis probabilísticos para una localidad dada y sus interrelaciones con el manejo. Turrialba, Vol. 30, No. 4, pp. 427-438. 1980.
9. LEON ZAMUDIO, S. Bondad de ajuste de algunas funciones probabilísticas a la distribución de la lluvia. Tesis de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 1976, 104 p.
10. MANUAL DE CONSERVACION DEL SUELO Y DEL AGUA. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 1077. 599 p.
11. PALACIOS VELEZ. E. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuándo y cuánto regar. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, 1978, 25 p.
12. VOLQUE, H. V. Generación de Tecnología para agricultura de temporal y subsistencia: El caso del maíz en la región del Plan Puebla. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, 1977. 208 p.

Reseña de libros

KNOTT'S HANDBOOK FOR VEGETABLE GROWERS. Segunda Edición.

Hace 25 años el Dr. James E. Knott publicó la primera edición de su Handbook for Vegetable Growers que es un manual para productores de hortalizas. Este manual ha sido ampliamente utilizado y citado por lo conciso, claro y fácil de encontrar información específica concerniente al cultivo de hortalizas. Recientemente dos distinguidos horticultores, el Dr. Oscar Lorenz de la Universidad de California en Davis, y el Dr. D. N. Maynard en la Universidad de Florida en Gainesville, realizaron una meritoria labor ampliando el manual original, poniendo al día la mayoría de los datos pero manteniendo el formato y conceptos básicos de la obra original del recordado gran maestro J. E. Knott. En esta nueva 2a. edición (Wiley 1980) el usuario se encontrará con 10 secciones en lugar de 7, empezando con una sección en que se identifica botánicamen-

te a estos cultivos, citando sus nombres comunes en siete idiomas; se da, además, la composición química y vitamínica. También se han agregado nuevos temas de actualidad como efecto de la polución del aire y plaguicidas y más datos sobre agua, riego y hierbicidas. Al final de este Manual de 390 páginas, se presenta un índice de materias que constituye un ejemplo por lo claro y completo que es.

Las estadísticas ofrecidas en el Manual concierne a los Estados Unidos de América donde la producción, distribución, industrialización y consumo de hortalizas constituyen una gran industria; sin embargo, la información tabulada y abreviada sobre los factores de producción sigue siendo muy útil para cualquier interesado pues permite localizar y comparar gran número de datos en poco tiempo. Como referencia rápida, el Manual de Knott en su Segunda Edición seguirá ocupando un lugar de preferencia con productores, investigadores y estudiantes de muchos países.

ERNESTO CASSERES
INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA
SANTIAGO, CHILE