

ÍNDICES DE EFICIENCIA DE GENOTIPOS DE PAPA ESTABLECIDOS EN CONDICIONES DE SECANO

**R. Mora-Aguilar^{1¶}; J. Ortiz-Cereceres²; A. Rivera-Peña³;
M. C. Mendoza-Castillo²; Ma. T. Colinas-León¹; H. Lozoya-Saldaña¹.**

¹Instituto de Horticultura. Departamento de Fitotecnía, Universidad Autónoma Chapingo.
Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230, MÉXICO.

Correo-e: mar@correo.chapingo.mx ([¶]Autor responsable).

²Programa de Fisiología Vegetal. Instituto de Recursos Genéticos y Productividad.
Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco.

Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.

³Programa de Mejoramiento Genético de Papa. CAE-Toluca-CIRCE-INIFAP-SAGARPA.
Metepec, Estado de México. MÉXICO.

RESUMEN

En Metepec, Estado de México, durante el secano de 1996 fueron establecidos cinco genotipos de papa en surcos separados a 90 cm y plantas a 30 cm. Durante 85 días después de la emergencia, a intervalos de 7 ± 1 días, se cosecharon cinco plantas con competencia completa por genotipo, para determinar la biomasa total de la planta y de sus órganos y el área foliar total, con lo cual se estimaron diferentes índices de eficiencia. Durante la etapa vegetativa la tasa relativa de crecimiento fue de 0.10 a $0.40 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, de acuerdo al genotipo y órgano de la planta, posteriormente disminuyó hasta ser negativa. La tasa de asimilación neta y de asimilación neta económica fluctuó entre 0.01-0.10 y $0.001\text{-}0.017 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectivamente, al iniciar la tuberización, y entre 0.21-0.57 y 0.035 a $0.054 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ en plena tuberización; en ambos casos sobresalieron los genotipos Alpha, Norteña y C-771A11. Entre los 43 y 57 días del desarrollo, la tasa de crecimiento del cultivo aumentó hasta 184 y $264\text{-}386 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ en los genotipos precoces y tardíos, respectivamente, y después disminuyó. La máxima tasa de acumulación de biomasa en los órganos subterráneos fue de 239 a $306 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, en los genotipos de hábito indeterminado, a los 85 días después de la emergencia. El índice de cosecha fluctuó entre 48 y 92 % y tuvo mayor expresión en los genotipos Alpha, Norteña y C-771A11. La mayoría de los genotipos tuvo elevado rendimiento total de tubérculo por planta debido a los elevados valores de la tasa relativa de crecimiento y la tasa de crecimiento de los tubérculos, así como de la tasa de asimilación económica neta. El mayor rendimiento de tubérculo comercial (1017 a $1164 \text{ g} \cdot \text{pta}^{-1}$) se debió al mayor número de tubérculos comerciales por planta.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: *Solanum tuberosum* L., tasas de crecimiento, biomasa.

EFFICIENCY INDEXES OF POTATO GENOTYPES ESTABLISHED UNDER RAINFED CONDITIONS

SUMMARY

Five potato genotypes were established in rows separated by 90 cm and plants by 30 cm in Metepec, in the state of Mexico, during the rainfed season of 1996. During the 85 days after their emergence, at intervals of 7 ± 1 days, five plants with complete genotype competition were harvested by genotype to determine the total biomass of the plants and their organs, and the total foliar area, with which different efficiency indexes were estimated. During the vegetative stage, the relative growth rate was 0.10 a $0.40 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, agreeing with the genotype and plant organ, later diminishing until becoming negative. The net assimilation rate and of economical net assimilation fluctuated between 0.01-0.10 and $0.001\text{-}0.017 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively when tuberization began, and between 0.21-0.57 and 0.035 a $0.054 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ during full tuberization; in both cases the Alpha Norteña and C-771A11 genotypes were outstanding. Between development days 43 and 57, the growth rate of the crop increased up to 184 and $264\text{-}386 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ in the precocious and late genotypes, respectively, and later diminished. The maximum rate of biomass accumulation in the underground organs was from 239 to $306 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, in the underground organs in the genotypes of undetermined habits at 85 days after emergence. The harvest index fluctuated between 48 and 92 %, and had a greater expression in the genotypes Alpha, Norteña and C-771A11. The majority of the

genotypes had a high total yield of tubercles per plant due to the high values of relative growth rate and the growth rate of the tubercles, as well as the net economic assimilation rate. The greatest yield of commercial tubercles (1017 a 1164 g·pta⁻¹) was due to the higher number of commercial tubercles per plant.

ADDITIONAL KEY WORDS: *Solanum tuberosum* L., growth rates, biomass

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es uno de los cultivos más importantes para la producción de alimentos en el mundo; ocupa el cuarto lugar después del arroz (*Oriza sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.), con 19'059,000 ha cosechadas donde se producen 290'000,000 t de tubérculo (Linares y Gutiérrez, 2002). En México tiene gran importancia económica y social: cada año se siembra en casi 70,000 ha, en diferentes regiones, donde se obtiene 1'200,000 t de tubérculo; genera casi 17,000 empleos directos; su rendimiento varía entre 5 y 22 t·ha⁻¹; y el consumo *per cápita* es de 16 kg (CCI, 2003). No obstante, se ha realizado poca investigación en esta especie para entender las relaciones que existen entre el rendimiento de tubérculo y el ambiente de producción, principalmente aquellas que se pueden controlar a través del manejo agronómico y de la adecuada selección de genotipos, y de esta manera incrementar el rendimiento económico, que en México es significativamente menor al obtenido en otros países (Rubio, 1997).

Por medio del análisis de crecimiento se detecta la influencia del ambiente y del genotipo sobre el desarrollo y productividad de los cultivos, y se determina el efecto de los periodos críticos; además de la acumulación y distribución de biomasa, el crecimiento puede ser analizado por medio de otros parámetros o índices de eficiencia, que tienen significado biológico y explican el comportamiento de los genotipos en condiciones ambientales específicas (Hunt, 1990; Rajwade *et al.*, 2000), así como la relación entre el aparato asimilatorio y la producción de biomasa (Sands *et al.*, 1983).

La contribución del crecimiento efectuado por las plantas sobre el crecimiento que continúa verificándose, es explicada por la tasa relativa del crecimiento (TRC), la cual disminuye al transcurrir el tiempo porque el número de células que se diferencian en tejidos y órganos cada vez es mayor con respecto al número de células meristemáticas que originan nuevos tejidos. Este índice integra el funcionamiento de varios órganos de la planta y es apropiado para comparar el efecto de diferentes prácticas agronómicas por ser relativo y no depender de suposiciones matemáticas (Hunt, 1990).

La tasa de asimilación neta (TAN), como medida indirecta de la fotosíntesis de la planta completa, representa el incremento en biomasa por unidad de área foliar y de tiempo (Hunt, 1982). Al considerar sólo la biomasa de los tubérculos, se le denomina tasa de asimilación económica

neta (TAEN) (McCollum, 1978). En forma general, la TAN está más relacionada con la ontogenia de la planta que con el ambiente, pues también decrece al transcurrir el tiempo y al final del ciclo biológico puede ser insuficiente para contribuir sobre el crecimiento de los tubérculos (Moorby, 1970; Collins, 1977; Oliveira *et al.*, 2000; Rajwade *et al.*, 2000). La TAEN aumenta a partir del inicio de la tuberización; sin embargo, el efecto combinado de una tasa positiva de crecimiento de los tubérculos y una disminución del área foliar le causan una disminución importante casi en la madurez del cultivo (McCollum, 1978).

Por su parte, la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) aumenta a partir de la emergencia para disminuir después de alcanzar el máximo valor, debido probablemente al autosombreo de las hojas que a otros factores (Silva, 2000). Los máximos valores de este índice dependen de la eficiencia fotosintética y del tamaño y duración del área foliar; casi al finalizar el ciclo biológico, pueden ser negativos porque el nuevo crecimiento es inferior a la senescencia de las hojas inferiores de la planta (Milthorpe y Moorby, 1982). El efecto de factores ambientales estresantes, como el déficit hídrico, provocan la disminución de la tasa de crecimiento del cultivo y de los tubérculos, debido a la reducción en acumulación y distribución de biomasa, y disminución del tamaño de la planta, del área foliar y del número de hojas, entre otros órganos (Oliveira *et al.*, 2000).

Durante casi todo el ciclo biológico de la papa, los fotosintatos se distribuyen en los diferentes órganos de la planta. Con pequeñas diferencias entre genotipos insensibles al fotoperiodo, durante la tuberización existe alta correlación entre la acumulación de biomasa en la planta completa y en los tubérculos, lo cual implica que una fracción constante de fotosintatos sea distribuida hacia los tubérculos y que el rendimiento esté directamente relacionado con la producción total de biomasa (Ezeta y McCollum, 1972; Mora *et al.*, 2005).

El índice de cosecha (IC) determina la relación en distribución de biomasa en la planta completa y los órganos de importancia antropocéntrica, como son los tubérculos, por lo que es considerado como índice de eficiencia fisiológica (Mackerron y Heibronn, 1985). Puede variar entre 57 y 91 % cuando los tubérculos han madurado y el follaje está en senescencia (Rajwade *et al.*, 2000); este rango representa las diferencias debidas al ambiente de producción, a los genotipos o a la interacción entre ambos factores (Ezeta y McCollum, 1972; Victorio *et al.*, 1986; Jefferies y Mackerron, 1993), y muestra amplias diferencias tanto en la producción de biomasa de los tubérculos como

del rendimiento comercial (Mackerron y Heibronn, 1985). En genotipos precoces de papa este índice es mayor que en los tardíos; además, puede ser afectado negativamente por factores ambientales adversos como la sequía (Jefferies y Mackerron, 1993).

Con base en lo anterior, este estudio tuvo como objetivo determinar el comportamiento de cinco genotipos de papa establecidos bajo condiciones de secano con respecto a los índices de eficiencia fisiológica: tasa relativa de crecimiento, tasa de asimilación neta, tasa de asimilación económica, tasa de crecimiento del cultivo e índice de cosecha, y rendimiento de tubérculo.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en Metepec, Estado de México (19° 17' N, 99° 41' O y 2,680 msnm), entre el 25 de mayo y el 20 de septiembre de 1996, bajo condiciones de secano. En la región predomina el tipo climático C(w₂)(w)big (García, 1988) y suelos de origen aluvial.

Se compararon los genotipos Alpha, Puebla y Norteña, C-771A11 y C-676014 (Cuadro 1), sembrados en surcos contiguos de 60 m de longitud separados a 90 cm, con 30 cm de separación entre plantas. Para la siembra se usó tubérculo-semilla sano, uniforme en tamaño (70±5 g) y en desarrollo de brotes. Durante todo el ciclo biológico las plantas se mantuvieron con un tallo, ya que durante la emergencia y la etapa vegetativa se raleó mecánicamente para lograr un mejor manejo del cultivo y tener mayor eficiencia operativa del análisis de crecimiento. El manejo agronómico del cultivo se apegó a las recomendaciones regionales señaladas por Rubio *et al.* (1997).

Durante 85 días después de la emergencia (dde), es decir, a partir del momento en que más del 50 % de las plantas en cada parcela habían emergido, se realizaron muestreos destructivos cada 7±1 días; durante éstos se cosecharon cinco plantas con competencia completa por genotipo que fueron disecadas en órganos aéreos y subterráneos, los cuales se pusieron a secar por 72 h en una estufa con circulación forzada de aire caliente (75 °C) hasta alcanzar su peso seco constante (g); al sumar la bio-

masa de los diferentes órganos se obtuvo la biomasa total de la planta. Además de lo anterior, en cada ocasión se tomaron submuestras de cinco hojas ubicadas en la parte intermedia de cada planta y en un integrador de área foliar (LI-COR, LI-3100) se midió el área de los folíolos (cm²); las hojas correspondientes a cada submuestra fueron secadas por separado y con los datos de la biomasa y del área de las láminas foliares se obtuvieron modelos de regresión que permitieron estimar el área foliar total de la planta.

Con los datos promedio estimados para cada muestreo, mediante el análisis de crecimiento funcional (Mora *et al.*, 2005), tanto de la cantidad de biomasa como de la magnitud del área foliar, se calcularon los índices de eficiencia siguientes:

Tasa relativa de crecimiento. Se estimó con la ecuación: $TRC = \ln W_2 - \ln W_1 / t_2 - t_1$, donde $\ln W_2$ y $\ln W_1$ son el logaritmo natural de la cantidad de biomasa final e inicial, de la planta completa u otros órganos individuales en un intervalo de tiempo, y t_2 y t_1 son el momento final e inicial de tal periodo; siendo sus unidades g·g⁻¹·d⁻¹ (Hunt, 1982).

Tasa de asimilación neta. Se estimó mediante la ecuación: $TAN = (W_2 - W_1) / (L_2 - L_1) \times (\ln L_2 - \ln L_1) / (t_2 - t_1)$, en la que W_2 y W_1 y L_2 y L_1 son la cantidad de biomasa y tamaño del área foliar total de la planta, respectivamente, al final e inicio de un periodo y \ln es el logaritmo natural; se midió en g·cm⁻²·d⁻¹ (Hunt, 1982).

Tasa de asimilación económica neta (TAEN). Se estimó mediante la ecuación anterior, aunque en este caso sólo se consideró la biomasa de los tubérculos (McCollum, 1978); también se expresó en g·cm⁻²·d⁻¹.

Tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Fue estimada por medio de la fórmula: $TCC = [(W_2 - W_1) / (t_2 - t_1)] / S$, donde S fue el área de terreno ocupado por la planta; se expresó en g·m⁻²·d⁻¹ (Hunt, 1982).

Índice de cosecha. Fue obtenido mediante la fórmula: $IC = (\text{Biomasa total de tubérculos por planta} / \text{Biomasa total por planta}) \times 100$ (Mackerron y Heilbronn, 1985), a los

CUADRO 1. Características agronómicas de cinco genotipos de papa. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

Genotipo	Núm. del CIP	Año de liberación	Origen taxonómico ²	Resistencia a <i>P. infestans</i>	Tipo de planta	Ciclo biológico	Productividad
Alpha	800050	1925	<i>tbr</i>	Muy baja	Compacta baja	Precoz	Alta
Puebla	750851	1984	<i>tbr</i> , and	Baja	Compacta alta	Tardío	Media
Norteña	750815	1992	<i>tbr</i> , and, <i>dms</i>	Alta	Compacta baja	Intermedio	Alta
C-771A11	-	-	<i>tbr</i> , and, <i>dms</i>	Muy alta	Compacta baja	Intermedio	Alta
C-676014	-	-	<i>tbr</i> , and, <i>dms</i>	Muy alta	Compacta alta	Intermedio	Alta

²tbr: tuberosum; and: andígena; dms: demissum.

85 dde, cuando los tubérculos habían madurado y el follaje estaba en senescencia.

En el último muestreo, a los 85 dde, los tubérculos producidos por cada planta se clasificaron con base en las categorías de calidad siguientes:

Número de tubérculos comerciales (NTC). Aquellos que alcanzaron un peso fresco mayor a 50 g y estuvieron sanos y bien formados.

Número de tubérculos no comerciales (NTNC). Fueron aquellos tubérculos cuyo peso fresco fue menor a 50 g, o mayor a éste pero estuvieron deformados o mostraron daño mecánico (rajaduras) o manchas en la piel.

El rendimiento total de tubérculo por planta (g) se obtuvo mediante la suma del rendimiento de tubérculo comercial (RTC) y rendimiento de tubérculo no comercial (RTNC), que se obtuvieron al pesar los tubérculos comerciales y tubérculos no comerciales, respectivamente.

Para hacer la interpretación y análisis de los datos obtenidos, los índices de eficiencia se graficaron y en los datos del rendimiento de tubérculo se obtuvieron los estadísticos básicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasa relativa de crecimiento

La TRC fue elevada al inició del desarrollo de las plantas y, conforme transcurrió el tiempo tendió a disminuir hasta ser negativa entre los 80 y 85 dde, principalmente en los órganos aéreos (Figura 1), lo cual coincide con resultados de otras investigaciones (Collins, 1977; Dripps y Smilowitz, 1989; Oliveira *et al.*, 2000). Debido a que este índice es muy afectado por los factores ambientales y cualquier desviación de éstos produce efectos negativos (Milthorpe y Moorby, 1982), la tendencia observada posiblemente sea compensada por condiciones que se vuelvan progresivamente más favorables al cultivo, lo cual involucra un manejo agronómico eficiente en el suministro adecuado y oportuno de humedad y de nutrimentos como lo indican Oliveira *et al.* (2000) y Rajwade *et al.* (2000).

Planta completa

Al considerar a la planta completa fueron evidentes las diferencias entre genotipos y etapas fenológicas para la TRC (Figura 1a). Durante la etapa vegetativa (7 a 14 dde) varió de 0.20 a 0.39 g·g⁻¹·d⁻¹, y fue más alta en Puebla y C-676014, intermedia en Norteña y baja en Alpha y C-771A11. En todos los genotipos tendió a disminuir con el transcurso del tiempo, de manera que a los 50 dde, durante la etapa de plena tuberización, en promedio había

disminuido 80 %, y al finalizar el ciclo fue casi nula; estos resultados son similares a los obtenidos por Ezeta y McCollum (1972) y Sale (1973), y se pueden atribuir a la proporción diferencial de órganos en crecimiento durante el desarrollo de las plantas, ya que durante la etapa vegetativa los tejidos meristemáticos se encuentran en mayor proporción y en la etapa reproductiva tienden a disminuir, de manera que en la madurez comercial de los tubérculos es mínima la actividad meristemática y adquiere poca importancia práctica (Milthorpe y Moorby, 1982; Mora *et al.*, 2005).

El comportamiento genotípico diferencial de la TRC también se relacionó con la duración de las etapas fenológicas, principalmente la formación de estolones y la tuberización (Mora, 1999), con la capacidad de formar hojas, el aumento del área foliar, y la longitud y diámetro del tallo, características que fueron contrastantes entre los genotipos Puebla y C-676014 con respecto a Alpha y C-771A11, posiblemente debido a que los primeros tuvieron mayor proporción de tejidos meristemáticos que originaron mayor número de órganos en crecimiento debido a su hábito de crecimiento y tipo de planta (Mora *et al.*, 2005).

Órganos aéreos

La TRC de los órganos aéreos durante la etapa vegetativa (7 a 14 dde) varió entre 0.20 y 0.30 g·g⁻¹·d⁻¹ y posteriormente tendió a disminuir (Figura 1b). En los primeros 28 días decreció entre 39 y 46 % del valor inicial; entre los 43 y 50 dde, en promedio representó sólo 20 % de éste y cesó a los 70-82 dde; al transcurrir de 80 a 85 % del ciclo biológico, la contribución de la biomasa del vástago sobre el nuevo crecimiento fue casi nula, porque la división celular había disminuido significativamente (Hunt, 1990). Los valores negativos que se obtuvieron entre 6 y 15 días antes de finalizar el ciclo biológico se pueden atribuir a la reducción de biomasa de estos órganos, debido a la senescencia foliar y la pérdida de hojas, así como a la retranslocación de fotosintatos hacia los tubérculos en crecimiento (Mora *et al.*, 2005).

Hasta los 70 dde, este índice fue diferente entre los genotipo estudiados por la misma capacidad diferencial de cada uno de ellos para inducir, promover y generar nuevas ramas y de formar nuevas hojas, que en forma conjunta representan la mayor proporción de meristemas y de órganos en crecimiento. En este caso, solo los genotipos Puebla, C-771A11 y C-676014 se comportaron en forma sobresaliente durante la mayor parte de su ciclo biológico.

Órganos subterráneos

También en la etapa vegetativa, la TRC de los órganos subterráneos alcanzó valores altos, desde 0.20 hasta 0.39 g·g⁻¹·d⁻¹ (Figura 1c), que disminuyeron con el transcurso del tiempo de manera que a los 28 y 43 dde representaron

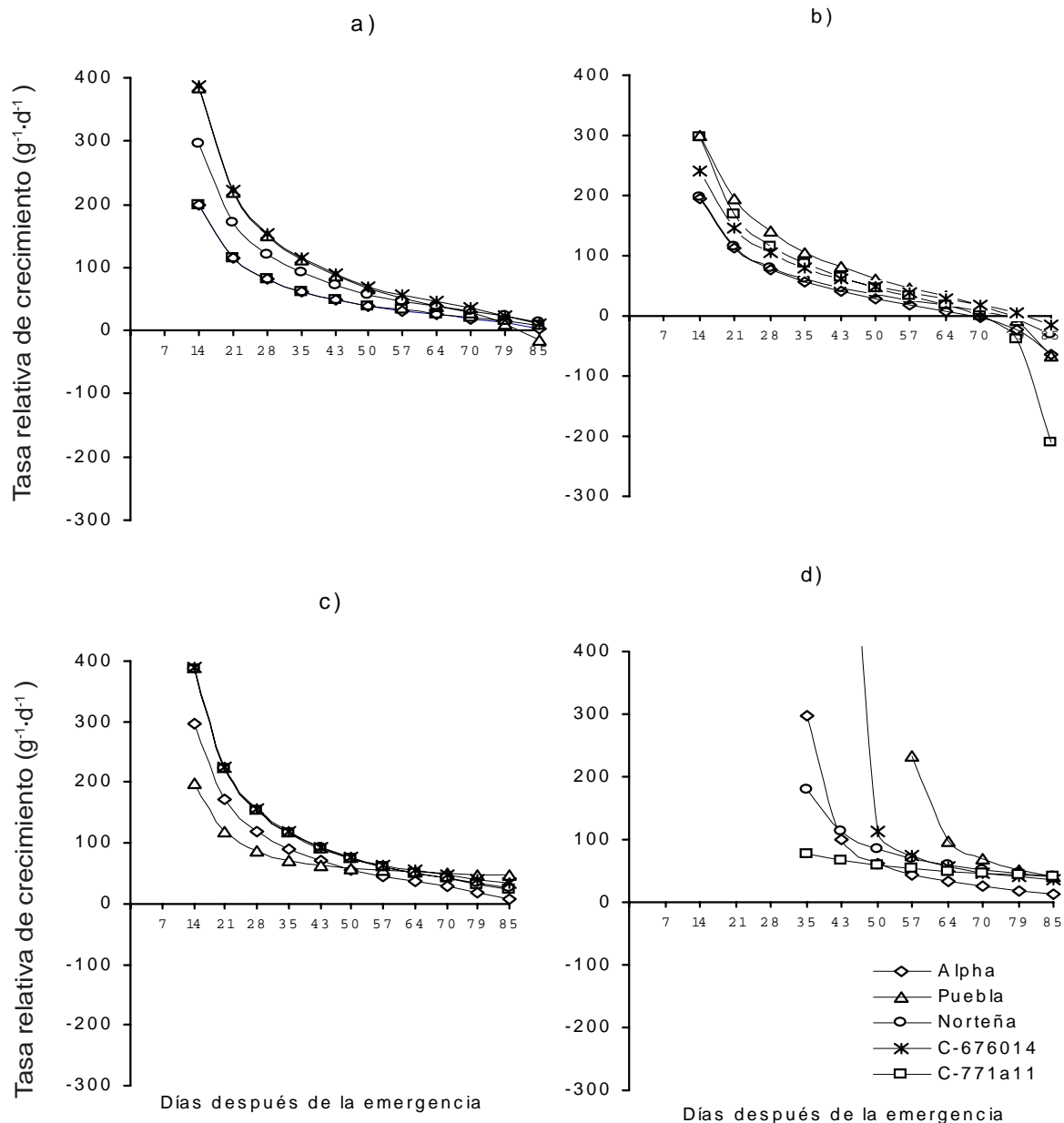


FIGURA 1. Tasa relativa de crecimiento de cinco genotipos de papa, en función del tiempo después de la emergencia: a) Planta completa; b) Órganos aéreos; c) Órganos subterráneos; d) Tubérculos. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

entre 44 y 20 %, respectivamente, de éstos. El genotipo Puebla se comportó de manera contrastante con respecto a los demás, debido a la duración prolongada de sus etapas fenológicas, inicio tardío de la tuberización (Mora, 1999) y mantenimiento activo del crecimiento de los órganos aéreos y subterráneos por más tiempo (Mora *et al.*, 2005), lo cual ocasionó mayor competencia intraplanta para satisfacer la demanda de fotosintatos y que los órganos aéreos fueran más favorecidos que los subterráneos.

La TRC de los órganos subterráneos indicó mayor eficiencia en la acumulación de biomasa en las raíces, estolones y tubérculos durante la etapa vegetativa y reproductiva inicial posiblemente debido a que, como lo señala Ezeta y

McCollum (1972), en esas etapas de desarrollo las plantas tuvieron mayor capacidad de diferenciación y alargamiento celular, con respecto a lo que ocurrió casi al terminar el ciclo biológico del cultivo, cuando solamente los tubérculos estaban acumulando biomasa por retraslocación de fotosintatos de los órganos aéreos (Mora *et al.*, 2005).

Tubérculos

Al inicio de la tuberización, entre 35 y 57 dde, se obtuvo la máxima TRC de los tubérculos (Figura 1d); en los genotipos precoces, de porte bajo y hábito de crecimiento determinado (Alpha, Norteña y C-771A11) varió

entre 0.08 y 0.30 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, y en los de ciclo intermedio a tardío, porte alto y hábito indeterminado (Puebla y C-676014) fue de 0.23 a 0.85 $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$. En el genotipo C-771A11, este índice se mantuvo relativamente constante hasta la madurez comercial, en comparación con los demás genotipos en los que ocurrió una disminución considerable en los primeros 7 a 15 días del desarrollo, la cual continuó hasta finalizar el ciclo biológico.

La duración de periodo de tuberización fue diferente en los genotipos estudiados: 42 días en C-771A11, 28 a 35 días en Alpha, Norteña y C-676014 y 20 días en Puebla (Mora, 1999), y durante este tiempo la tasa relativa de crecimiento de esos órganos también se comportó diferente entre genotipos y en forma descendente (Figura 1d).

Tasa de asimilación neta y de asimilación económica neta

De acuerdo con el desarrollo del cultivo, la cinética de la TAN fue variable: fluctuó entre 0.01 y 0.10 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ durante la etapa vegetativa (7 a 14 dde), aumentó a 0.17-0.30 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ al inicio de la tuberización (28 a 50 dde), fue de 0.21-0.57 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ durante la tuberización (57 a 64 dde), y a partir de los 70 dde disminuyó rápidamente hasta ser nula (Figura 2a). Este comportamiento discrepa con lo observado en otros estudios, donde se demuestra que este índice decrece durante todo el ciclo biológico debido a la

mayor edad y senescencia de las hojas, a la reducción de la radiación solar incidente en el interior del dosel y a la mayor respiración de los tejidos no fotosintéticos (Moorby, 1970; Collins, 1977; McCollum, 1978).

Durante la etapa vegetativa (7 a 14 dde) los genotipos C-771A11 y Puebla tuvieron menos eficiencia fotosintética (0.011 a 0.023 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) con respecto a Alpha y C-676014 (0.092 a 0.101 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); no obstante, entre los 14 y 57 dde destacaron los genotipos Alpha y C-771A11 porque mantuvieron la máxima tasa fotosintética y mostraron un incremento considerable de ésta, respectivamente, con relación a los demás genotipos (Figura 2a); esa mayor eficiencia puede estar relacionada, principalmente, con su hábito de crecimiento y con el momento de inicio de la tuberización (Mora, 1999; Mora *et al.*, 2005), más que con otras características de la planta como la magnitud del área foliar, disposición de las hojas, longitud de los entrenudos y grado de ramificación, principalmente (Rajwade *et al.*, 2000).

La disminución de la TAN después de alcanzar el máximo valor, indica que la capacidad fotosintética del dosel tiende a disminuir continuamente con el crecimiento y expansión del área foliar (Collins, 1977) y puede cesar en el momento en que las plantas alcanzan su máxima área foliar debido, principalmente, al sombreado que ocurre entre las hojas de los diferentes estratos del dosel, lo cual ocasiona que la respiración tienda a ser mayor que la

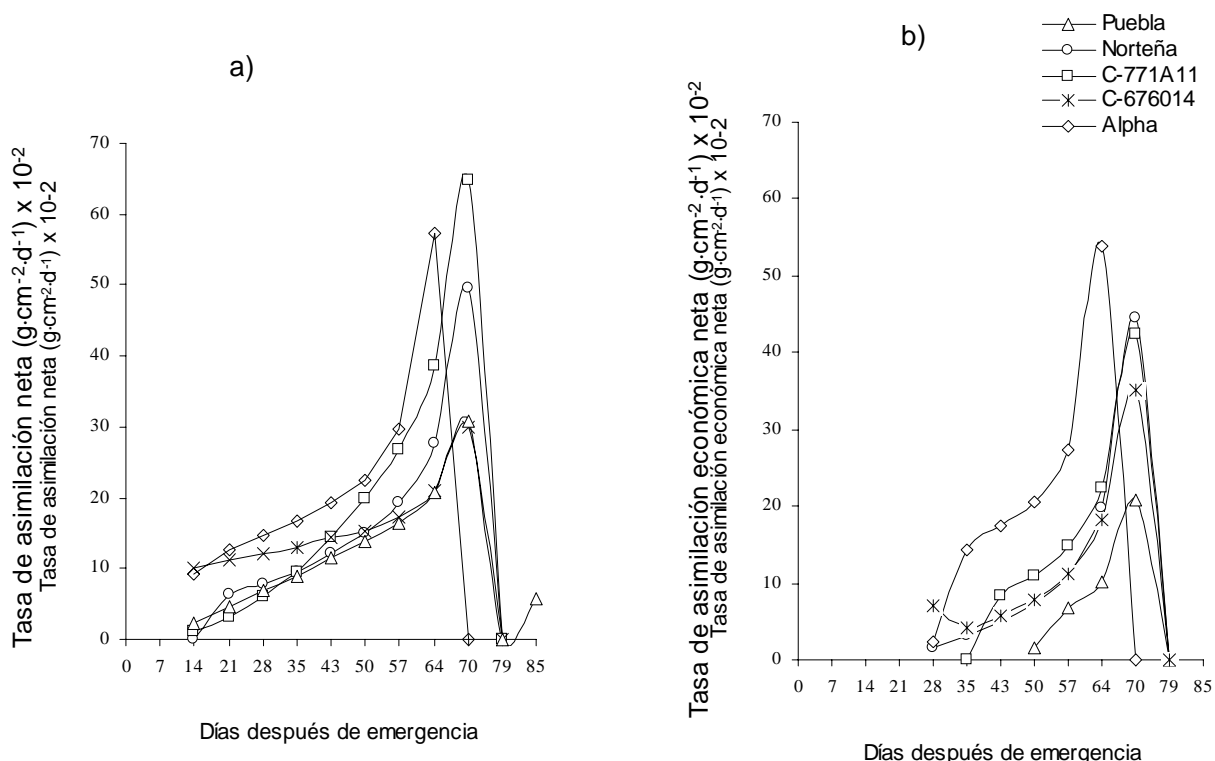


FIGURA 2. Tasa de asimilación neta (a) y tasa de asimilación económica neta (b) de cinco genotipos de papa, en función del tiempo después de la emergencia. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

fotosíntesis (Morby, 1970). El incremento observado a los 79 dde, en el genotipo Puebla, es difícil de explicar pues solo se esperaría en respuesta al aumento en la tasa fotosintética o la reducción del área foliar o de la respiración; no obstante, esas variables no son independientes entre sí y aunque el área foliar disminuyó es imposible que la respiración lo hiciera (Morby, 1970; Collins, 1976).

El incremento en la TAN casi al finalizar el ciclo de cultivo (Figura 2a), pudo deberse a las variaciones intraespecíficas de este índice, así como al uso de diferentes modelos matemáticos para relacionar el índice de área foliar y la biomasa total con el tiempo, generando un comportamiento variable; se considera también que la papa se comporta diferente a otras especies porque acumula más reservas en los tubérculos que en la parte aérea, lo cual al asociarse con la senescencia y pérdida de hojas sugiere mayor eficiencia casi al final del ciclo biológico (Oliveira *et al.*, 2000).

La cinética de la TAEN y de la TAN fueron similares (Figura 2b), debido a que el crecimiento de los tubérculos influye significativamente sobre el de la planta completa (Ezeta y McCollum, 1972; Mora *et al.*, 2005); la TAEN fue baja (0.001 y $0.017 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) al inicio de la tuberización, después aumentó continuamente hasta los 64-70 dde para alcanzar 0.035 - $0.054 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, y disminuyó súbitamente hasta ser nula a los 70-79 dde, lo cual coincide parcialmente con los resultados obtenidos por McCollum (1978). El genotipo Alpha fue más eficiente durante toda la etapa de tuberización, contrario al caso de Puebla; en los genotipos restantes la eficiencia fue intermedia.

Tasa de crecimiento del cultivo

La TCC en la planta completa, órganos aéreos, órganos subterráneos y tubérculos, mostró diferencias entre genotipos durante todo el ciclo de cultivo (Figura 3). En la planta completa y los órganos aéreos, la cinética de este índice fue ascendente desde la emergencia hasta los 43 y 57 dde cuando alcanzó el máximo valor, y después tendió a disminuir hasta ser nula (Figura 3a y 3b); en los órganos subterráneos el máximo valor se obtuvo entre los 64 y 79 dde y, en función del genotipo, pudo aumentar hasta los 85 dde (Figura 3c), debido básicamente al comportamiento de los tubérculos (Figura 3d). En forma general estos resultados coinciden con los obtenidos en otros estudios (Milthorpe y Moorby, 1982; Dripps y Smilowitz, 1989; Oliveira *et al.*, 2000; Rajwade *et al.*, 2000).

Planta completa

La cinética de la TCC de la planta completa fue similar en todos los genotipos (Figura 3a); inició con valores muy bajos a partir de la emergencia, aumentó paulatinamente hasta los 64-70 dde y después disminuyó. Entre los 7 y 57 dde, este índice fue similar en los genotipos

Alpha y C-771A11 y alcanzó un valor máximo de $184 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; mientras que en Puebla, Norteña y C-676014, fluctuó entre 264 y $386 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

Órganos aéreos

En los primeros 35 días del desarrollo, la TCC de los órganos aéreos aumentó en forma constante y fue relativamente similar en todos los genotipos; sin embargo, a partir de ese momento las diferencias entre éstos fueron evidentes (Figura 3b). El máximo valor fluctuó entre 55 y $74 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ en los genotipos de hábito de crecimiento determinado, como Alpha y Norteña, y entre 130 y $164 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ en C-676014 y Puebla que tienen hábito de crecimiento indeterminado; después de alcanzar los máximos valores, tendió a disminuir hasta tomar valores negativos entre 15 y 4 días antes de terminar el ciclo biológico, posiblemente debido a la translocación de fotosintatos hacia otros órganos que aun estaban creciendo (Ezeta y McCollum, 1972), siendo más acelerada la disminución en los genotipos con ciclo biológico tardío y hábito de crecimiento indeterminado.

Órganos subterráneos

La máxima tasa de crecimiento de los órganos subterráneos (177 a $248 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) se obtuvo entre los 64 y 79 dde, en los genotipos Alpha, Norteña y C-771A11, respectivamente (Figura 3c), en tanto que en Puebla y C-676014 fue de 239 y $306 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, en cada caso, a los 85 dde. Estos resultados explican parcialmente la importancia que Alpha ha adquirido en la mayoría de las áreas productoras de papa en el país donde es ampliamente utilizada ya que para los productores es deseable que el periodo de siembra a cosecha no exceda 100 días dadas las restricciones en la duración de la estación del crecimiento y los elevados costos de producción.

Tubérculos

El comportamiento de la tasa de crecimiento de los tubérculos fue, en general, diferente a la mencionada por Moorby (1970), ya que se observaron tres tendencias diferentes de acuerdo con el genotipo (Figura 3d). En Alpha la tendencia fue curvilínea, con valores de 16.4 y 95.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a los 28 y 85 dde, respectivamente, y máximo de $166.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ a los 57 dde; este comportamiento posiblemente es resultado del ciclo biológico corto y rápido inicio de la tuberización (Mora, 1999); sin embargo, difiere del que mostró Norteña y C-771A11 que tienen características morfológicas y fenológicas similares a Alpha. En esos genotipos se apreció una tendencia exponencial a partir del inicio de la tuberización, y se alcanzaron valores de 373 y $331 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectivamente, a los 85 dde. Los genotipos C-676014 y Puebla, de ciclo intermedio a tardío y crecimiento indeterminado, mostraron una fase exponencial de 7 y 14 días, respectivamente, después de la cual fue lineal con valores que variaron de

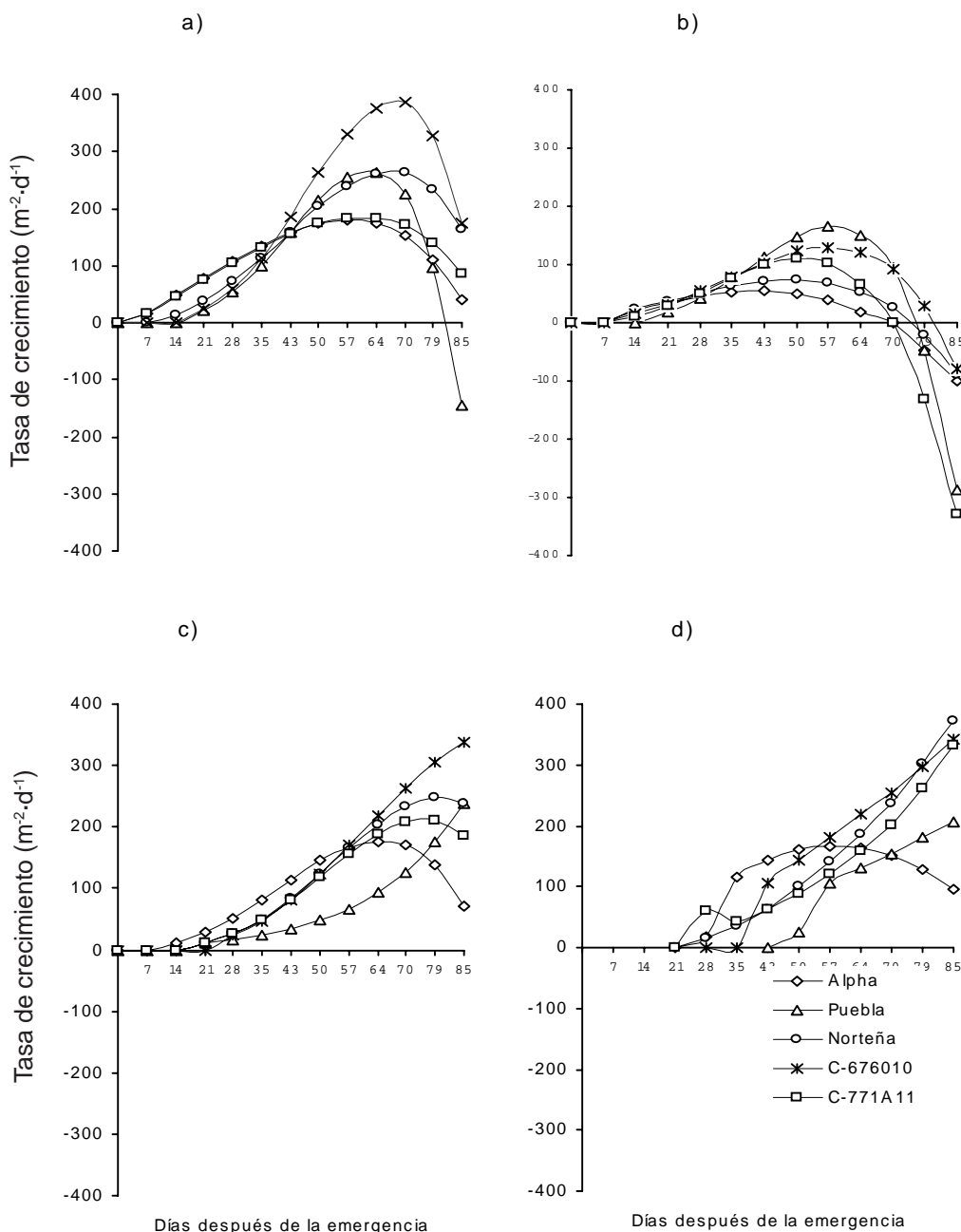


FIGURA 3. Tasa de crecimiento del cultivo de cinco genotipos de papa, en función del tiempo después de la emergencia: a) Planta completa; b) Órganos aéreos; c) Órganos subterráneos; d) Tubérculos. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

107 a 341 y 107 a 128 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, en cada caso; esta tendencia es la única que coincide con lo señalado por Moorby (1970).

Aunque al inicio de la tuberización la tasa de crecimiento de los tubérculos de los genotipos Alpha, Norteña y Puebla (14.2 a 25.7 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) son muy similares a las indicadas por Dawes *et al.* (1983), en C-771A11 y C-676014 fueron mayores (60.3 a 106.6 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) y podrían indicar rendimientos potenciales más altos, siempre y cuando la duración de la tuberización fuese prolongada, como se observa en algunos de estos genotipos (Mora, 1999), ya que bajas tasas de crecimiento de los tubérculos

y bajos rendimientos se deben, principalmente a un área foliar reducida al inicio de la tuberización; no obstante, esta característica puede ser controlada por medio de la densidad de población, la fertilización del cultivo y otros factores del ambiente de producción fácilmente controlables a través del manejo agronómico del cultivo.

Índice de cosecha

A los 85 dde hubo diferencias entre genotipos con relación al índice de cosecha (Figura 4); los genotipos más eficientes fueron Alpha, Norteña y C-771A11 ($0.84 \leq IC \leq 0.92$), mientras que C-676014 tuvo eficiencia

intermedia (IC=0.65) y Puebla fue poco eficiente (IC=0.48). Estos resultados coinciden con los informados en otros estudios (Ezeta y McCollum, 1972; Rajwade *et al.*, 2000).

Como fue observado por Jefferies y Mackerron (1993) en genotipos precoces de papa, en este estudio el índice de cosecha fue muy alto (84 a 91 %) en Alpha, Norteña y C-771A11, posiblemente debido a que la biomasa de los órganos aéreos contribuyó significativamente sobre la biomasa que se acumuló en los tubérculos, situación contraria a lo que ocurrió en los genotipos tardíos (71 a 74 %), como Puebla, en los que existió elevada competencia entre todos los órganos en crecimiento, tanto de la parte aérea como subterránea siendo, en este caso, los tubérculos desfavorecidos pues inician tardíamente su desarrollo (Mora, 1999; Mora *et al.*, 2005), aunado a que su tasa de crecimiento fue baja.

Los resultados del estudio demuestran indirectamente, que a través del mejoramiento genético de la papa, realizado en México, se han modificado algunas características determinantes de su productividad, como son la acumulación de biomasa total y el índice de cosecha, por lo cual los genotipos recientemente liberados (Norteña) o aún en experimentación (C771A11), son tan productivos como Alpha (Cuadro 2). Bajo las condiciones ambientales y de manejo en que se realizó esta investigación, la eficiencia en acumulación de biomasa en los tubérculos estuvo muy relacionada con la época en que se mejoraron y liberaron los genotipos involucrados: Puebla liberado en los años setenta, fue menos eficiente (IC=0.48) debido a características como el tipo de planta, hábito de crecimiento y duración del ciclo biológico (Mora, 1999; Mora *et al.*, 2005); Norteña, liberado en los años ochenta y C-771A11, en proceso de liberación, fueron 75 % más eficientes (IC=0.84); mientras que C-676014, también en proceso de liberación, tuvo un comportamiento intermedio (IC=0.65) que superó en 35 % al de Puebla; sin embargo, ningún genotipo nacional igualó en eficiencia fisiológica a la variedad Alpha

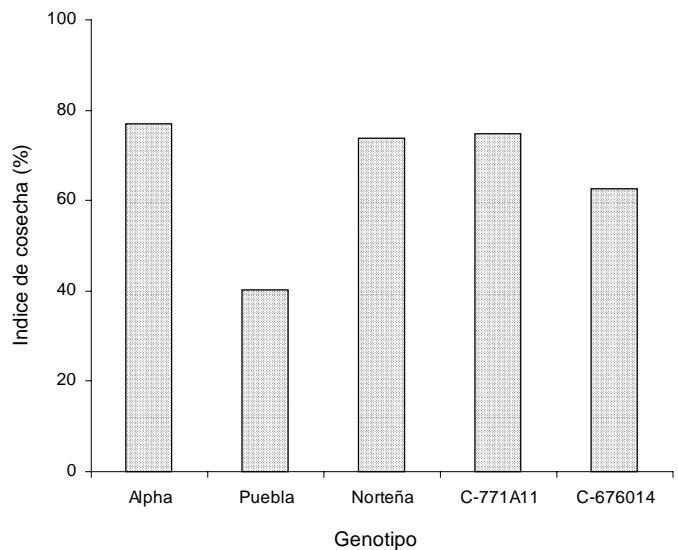


FIGURA 4. Índice de cosecha de cinco genotipos de papa. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

(IC=0.92), liberada a principios del siglo XX en Europa.

Estos resultados coinciden con lo informado por Errebhi *et al.* (1999) quienes indican que la distribución de biomasa hacia los tubérculos está muy relacionada con el nivel de domesticación de las especies de la papa, alcanzando 84 % en los genotipos cultivados de *S. tuberosum*, 7 % en los silvestres y 38 % en los híbridos entre ambos. En este estudio, Alpha es ejemplo de genotipo puro derivado de *S. tuberosum*, Puebla mantiene características combinadas de *S. tuberosum* y *S. andigena*, y los demás han sido seleccionados de familias segregantes en las que, además de las dos especies anteriores, también ha intervenido *S. demissum*.

Rendimiento de tubérculo

El número total de tubérculos por planta varió entre 7

CUADRO 2. Rendimiento y número de tubérculos por planta en cinco genotipos de papa establecidos en secano. Metepec, Estado de México. Primavera-Verano, 1996.

Genotipo	RTT ^y (g)	Rendimiento por planta				NTT Núm	Tubérculos por planta			
		RTC		RTNC			NTC		NTNC	
		(g)	(%)	(g)	(%)		Núm	(%)	Núm	(%)
Alpha	1,048	656	56.4 ^z	391	94.0	12	3	25.0	9	90.0
Puebla	730	632	54.3	99	23.8	7	5	41.6	2	20.0
Norteña	1,451	1,164	100.0	286	68.8	22	12	100.0	10	100.0
C-676014	1,204	788	67.7	416	100.0	12	6	50.0	6	60.0
C-771A11	1,197	1,017	87.4	180	43.3	10	7	58.3	3	30.0
Media	1,126	851	-	274	-	13	6	-	6	-
CV (%)	40	40	-	75	-	5	42	-	78	-

^yRTT: rendimiento total de tubérculo; RTC: rendimiento de tubérculo comercial; RTNC: rendimiento de tubérculo no comercial; NTT: número total de tubérculos; NTC: número de tubérculos comerciales; NTNC: número de tubérculos no comerciales.

^zValor con relación al 100 % de la variable respectiva en cada columna.

y 22, mientras que el número de tubérculos comerciales y de tubérculos no comerciales lo hicieron de 3 a 12 y de 2 a 12, respectivamente, y en todos los casos destacó la variedad Norteña que superó entre 42 y 75 % al número de tubérculos comerciales de los genotipos restantes (Cuadro 2); sin embargo, tales diferencias no se apreciaron en el rendimiento total de tubérculo por planta.

El comportamiento sobresaliente del rendimiento total de tubérculo por planta en la mayoría de los genotipos evaluados, excepto en Puebla, se puede atribuir a los elevados valores que alcanzó la tasa relativa de crecimiento y la tasa de crecimiento de los tubérculos, así como la tasa de asimilación económica neta, además de la duración relativamente prolongada del periodo de tuberización como lo indica Mora (1999).

El mayor rendimiento de tubérculo comercial en los genotipos C-771A11 y Norteña (1017 a 1164 g·pta⁻¹) con respecto al de Alpha y C-676014 (1048 a 1204 g·pta⁻¹) se debió al mayor número de tubérculos comerciales, ya que en estos últimos genotipos el número de tubérculos no comerciales fue elevado posiblemente debido a la elevada tasa de asimilación económica neta, que tiende a ser constante entre los 35 y 57 dde, lo cual provoca malformación o daño mecánico (rajeteo) de los tubérculos.

LITERATURA CITADA

- COLLINS, W. B. 1977. Comparison of growth and tuber development in three potato cultivars with diverse canopy size. *Can. J. Plant Sci.* 57: 797-801.
- CORPORACIÓN COLOMBIANA INTERNACIONAL (CCI). 2003. Perfil del Mercado Agroalimentario de México. Bogotá, Colombia. 54 p.
- DRIPPS, J. E.; SMILOWITZ, Z. 1989. Growth analysis of potato plants damaged by Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) at different plant growth stages. *Env. Entom.* 18(5): 854-867.
- ERREBHI, M.; ROSEN, C. J.; LAVER, F. I.; MARTIN, M. W.; BAMBERG, J. B. 1999. Evaluation of tuber-bearing species for nitrogen use efficiency and biomass partitioning. *Amer. J. Potato Res.* 76: 143-151.
- EZETA, F. N.; MCCOLLUM, R. E. 1972. Dry matter production and nutrient uptake and removal by *Solanum andigena* in the Peruvian Andes. *Amer. Potato J.* 49: 151-163.
- GARCÍA, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana). 4ª edic. Instituto de Geografía. UNAM. México. pp. 132.
- HUNT, R. 1982. *Plant Growth Curves*. Edward Arnold. London. 247 p.
- HUNT, R. 1990. *Basic Growth Analysis*. Plant Growth Analysis for Beginners. Unwin Hyman LTD. London. 112 p.
- JEFFERIES, R. A.; MACKERRON, K. L. 1993. Responses of potato genotypes to drought. II. Leaf area index, growth and yield. *Ann. Appl. Biol.* 122: 105-112.
- LINARES, Y.; GUTIÉRREZ, A. 2002. El mercado mundial de la papa. *Revista Aldea Mundo* 5(10): 59-69.
- MACKERRON, D. K. L.; HEILBRONN, T. D. 1985. A method for estimating harvest indices for use in surveys of potato crops. *Potato Res.* 28: 279-282.
- MCCOLLUM, R. E. 1978. Analysis of potato growth under differing P regimes. II. Time by P-status interaction for growth and leaf efficiency. *Agron. J.* 70: 58-67.
- MILTHORPE, F. L.; MOORBY, J. 1982. *An Introduction to Crop Physiology*. Cambridge University Press. UK. 202 p.
- MOORBY, J. 1970. The production, storage, and translocation of carbohydrates in developing potato plants. *Ann. Bot.* 34: 297-308.
- MORA A., R. 1999. Fenología de la papa. *Revista Agronegocios en México* 36(3): 3-6.
- MORA A., R.; ORTIZ C., J.; MENDOZA C., M. C.; RIVERA P., A.; LOZOYA S., H.; COLINAS L., M. T. 2005. Cinética de la acumulación y distribución de biomasa en genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Rev. Chapingo Serie Horticultura* 11(1): 135-142.
- OLIVEIRA A., N. A. DE; RODRÍGUEZ, J. D.; ZAMBELO DE P, S. 2000. Análise de crescimento na cultura da batata a diferentes laminas de irrigacao. *Pesq. Agrop. Bras.* 35(5): 901-907.
- RAJWADE, V. B.; BANAFAR, R. N. S.; PATHAK, A. C. 2000. Growth analysis of potato in relation to biodynamic package and organic manures with chemical fertilizers. *J. Indian Potato Assoc.* 27(1/2): 55-58.
- RUBIO C., O. 1997. Aportaciones del programa de papa del INIFAP, pp. 21-30. *In: Simposium Internacional de la Papa*. Campo Experimental Valle de Toluca. Conjunto SEDAGRO. Rancho San Lorenzo, Metepec, Estado de México.
- SALE, P. J. M. 1973. Productivity of vegetable crops in a region of high solar input. I. Growth and development of the potato (*Solanum tuberosum* L.). *Aust. J. Agric. Res.* 24: 233-246.
- SANDS, P. J.; HACKETT, C.; NIX, H. A. 1983. A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). I. Derivation from well-managed field crops. *Field Crops Res.* 2: 309-331.
- SILVA O.; C. A. DA. 2000. Potato crop growth as affected by nitrogen and plant density. *Pesq. Agrop. Bras.* 35: 939-950.
- VICTORIO, R. C.; MORENO, U.; BLACK JR, C. C. 1986. Growth, partitioning and harvest index of tuber-bearing *Solanum* genotypes grown in two contrasting environments. *Plant Physiol.* 82: 103-108.