

RESPUESTA DEL CULTIVO DE PAPA A NIVELES DE HUMEDAD DEL SUELO EN DOS ETAPAS FENOLOGICAS Y AL NITROGENO APLICADO

Leopoldo J. Génova

Departamento de Suelos y Recursos Hídricos. Ministerio de Asuntos Agrarios de la Provincia de Buenos Aires.
Calles 14 y 532. 1900. La Plata.

RESUMEN

Con el objeto de establecer relaciones funcionales que permitan explicar la respuesta del cultivo de papa, en cantidad y calidad de cosecha, a niveles de humedad del suelo mantenida durante dos etapas fenológicas, y a la fertilización nitrogenada, se realizó un experimento en Montecillos, México, en el período junio-octubre de 1982.

Utilizando técnicas de regresión lineal múltiple se obtuvieron funciones de producción que permitieron hallar valores óptimos de humedad y fertilización con nitrógeno para el logro de rendimientos máximos.

La producción total de tubérculos se maximiza (57 Mg/ha) cuando el nivel de humedad aprovechable residual no baja más del 37% (0,27 MPa de tensión del agua del suelo) durante la etapa vegetativa, y del 56,5% (0,13 MPa) durante la etapa de tuberización, ambas humedades asociadas con 102,5 kg/ha de nitrógeno.

El rendimiento máximo de tubérculos con calidad comercial (52 Mg/ha) se esperaría cuando se cumplan las siguientes condiciones: 0,24 MPa durante la etapa vegetativa, 0,16 MPa en la etapa de tuberización y 96 kg/ha de fertilizante nitrogenado.

La producción de tubérculos malformados está ligada a la ocurrencia de períodos de humedecimiento y secado extremo del suelo.

Palabras Clave: funciones de respuesta, rendimientos de tubérculos de papa, humedad óptima del suelo, fertilización nitrogenada.

POTATO CROP RESPONSE TO SOIL MOISTURE AND NITROGEN AT TWO STAGES OF GROWTH

ABSTRACT

In order to determine the yield response of potato to changes in soil moisture stress during two different stages of growth and levels of nitrogen an experiment was carried out. The highest tuber yield is obtained when the soil water tension values are: 0,27 and 0,13 MPa during the vegetative and tuberizing stages respectively, and 102.5 kg/ha of nitrogen is applied.

From the point of view of commercial quality of tubers, the optimum yield (52 ton/ha) is obtained when the soil water tension values are 0,24 and 0,16 MPa for the above mentioned stages, and 96 kg/ha as nitrogen fertilization is applied.

Finally, the unfurnished tuber production were associated with wet and extremely dry periods occurring in the second stage of growth.

Key words: response function, potato tuber yield, optimum soil moisture, nitrogen fertilization.

INTRODUCCION

El cultivo de la papa se lleva a cabo tanto en zonas de riego como de secano. En las primeras, la economía del agua constituye el objeto de mayor peso para la optimización del funcionamiento del sistema productivo. Por lo tanto, conocer los requerimientos de riego del cultivo para definir cuándo y cuánto regar para lograr máximos rendimientos, complementa otras medidas que propician el ahorro del agua.

En las regiones donde el balance de humedad es deficitario, contar con información referente a la respuesta del cultivo en términos de producto, a regímenes variables de humedad del suelo, permite establecer estrategias que decidan épocas de siembra que probabilísticamente acerquen la oferta con la demanda de agua. También pueden efectuarse predicciones de cosecha en base a balances de humedad del suelo de acuerdo a precipitaciones efectivas ocurridas o estimadas, con incidencia en el período del cultivo.

La producción de tubérculos está asociada con la disponibilidad de agua y nutrientes. Entre éstos, el nitrógeno merece especial atención por ser generalmente deficitario en los suelos agrícolas.

En base a lo expuesto, surgió la idea de establecer un experimento de campo que permita investigar la respuesta de la papa a niveles cambiantes de humedad y nitrógeno, formulándose los siguientes objetivos:

- Encontrar una función de producción que relacione el rendimiento total de tubérculos con la disponibilidad hídrica y nitrogenada.
- Hallar funciones de producción que relacionen la calidad de la cosecha de tubérculos con niveles de humedad y de nitrógeno.
- Establecer el período crítico del cultivo y determinar las dosis de riego y fertilización más adecuadas para la obtención de rendimientos máximos.

Robins y Domingo (1956) determinaron que la disponibilidad hídrica afecta tanto la cantidad como la calidad de los tubérculos. Salter y Goode (1967) efectuaron una revisión del tema y concluyen en la detección de un período de mayor sensibilidad a la humedad disponible, que corresponde a la etapa que va desde la iniciación de la tiberización hasta la maduración. Harris (1978) reunió cierta cantidad de datos referentes a producción de tubérculos a distintos regímenes de humedad, de los cuales se desprende que, para obtener máximos rendimientos, la humedad del suelo aprovechable residual (HAR) no debe ser menor del 50% durante la etapa de crecimiento del tubérculo.

Referente a la respuesta de la papa al nitrógeno aplicado, Ramírez y Laird (1964) encontraron que

dosis mayores que la óptimas del orden de 60-80 kg/ha, produjeron rápido descenso en los rendimientos y que la fertilización adecuada aumentaba el valor comercial de la cosecha.

Considerando la respuesta del cultivo a las variables agua y nitrógeno, Holliday (1970) consigna que parte de la sensibilidad de la papa a pequeñas reducciones en la cantidad de agua del suelo podría ser debida a un efecto indirecto del déficit hídrico sobre la disponibilidad de nutrientes.

Painter y Augustin (1976) probaron el efecto de cuatro niveles de humedad y tres de nitrógeno, pero también aumentó el porcentaje de tubérculos malformados, encontrando además que el tratamiento de humedad más bajo aplicado en la etapa de temprano crecimiento del tubérculo, produjo el mayor porcentaje de papas malformadas, no hallando diferencias significativas entre rendimientos y calidad de tubérculos para los tratamientos restantes.

En cuanto a funciones de producción, Palacios (1977) consigna resultados de estudios realizados en México donde se obtuvieron óptimos fisiológicos y económicos de rendimientos de varios cultivos. El mismo autor (1981) define y ejemplifica la metodología para elaborar planes de irrigación basados en la obtención de rendimientos máximos económicos.

Palacios y Martínez (1978) proponen un enfoque metodológico para la construcción de funciones de respuesta, de acuerdo al modelo:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

Y = Rendimiento del cultivo en Mg/ha.

x_i = Fracción de la humedad disponible del suelo consumida antes del riego o lluvia en la etapa i del cultivo. Puede también expresarse en términos de humedad disponible residual, siendo $x_i = 1 - x_i$.

Los valores óptimos de humedad del suelo son obtenidos maximizando la función de producción mediante cálculo diferencial.

MATERIALES Y METODOS

Se efectuó la siembra de la variedad hortícola Alpha en terreno ubicado en Montecillos, Estado de México, zona perteneciente a la Mesa Central del Valle de México, a 2200 m sobre el nivel del mar. El lote experimental presentó un suelo de origen aluvial, profundo, no salino, de topografía plana, de textura franco arenosa prácticamente homogénea hasta 1,20 m de profundidad, sin limitaciones al drenaje.

Fueron propuestos los siguientes tratamientos:

TABLA 1: Detalle de los tratamientos de humedad y nitrógeno propuestos y efectivamente logrados.

Nro.	Tratamientos propuestos			Tratamientos logrados		
	Humedad aprovechable residual		Fertilización nitrogenada kg/ha	Humedad aprovechable residual		Fertilización nitrogenada kg/ha
	Etapa Fenológica			Etapa Fenológica		
	V	T		V	T	
1	20	20	30	33,2	21,8	30
2	60	20	30	62,1	21,2	30
3	20	60	30	24,5	62,9	30
4	60	60	30	58,7	61,6	30
5	20	20	110	20,0	24,7	110
6	60	20	110	52,4	23,5	110
7	20	60	110	32,8	60,0	110
8	60	60	110	51,0	62,9	110
9	40	40	70	43,8	38,7	70
10	80	40	70	65,0	43,3	70
11	40	80	70	36,3	80,9	70
12	40	40	150	46,2	39,8	150

a) Cuatro niveles de humedad, aplicando riego cuando la HAR alcanza el 20, 40, 60 y 80%.

b) Cuatro niveles de fertilización nitrogenada, incorporando sulfato de amonio al 21% en el momento de la siembra en dosis de 30, 70, 110, y 150 kg/ha de nitrógeno.

c) Dos etapas fenológicas, definidas de la siguiente manera: Una etapa de crecimiento vegetativo, desde la emergencia hasta la tuberización, cuando el nitrógeno y la humedad disponibles manifiestan su influencia en el crecimiento de la planta, tanto en su parte aérea como subterránea (raíces y estolones) y, otra etapa, productiva, consistente en el período de formación de tubérculos, resultante de la acumulación de metabolitos, elaborados principalmente en el sistema foliar. Esta etapa transcurre desde la iniciación de la tuberización hasta la senescencia de la parte aérea y la maduración de los tubérculos. El fin de la etapa vegetativa y principio de la etapa de tuberización se determinó descalzando plantas para observar la región del gancho de los estolones. Cuando se evidenció un engrosamiento en la zona subapical y consecuente enderezamiento del gancho, se consideró como época de inicio de la formación de los tubérculos. El fin de la etapa se determinó al eliminar mecánicamente la parte aérea de la planta.

Se adoptó el diseño experimental San Cristobal para tres factores, propuesto por Rojas (1963), consistente en una muestra del total de combinaciones posibles de tratamientos, que se adecua para definir

puntos óptimos en las superficies de respuestas generadas. Tres repeticiones de los doce tratamientos resultantes fueron instaladas completamente al azar, en parcelas de 12 m² donde crecieron 44 plantas en 4 surcos, con espaciamento de 0.90 m entre surcos y 0.35 m entre plantas. Todas las parcelas se cubrían con una carpa de material plástico durante la noche y ante el peligro de lluvias.

En la Tabla 1 se observan los tratamientos propuestos y los efectivamente logrados, a causa del método gravimétrico con el cual se efectuó el control de humedad consumida por el cultivo. Dicho método consistió en la extracción de dos muestras de suelo por parcela experimental, para cada estrato considerado, de 0,20 m de espesor. Conforme el crecimiento de la planta implicaba una profundización del sistema radical, se fueron muestreando los estratos donde se verificaba consumo de agua. Se llegó al muestreo de cuatro estratos más del 50% de su ciclo. A partir de ese momento, se estabilizó la profundidad de extracción de humedad, ya que muestreos a más de 0,80 no evidenciaron consumo. El control gravimétrico por capas se efectuó estimando la absorción relativa de agua referida a la lámina de agua aprovechable total almacenable por todo el perfil del suelo explorado por las raíces.

La cosecha se dividió en dos partes: por un lado la obtención del peso fresco de la parte aérea de la planta, con el cual fue determinado el valor de materia seca, llevando a estufa durante tres días a 70° C y, por otra, el registro de la producción de tubérculos.

Estos se clasificaron en siete categorías según ta-

maño basado en las medidas del diámetro menor de acuerdo a la siguiente escala: a) clase gigante, mayor de 85 mm; b) primer clase, de 55 a 85 mm; c) segunda clase, de 35 a 55 mm; d) tercera clase, de 28 a 35 mm y e) cuarta clase, menor de 28 mm. Los tubérculos malformados se clasificaron en dos tipos; f) crecimiento secundario y g) tubérculos con rajaduras.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de producción obtenidos se presentan en la Tabla 2, expresados en kg/ha. La denominación y significado de las variables de respuesta consideradas se dan a continuación; R, rendimiento total de tubérculos; Cg, rendimiento de tubérculos de clase gigante; C1, primera clase; C2, segunda clase; C3, tercera clase; C4, cuarta clase; MF1, malformados por crecimiento secundario; MF2, malformados por rajaduras; MFOR, malformados totales, siendo MFOR = MF1 + MF2; COM, tubérculos de calidad comercial, siendo COM = Cg + C1 + C2; NCOM, de calidad no comercial, NCOM = R - COM; PS, materia seca de la parte aérea de la planta.

Debido a que el análisis de la varianza practicado permitiría detectar diferencias significativas, se efectuaron regresiones múltiples tratando cada variable de respuesta por separado, interviniendo como variables independientes los niveles de los tratamientos, de acuerdo con la siguiente metodología:

- x_1 = porcentaje de humedad del suelo aprovechable residual (HAR) durante la etapa vegetativa (V).
 x_2 = % de HAR durante la etapa de tuberización (T).
 x_3 = fertilizante nitrogenado, en kg/ha.

Generalmente se efectuaron las regresiones considerando los efectos lineales, cuadráticos y las interacciones entre las variables independientes, siguiendo un modelo propuesto del tipo:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 + b_6 x_3^2 + b_7 x_1 x_2 + b_8 x_1 x_3 + b_9 x_2 x_3 + E$$

donde:

- Y = Variable dependiente o de respuesta.
 b_0 a b_9 = Parámetros de la ecuación de regresión.
 E = Error aleatorio.

Fue obtenida la siguiente función de producción total de tubérculos, con $r^2 = 0.93$ y coeficiente de variación CV = 6,3%.

$$R = -56.986,68 + 2.148,24 x_1 - 18,69 x_1^2 + 895,27 x_2 - 4,61 x_2^2 + 952,27 x_3 - 3,05 x_3^2 - 3,80 x_1 x_2 - 5,32 x_1 x_3 - 2,26 x_2 x_3 \quad (1)$$

La ec. anterior constituye un buen ajuste, y puede ser maximizada. Se encontraron los puntos críticos de las variables independientes, que corresponden a un máximo de la función, cuyos valores son: $x_1 = 37\%$ HAR en la etapa V, equivalente a 0,27 MPa de tensión de agua del suelo; $x_2 = 56,5\%$ HAR (0,13 MPa) en la etapa

TABLA 2: Rendimientos promedio de tres repeticiones, de tubérculos y materia seca, en kg/ha, discriminados por categorías.

Tratamiento	Rendimiento promedio de tubérculos y materia seca en kg/ha											
	R	Cg	C1	C2	C3	C4	MF1	MF2	COM	NCOM	MFOR	PS
1	28.678	0	18.433	6.829	384	170	1.486	1.376	25.262	3.416	2.862	1.591
2	29.445	0	18.305	7.096	491	424	1.599	1.530	25.401	4.044	3.129	1.678
3	32.968	0	26.722	5.319	346	144	73	364	32.041	927	437	2.020
4	40.185	915	30.476	6.578	261	153	190	1.612	37.969	2.216	1.802	1.873
5	45.298	5.304	28.810	4.792	524	103	2.581	3.185	38.906	6.393	5.766	2.593
6	47.767	3.267	33.698	6.112	880	236	2.095	1.480	43.077	4.691	3.575	2.429
7	56.922	3.399	38.868	8.236	358	310	2.382	3.379	50.493	6.429	5.761	2.833
8	48.389	2.296	36.509	4.806	362	175	1.266	3.175	43.411	4.978	4.441	2.355
9	52.258	777	40.700	7.526	262	245	1.113	1.635	49.003	3.255	2.748	2.697
10	46.599	1.644	30.616	11.459	345	338	1.014	983	43.719	2.880	1.997	2.921
11	54.675	2.105	37.638	7.285	710	264	1.668	5.005	47.028	7.624	6.673	2.845
12	49.156	2.618	34.926	6.957	446	300	2.329	1.580	44.501	4.655	3.909	3.133

T y $x_3 = 102,5$ kg/ha de nitrógeno aplicado. Reemplazando los puntos críticos en la ec. (1) se obtiene el óptimo $R = 57$ Mg/ha. Estos resultados indican que la etapa crítica del cultivo respecto de la humedad es la correspondiente al período de formación y crecimiento del tubérculo.

La producción de tubérculos de clase gigante está menos relacionada con la humedad del suelo durante la segunda etapa fenológica que con la correspondiente a la etapa V y el nitrógeno. Se halló el siguiente modelo, con $r^2 = 0,86$ y $CV = 18\%$.

$$C_g = 213,6 - 127,18 x_1 + 1,83 x_1^2 + 107,76 x_3 - 0,23 x_3^2 - 0,82 x_1 x_3 \quad (2)$$

Podría inferirse que la disponibilidad inicialmente alta de nitrógeno, con humedad suficiente, determinan la formación de los primeros tubérculos, que no interrumpirán su crecimiento hasta el final del ciclo, compitiendo con el resto en condiciones favorables, ya que evidentemente reciben en forma continua las sustancias de reserva, independientemente de la humedad durante la etapa T.

La relación entre la producción de papas de primera clase, que constituyen la cosecha de mayor calidad, y los tratamientos, queda expresada en la siguiente función, con $r^2 = 0,93$ y $CV = 7\%$.

$$C_1 = -62,942,84 + 2,163,72 x_1 - 21,07 x_1^2 + 1,132,09 x_2 - 7,12 x_2^2 + 704,61 x_3 - 2,28 x_3^2 - 3,0 x_1 x_2 - 3,25 x_1 x_3 - 2,99 x_2 x_3 \quad (3)$$

De la cual se obtienen los siguientes óptimos: $x_1 = 40,6\%$ HAR (0,23 MPa); $x_2 = 51,7\%$ HAR (0,15 MPa) y 91 kg/ha de N_2 . Estos valores permiten calcular el máximo esperado $\bar{C}_1 = 42,425$ Mg/ha.

No fue hallada una función que relacione la producción de tubérculos de segunda clase con los niveles de humedad y de nitrógeno, más los mayores rendimientos fueron obtenidos cuando existió un elevado contenido hídrico del suelo durante la etapa vegetativa, junto con niveles medios de humedad durante la etapa T y dosis medias de nitrógeno. Esta combinación de variables resultaría en un mayor número de tubérculos formados debido a un alto número de estolones desarrollados en la primer etapa del ciclo.

Los resultados obtenidos referentes a papas de tercera y cuarta categoría no pueden ser explicados en función de las variables consideradas en los tratamientos. La prueba estadística de Tukey al 5%, más rigurosa que el análisis de varianzas, indicó que prácticamente no existieron diferencias significativas entre las

medias comparadas. Tales clases de tubérculos intervinieron en escasa proporción en el total de cosecha no comercializable.

La producción de tubérculos malformados debido a crecimiento secundario pudo asociarse con la alternancia de períodos húmedos, posteriores a cada riego, y secos, hasta alcanzar el 20% de HAR. Se obtuvo un modelo que ajusta razonablemente bien los datos, con $r^2 = 0,83$ y $CV = 25\%$.

$$MF_1 = 2,536,61 + 15,38 x_1 - 110,85 x_2 + 0,83 x_2^2 + 20,12 x_3 - 0,36 x_1 x_3 + 0,26 x_2 x_3 \quad (4)$$

Dicha función no es optimizable, más indica la incidencia de la disponibilidad hídrica durante la segunda etapa del ciclo, en el sentido que valores altos de HAR disminuyen la oportunidad de ocurrencia de crecimiento secundario, lo cual constituye una característica deseable.

La cosecha de tubérculos malformados debido a rajaduras, se explica a través de la función que sigue, con $r^2 = 0,87$ y $CV = 25\%$.

$$MF_2 = 4,171,32 - 247,89 x_2 + 2,18 x_2^2 + 50,54 x_3 - 0,15 x_3^2 + 0,91 x_1 x_2 - 0,71 x_1 x_3 + 0,50 x_2 x_3 \quad (5)$$

En este caso también se observa que altas humedades durante la etapa T disminuyen las rajaduras, mientras que niveles altos de nitrógeno contribuyen a su aumento.

Se le asigna gran importancia a la producción de papas de calidad comercial, pues representa la meta de todo productor agrícola: la obtención de cosechas de mayor aceptación en el mercado. La respuesta del cultivo de papa referente a la producción comercializable está relacionada con a) la existencia de condiciones hídricas durante la primer etapa fenológica que no afecten la formación del sistema foliar ni la diferenciación y crecimiento de estolones, b) una disponibilidad de agua irrestricta mientras transcurre la tuberización, y c) dosis intermedias de nitrógeno, ya que su limitación provoca bajos rendimientos y cantidades que superen los niveles medios no se corresponden con altas productividades.

Lo dicho anteriormente queda representado por el siguiente modelo, con $r^2 = 0,93$ y $CV = 6,3\%$.

$$COM = -60,447,59 + 2,015,39 x_1 - 18,04 x_1^2 + 1,226,09 x_2 - 7,83 x_2^2 + 857,51 x_3 - 2,85 x_3^2 - 3,75 x_1 x_2 - 4,02 x_1 x_3 - 2,89 x_2 x_3 \quad (6)$$

Optimizando la ecuación 6 se encuentran los puntos críticos $x_1 = 39,8\%$ HAR (0,24 MPa), $x_2 = 50,9\%$ HAR (0,16 MPa) y 96 kg/ha de N_2 , con los cuales puede calcularse el máximo valor esperado de la producción de tubérculos con calidad comercial COM = 52,16 Mg/ha.

En cuanto a la producción de papas no comercializables, se obtuvo una función con $r^2 = 0,87$ y CV = 17%.

$$\begin{aligned} \text{NCOM} = & 5.153,67 + 68,33 x_1 - 343,69 x_2 + 3,30 x_2^2 + \\ & + 86,83 x_3 - 0,18 x_3^2 - 1,19 x_1 x_3 + 0,68 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (7)$$

La ecuación anterior permite observar cómo valores crecientes de HAR durante la segunda etapa disminuye la producción de tubérculos malformados, los que integran aproximadamente el 84% de la cosecha sin calidad comercial.

Esto es corroborado por la similitud del modelo hallado para la producción de malformados consideradas en conjunto, con $r^2 = 0,89$ y CV = 19%.

$$\begin{aligned} \text{MFOR} = & 4.082,74 + 65,08 x_1 - 299,82 x_2 + 2,82 x_2^2 + \\ & + 80,92 x_3 - 0,16 x_3^2 - 1,26 x_1 x_3 + 0,23 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

Fueron analizados datos referentes a la producción de materia seca de la parte aérea de la planta, los cuales constituyen un buen estimador del tamaño del sistema fotosintetizador de carbohidratos acumulables en los tubérculos. Se encontró el modelo que sigue, con $r^2 = 0,70$ y CV = 12,4 %

$$\begin{aligned} r^2 = & 0,70 \text{ y CV} = 12,4\% \\ \text{PS} = & 430,71 + 30,41 x_2 - 0,24 x_2^2 + 24,48 x_3 - 0,09 x_3^2 \end{aligned} \quad (9)$$

La ecuación 9 optimizada permite disponer de los puntos críticos $x_2 = 61,7\%$ HAR y $x_3 = 132,5$ kg/ha de N_2 , con los cuales se calcula el valor máximo esperado de materia seca, PS = 2,99 Mg/ha. Como se aprecia en la ecuación precedente, la humedad que más influyó en el crecimiento del follaje fue la ocurrida durante la etapa T, de mayor duración que su antecesora. Aunque la etapa V es decisiva en el crecimiento general de la planta, el hábito del cultivar Alpha es continuar con el desarrollo de nuevas hojas aún después de la floración e iniciación de la tuberización.

Han sido consideradas las interrelaciones entre variables de respuesta. Se encontraron fuertes correlaciones positivas, expresadas en los siguientes modelos:

$$\begin{aligned} R = & 167,68 + 1,10 \text{ COM} \\ & \text{con } r^2 = 0,96 \text{ y CV} = 4\% \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{COM} = & 4.906,87 + 1,12 \text{ C I} \\ & \text{con } r^2 = 0,94, \text{ CV} = 5,3\% \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R = & 5.995,78 + 1,22 \text{ C I} \\ & \text{con } r^2 = 0,89, \text{ CV} = 7,3\% \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{NCOM} = & 552,93 + 1,04 \text{ MFOR} \\ & \text{con } r^2 = 0,98, \text{ CV} = 5\% \end{aligned} \quad (13)$$

Una relación que encierra particular interés para caracterizar la respuesta del cultivo a las condiciones impuestas a través de los tratamientos, es la establecida entre el rendimiento total de tubérculos y el rendimiento de materia seca de la parte aérea de la planta.

Se analizaron los datos encontrándose la siguiente función:

$$\begin{aligned} R = & -59.076,92 + 74,14 \text{ PS} - 0,012 \text{ PS}^2 \\ & \text{con } r^2 = 0,83 \text{ y CV} = 9,6\% \end{aligned} \quad (14)$$

Optimizada la Ecuación 14 se determina el punto crítico PS = 2979 kg/ha que corresponde a un máximo. Sustituyendo dicho valor en la ecuación optimizada, se obtiene el máximo rendimiento total esperado de tubérculos, R = 51,37 Mg/ha, que no está dado por la máxima cantidad de materia seca producida.

CONCLUSIONES

- 1) El cultivo de la papa responde diferencialmente a niveles de humedad del suelo en distintas etapas del ciclo, y a niveles de nitrógeno suministrado, tanto en la cantidad como en la calidad de la cosecha.
- 2) El rendimiento total de tubérculos se optimiza cuando la HAR no desciende más del 37% (0,27 MPa) durante la etapa V, y del 56,7% (0,13 MPa) en la etapa T, ambas condiciones de humedad asociadas a una dosis de nitrógeno de 102,5 kg/ha.
- 3) Se le asigna indudable importancia a la producción de tubérculos de calidad comercial, integrada por aquellos de buena forma cuyo diámetro menor su-

- pere los 3,5 cm. El rendimiento máximo se esperaría cuando se cumplan las siguientes condiciones: a) 39,8% HAR en la etapa V (0,24 MPa), b) 50,9% HAR en la etapa T (0,16 MPa) y c) 96 kg/ha de nitrógeno.
- 4) Tratándose de papas de primera clase, que constituye el producto más deseado, se obtendría un máximo cuando se verifiquen los siguientes niveles de humedad y nitrógeno: a) 40,6% HAR en la etapa V (0,23 MPa), b) 51,7% HAR en la etapa T (0,15 MPa) y c) 91 kg/ha de N_2 .
 - 5) Existe una elevada correlación entre los rendimientos de las tres categorías arriba mencionadas. El rendimiento total está constituido por un 90% de papas con aptitud comercial y un 70% de tubérculos de primera clase. Por lo tanto, pueden generalizarse los niveles de humedad y nitrógeno que producen el máximo rendimiento en la siguiente recomendación a) mantener un nivel de humedad del suelo durante la etapa vegetativa, no inferior al 40% de la máxima capacidad de almacenamiento de agua aprovechable, o su equivalencia en términos de tensión del agua del suelo de 0,24 MPa; b) durante la etapa de tuberización, dicho nivel no debe bajar del 50% (0,16 MPa) y c) aplicar 95 kg/ha de nitrógeno. Como se observará, si bien la etapa de formación y crecimiento del tubérculo es crítica en el sentido que constituye el período de mayor sensibilidad al déficit hídrico, la humedad disponible durante la primer etapa debe mantenerse en un nivel nunca restrictivo, pues en dicho lapso se forman los estolones, órganos precursores de los tubérculos.
 - 6) La producción de tubérculos malformados incide mayoritariamente en la categoría no comercial. Las malformaciones, tanto por crecimiento secundario como por rajaduras, son una función de la ocurrencia de fases de humedecimiento y secado extremo del suelo. Las más altas producciones de papas malformadas se obtienen cuando el suelo alcanza niveles de humedad tan bajos como aproximadamente el 20% de HAR durante la etapa de tuberización.
 - 7) Los valores óptimos de las variables humedad y fertilización deben tomarse como orientativos, representativos para las condiciones experimentales verificadas, y no serían extrapolables de manera estricta a situaciones cambiantes de región, variedad, manejo, etc. Sería interesante validar los modelos hallados reproduciendo los tratamientos que maximizaron los rendimientos a través de ensayos de campo de similar conducción.

BIBLIOGRAFIA

- Harris, P. A., 1978. The potato crop. The scientific basis for improvement. Ed. Chapman and Hall. London.
- Holliday, R., 1970. Nitrogen nutrition of the plant. E. A. Kirby editor. University of Leeds. England.
- Mc Collum, R. y V. S. Valverde, 1967. Fertilización del cultivo de papa en el Perú. EEA La Molina. Boletín 17. Lima. Perú.
- Painter, C y J. Agustín, 1976. The effect of soil moisture and nitrogen on yield and quality of the Russet Burbank potato. American Potato Journal. 52: 275-284.
- Palacios V. E., 1977. Introducción a la teoría de la operación de distritos de riego. Ed. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Palacios V. E., 1981. Response function of crops yield to soil moisture stress. Water Resources Bulletin 17: 699-703.
- Palacios V. E. y G. A. Martínez, 1978. Respuesta de los cultivos a diferentes niveles de humedad en el suelo: un enfoque metodológico de investigación. Ed. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Ramírez, R. y R. J. Laird, 1964. La fertilización del cultivo de la papa en la región de León, Guanajuato. Folleto Técnico Número 46. INIA. México.
- Robins, Y. y C. Domingo, 1956. Potato yields and tuber shape as affected by severe soil-moisture deficits and plant spacing. Agronomy Journal 48: 488-492.
- Rojas, A., B., 1963. El diseño San Cristóbal en investigaciones sobre fertilizantes. Memorias y conferencias. Inst. Tecnológico Azucarero Veracruzano. México.
- Salte, P. y J. E. Goode, 1967. Crop responses to water at different stages of growth. Ed. Buks. CAB. England.