

DESARROLLO DE UNA VARIEDAD DE PAPA ANDIGENA EN LOS ANDES VENEZOLANOS Y SU SIMULACION POR EL MODELO SUBSTOR

GROWTH OF AN ANDIGENUM POTATO VARIETY IN THE VENEZUELAN ANDES AND ITS SIMULATION BY THE SUBSTOR MODEL

*Lina Sarmiento*¹ y *Walter Bowen*²

¹ *Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela. E-mail:lsarmien@ula.ve.*

² *IFDC/CIP-Quito, Casilla 17-21-1977, Quito, Ecuador. E-mail:w.bowen@cgiar.org*

RESUMEN

En este trabajo se analiza el crecimiento y la dinámica de absorción de nitrógeno de una variedad de papa de la subespecie *andigenum* en la alta montaña tropical venezolana y se utiliza esta información para calibrar y validar el modelo SUBSTOR. Una vez validado, el modelo es utilizado en un ejercicio de simulación para ilustrar su posible aplicación al diseño de alternativas agronómicas que permitan optimizar la fertilización nitrogenada. El diseño experimental consistió en cultivar dos parcelas con dosis de fertilización de 32 y 160 kg ha⁻¹ de N respectivamente. A lo largo del cultivo se realizaron cinco muestreos de biomasa de hojas, tallos, raíces y tubérculos y se analizó el contenido de N de cada compartimiento. La información de la parcela con mayor fertilización fue utilizada para la calibración del modelo y la de la parcela con menor fertilización para su validación. Los coeficientes genéticos obtenidos en la calibración difieren substancialmente de los reportados para la subespecie *tuberosum* en condiciones de clima templado, lo que pudiera ser debido a diferencias en el patrón de crecimiento de esta subespecie o al efecto del clima. Una vez calibrado, el modelo logra simular correctamente la biomasa foliar y de tubérculos, pero subestima la biomasa de tallos y sobreestima la de raíces. En cuanto al nitrógeno, la simulación resultó adecuada para hojas y raíces pero sobreestimó el contenido de N en tallos y tubérculos. El ejercicio de simulación sugiere que el fraccionamiento de la fertilización pudiera permitir aumentar la producción y disminuir las pérdidas por drenaje, sin embargo, el modelo requiere de una calibración más completa para poder utilizarlo con mayor confiabilidad en este tipo de aplicaciones.

Palabras clave: *Solanum tuberosum andigenum*, nitrógeno, fertilización, modelización, calibración, validación, coeficientes genéticos, Andes.

ABSTRACT

The dynamics of growth and nitrogen uptake of an andigenum potato variety were analysed in the high tropical Venezuelan Andes. This information was used to calibrate and validate the SUBSTOR potato model. After validation, the model was used in an exercise of simulation to illustrate how it can be applied to improve nitrogen fertilisation. The experimental design consisted of two plots that were cultivated with contrasting doses of fertilization: 32 and 160 kgN ha⁻¹. Five sequential sampling of leaf, stem, roots and tuber biomass were carried out, and the N content of each compartment was analysed. The coefficients obtained in the calibration were significantly different of those reported for the *tuberosum* varieties under temperate conditions, suggesting possible differences in the patterns of biomass allocation and crop development of this subspecies or a climatic effect. After calibration, the simulated leaf and tuber biomass were close to the measured values, but stem biomass was underestimated and root biomass overestimated. Nitrogen content was accurately simulated for leaves and roots, but overestimated for stems and tubers. The simulation exercise suggested that fractioning the fertiliser could be a good strategy to increase yield, reducing at the same time the losses by leaching. Nevertheless, the model needs a more complete calibration to be used with more confidence in this type of application.

Key words: *Solanum tuberosum andigenum*, nitrogen, fertilization, modelization, calibration, validation, genetic coefficients, Andes.

INTRODUCCION

En los Andes venezolanos se cultiva papa desde épocas prehispánicas pero su importancia comercial ha ido aumentando en las últimas décadas, siendo en la actualidad el principal cultivo de los valles altoandinos (Ministerio de Producción y Comercio 1999). El piso agroecológico de la papa comienza a aproximadamente 2000 m de altitud y se extiende hasta los páramos, con un límite superior alrededor de los 4000 m. En las zonas más bajas se utilizan variedades de ciclo corto, pertenecientes a la subespecie *tuberosum*, las cuales permiten más de una cosecha por año. A mayores altitudes se utilizan también variedades de la subespecie *andigenum*, que presentan un ciclo de vida más largo y sólo permiten una cosecha por año. Sin embargo, como la ocurrencia de heladas estacionales a estas altitudes imposibilita la realización de varias cosechas anuales, las variedades *andigenum* pueden representar una buena alternativa por su menor requerimiento de insumos.

Dada la gran importancia económica y cultural del cultivo de papa en los Andes de Venezuela y los impactos ambientales crecientes que se generan tanto por la expansión de la frontera agrícola hacia las áreas de páramo como por el uso masivo de agroquímicos, resulta prioritario poner a punto un manejo agronómico ambientalmente sustentable que minimice los efectos negativos y al mismo tiempo permita aumentar la eficiencia en el uso de los fertilizantes. Además, es de esperar que un aumento de los rendimientos incida positivamente en frenar la incorporación agrícola de áreas actualmente bajo vegetación natural y la consiguiente expansión de la frontera agrícola hacia el páramo.

Los modelos de simulación de cultivos constituyen una herramienta fundamental para un manejo agronómico sustentable. Uno de los grandes problemas que enfrenta la agronomía es la extrapolación de resultados de experimentos agronómicos puntuales a otras condiciones, variedades cultivadas o períodos de tiempo (Bowen *et al.* 1999, Gijsman y Bowen 2001). De allí el gran valor que pueden tener los modelos de simulación para optimizar las prácticas agronómicas en cada condición ecológica (Vos 1995). Los modelos pueden resultar particularmente útiles en zonas de montaña, donde la gran variabilidad climática y edáfica hace imposible la realización

de experimentos en todas las combinaciones posibles de condiciones. Además, permiten evaluar la solidez de los conocimientos disponibles y definir las prioridades de investigación (Penning de Vries y Rabbinge 1995, Bowen *et al.* 1998).

El modelo SUBSTOR forma parte de la familia de modelos DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, Tsuji *et al.* 1994). Este modelo simula el desarrollo del cultivo de papa utilizando información diaria de temperatura, precipitación y radiación solar, información sobre el perfil del suelo y detalles de las prácticas agronómicas (Hodges *et al.* 1989, Ritchie *et al.* 1995). Consta de un submodelo de desarrollo del cultivo, de un submodelo agua, que simula el agua disponible en el suelo y los diferentes flujos que intervienen en el balance hídrico y de un submodelo nitrógeno que simula las principales transformaciones y pérdidas de este nutriente. La producción potencial del cultivo es calculada diariamente en función de la radiación interceptada y luego se reduce en función de las limitaciones de agua y/o de nitrógeno. Las salidas del modelo incluyen los principales parámetros del crecimiento del cultivo, del balance hídrico y del ciclo del N.

Disponer de esta herramienta, calibrada y validada para las condiciones y variedades de papa de los Andes venezolanos, sería de gran valor para mejorar el manejo agronómico del cultivo y particularmente para mejorar la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes (Mahdian y Gallichand 1995). Dentro de un proyecto más amplio que plantea poner a punto el modelo SUBSTOR para su utilización en los Andes venezolanos, en este primer trabajo presentamos los resultados obtenidos para una variedad de papa de la subespecie *andigenum* cultivada en el piso ecológico de los páramos.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El trabajo fue realizado en el Páramo de Gavidia, ubicado en la Sierra Nevada de Mérida, cerca de la ciudad de Mucuchies (8°35'-8°45' N, 70°52'-70°57' W), a una altitud de 3400 msnm. Las características climáticas están sintetizadas en la Figura 1. La precipitación media anual es de 1329 mm, con una estación seca entre noviembre y marzo. La temperatura media es de 8,5 °C, manteniéndose relativamente constante durante todo el año, aunque la amplitud de las oscilaciones

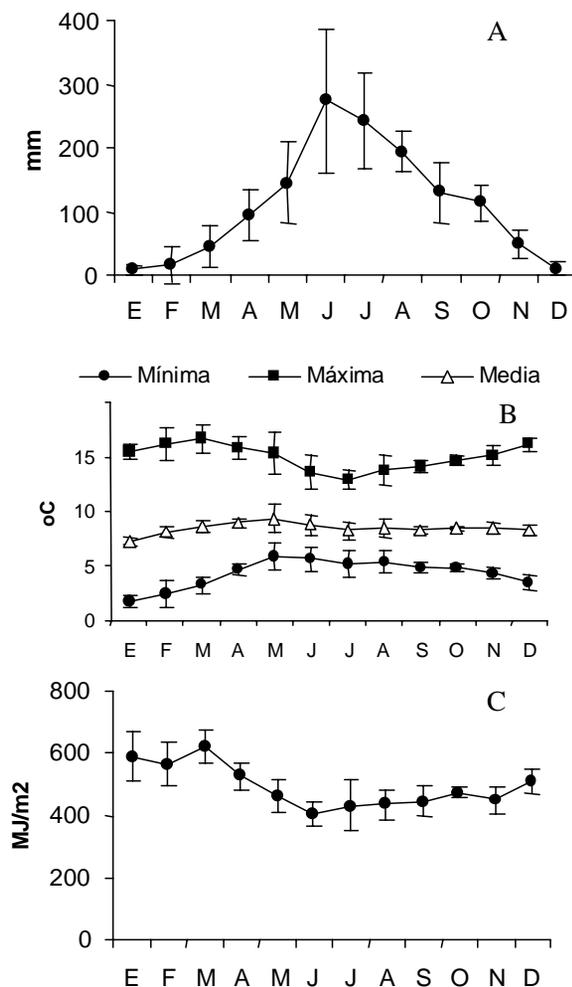


Figura 1. (A) Precipitación, (B) temperatura máxima, media y mínima y (C) radiación solar medidos en la estación climática de ICAE en el Páramo de Gavidia, a 3400 m de altitud. Los valores son promedios de 7 años.

diarias tiende a ser mayor durante la época seca, cuando se alcanzan las máximas y mínimas más extremas y cuando el riesgo de heladas nocturnas impide el cultivo de papa. La cantidad de radiación solar está directamente relacionada con el régimen de precipitaciones, presentando sus valores mayores durante la época seca. Estas características climáticas se corresponden bien con el piso ecológico del páramo, siendo la vegetación natural un típico arbustal-rosetal paramero (Monasterio 1980).

Los suelos son relativamente jóvenes y pertenecen al orden de los inceptisoles (*Ustic humitropepts*). Para la caracterización del perfil en la parcela experimental se tomaron muestras de cada uno de los horizontes y se realizaron análisis

de textura (método de Bouyocos), C total (método de walkley-black), N total (micro-kjeldahl), P intercambiable (Olsen), K, Mg y Ca (extracción con NH_4Ac a pH 7 y determinación por absorción atómica) (Tabla 1). Puede observarse que son suelos de textura franco-arenosa, fuertemente ácidos, con altos contenidos de carbono y nitrógeno y niveles medios de fósforo y bases cambiables.

Diseño del experimento de campo

Se cultivaron con papa dos parcelas adyacentes de 10×10 m, con condiciones similares de pedregosidad, pendiente, exposición, tipo de suelo, historia de uso y otras características ambientales, lo cual permite minimizar el efecto de otros factores diferentes a los tratamientos aplicados. Las parcelas fueron cultivadas con papa utilizando una fertilización de $0,2 \text{ t ha}^{-1}$ (tratamiento con baja fertilización, BF) y 1 t ha^{-1} (tratamiento con alta fertilización, AF) de NPK 16-16-08, correspondiente a 32 y 160 kg N ha^{-1} respectivamente. No se realizaron réplicas de los tratamientos ya que la finalidad del experimento no fue evaluar la respuesta del cultivo a diferentes dosis de fertilización sino calibrar y validar el modelo SUBSTOR.

Se sembró una variedad de papa local (*Solanum tuberosum* subsp. *andigena*, nombre común arbolona) que fue cultivada de acuerdo a las prácticas habituales de los campesinos de la zona. Las parcelas fueron aradas en septiembre de 1991 y dejadas en descanso hasta el 1 de abril de 1992, cuando fueron aradas nuevamente, fertilizadas y sembradas. El fertilizante fue aplicado directamente en el surco, sobre las semillas. La densidad de siembra fue de $3,74 \text{ plantas m}^{-2}$. Se realizó un aporque en junio y la cosecha el 22 de octubre de 1992.

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron cinco muestreos mensuales. En cada muestreo 10 plantas fueron colectadas de forma que cada individuo seleccionado estuviera rodeado por otros individuos que le sirvieran de borde. Para la colecta de los individuos se cortó en campo la parte aérea y se colectaron manualmente, con ayuda de una pala, los tubérculos y las raíces hasta aproximadamente 25 cm de profundidad. Cada planta fue separada en hojas, tallos, raíces, tubérculos y tubérculo madre. Posteriormente el material fue secado a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante, pesado y analizado para N total utilizando el método de micro kjeldahl.

Tabla 1. Características físico-químicas del perfil del suelo en el páramo de Gavidia, edo. Mérida. Venezuela

Prof (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH (agua)	C (%)	N (%)	P (ppm)	K (meq/100g)	Mg (meq/100g)	Ca (meq/100g)
0-10	56,2	25,5	18,3	5,65	10,20	0,68	18,0	0,40	0,08	0,62
10-25	58,6	25,2	16,2	5,70	10,40	0,67	17,5	0,20	0,06	0,49
25-50	63,3	21,7	15,0	5,75	8,08	0,50	9,5	0,18	0,04	0,39
50-55	68,7	19,8	11,5	5,75	4,80	0,28	4,0	0,11	0,04	0,35
55-70	79,0	15,5	5,5	5,68	1,33	0,08	4,0	0,08	0,04	0,34

Una estación climática fue instalada a aproximadamente 300 m de la parcela experimental, registrando diariamente la temperatura máxima y mínima, la precipitación y la radiación solar (LICOR 1200).

Para estimar la fecha de iniciación de la tuberización, los valores de biomasa de tubérculos en función del tiempo fueron ajustados a una curva logística, calculándose matemáticamente la intercepción con el eje tiempo.

La absorción de N por el cultivo fue estimada por diferencia entre el N total entre dos muestreos consecutivos. Esta estimación nos da la absorción neta, ya que no se consideran las posibles pérdidas por pluvio lavado foliar, exudación radical o descomposición.

La translocación de asimilados y de nitrógeno entre la biomasa aérea y los tubérculos durante la fase de senescencia de la biomasa aérea fue estimada como la diferencia entre la biomasa aérea (o cantidad de N) máxima y la final, considerando que las cantidades faltantes fueron transportadas a los tubérculos. Para esta estimación se ignoran otras posibles pérdidas como la descomposición y el pluvio lavado.

Calibración y validación del modelo SUBSTOR-papa

Se utilizó el modelo SUBSTOR incluido en la versión 3.5 del DSSAT. Este modelo requiere ser calibrado para los diferentes cultivares o variedades de papa. La calibración se realiza utilizando un conjunto de cinco coeficientes genéticos. Dos de los coeficientes consideran el efecto del fotoperíodo (P2) y la temperatura (TC) en el inicio de la tuberización. Otros dos coeficientes consideran las

diferencias genéticas en el desarrollo de la área foliar (G2) y en la tasa de crecimiento de los tubérculos (G3). Un coeficiente adicional reduce el crecimiento de los tubérculos en el periodo que sigue a la inducción de la tuberización (PD). Para la calibración del modelo se utilizaron los datos del tratamiento AF. La calibración consiste en encontrar, a través de un proceso iterativo, el conjunto de coeficientes que permitan un mejor ajuste entre los datos simulados y medidos. En esta fase se da especial importancia a la biomasa aérea y de tubérculos. Para validar el modelo se utilizaron los datos del tratamiento BF, corriéndose el modelo con los coeficientes calculados en la calibración. La validación permite evaluar la respuesta del modelo con datos independientes a los utilizados para la calibración.

RESULTADOS

Fases fenológicas

En la Figura 2 se muestra la dinámica temporal de la biomasa de distintos compartimientos del cultivo para ambos tratamientos. Se señalan las tres fases fenológicas del desarrollo del cultivo de papa definidas por Milthorpe (1963): la fase I, o de pre-emergencia, que va desde la siembra hasta la emergencia, durante la cual se desarrolla una biomasa inicial de raíces y de hojas a partir de los asimilados provenientes del tubérculo madre; la fase II, o de despliegue foliar, durante la cual la mayor parte de los asimilados son destinados a la biomasa aérea y la fase III, o de llenado de tubérculos, en la cual la mayor parte de los asimilados se destinan a los tubérculos. Esta variedad de papa tiene un ciclo de vida largo, la

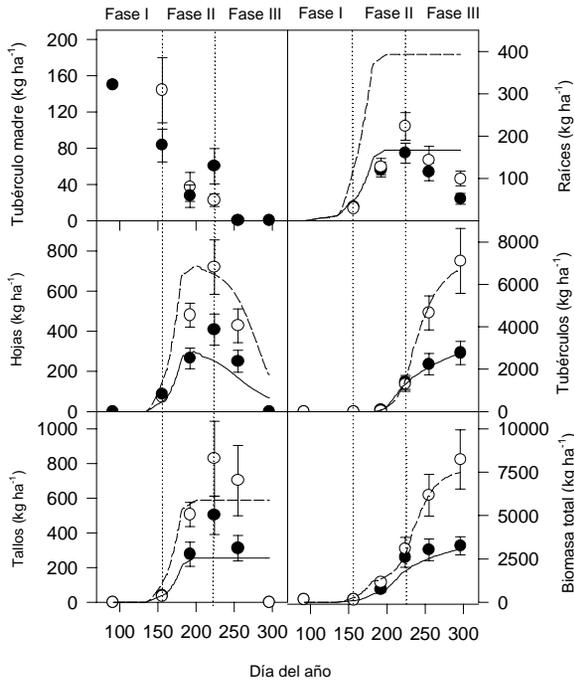


Figura 2. Valores medidos (puntos) y simulados (líneas) de la biomasa de diferentes compartimentos en los dos tratamientos experimentales. ●BF, ○AF, —BF, ---- AF. Las tres fases del desarrollo del cultivo están delimitadas por líneas punteadas: (I) pre-emergencia, (II) despliegue de la biomasa aérea y (III) llenado de los tubérculos.

fase I dura 65 días, la fase II 70 días y la fase III 75 días, dando un total de siete meses entre la siembra y la cosecha.

Dinámica de la biomasa y su distribución entre los órganos

La biomasa aérea, tanto de hojas como de tallos, sigue una curva en forma de campana, con un máximo al final de la fase II y una disminución posterior, que ocurre simultáneamente al llenado de los tubérculos (Figura 2). La biomasa de todos los compartimentos, a excepción del tubérculo madre, fue mayor en AF en todos los muestreos menos el primero. La producción final de tubérculos, expresada en peso fresco, fue de 31 t ha⁻¹ para el tratamiento AF y de 12 t ha⁻¹ para el tratamiento BF. El efecto del déficit nutritivo en la biomasa total se evidencia principalmente durante la fase III, cuando la biomasa total permanece prácticamente constante en BF mientras que continúa aumentando en AF (Figura 2). La

iniciación de la tuberización fue calculada en 80 días después de la siembra para BF y 90 días para AF, lo que indica una tuberización precoz en BF.

Dinámica del nitrógeno

Desde el inicio del desarrollo la concentración de N en los diferentes órganos fue mayor en el tratamiento AF (Figura 3). Las hojas, tallos y estructuras reproductivas presentaron una disminución continua de la concentración de N a lo largo de su desarrollo, mientras que las raíces presentaron una curva en U y los tubérculos una disminución inicial y luego valores constantes. La acumulación final de N en la biomasa del cultivo fue de 86 kg ha⁻¹ en el tratamiento AF comparado con 32 kg ha⁻¹ en el tratamiento BF.

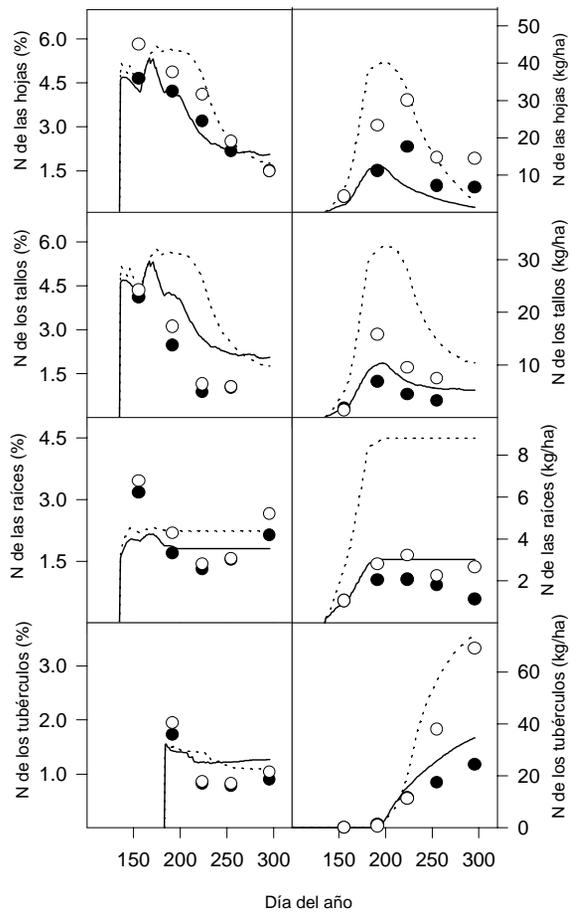


Figura 3. Valores medidos (puntos) y simulados (líneas) de la concentración de N y del N total en diferentes compartimentos del cultivo. ●BF, ○AF, —BF, ---- AF.

MODELIZACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN PÁRAMOS

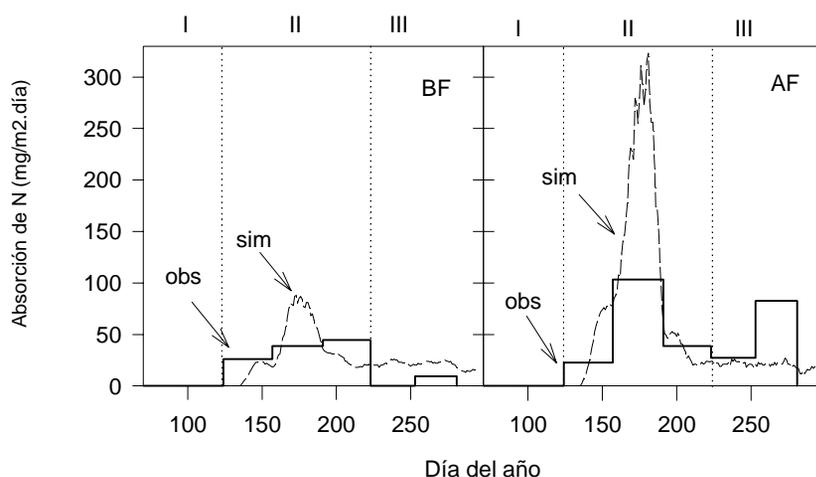


Figura 4. Valores medidos y simulados de la absorción de N por el cultivo en los dos tratamientos experimentales. Las líneas punteadas delimitan las tres fases del desarrollo del cultivo.

En el tratamiento AF la dinámica de absorción de N fue bimodal (Figura 4), con un primer pico durante la fase II y un segundo pico hacia el final de la fase III. En el tratamiento BF la absorción fue unimodal, con un único pico durante la fase II y con muy poca absorción durante la fase de llenado de los tubérculos (fase III).

Translocación de biomasa y de nitrógeno a los tubérculos

Durante la fase III la biomasa aérea decrece y parte de los asimilados y del N que contiene se transportan progresivamente hacia los tubérculos (Tabla 2). Se estimó que esta translocación interna aporta el 36% del N final contenido en los tubérculos

en el tratamiento AF y el 63% en el tratamiento BF. La magnitud de la translocación de asimilados es mucho menor que la de N, correspondiendo a 19% y 7% de la biomasa de los tubérculos para los tratamientos BF y AF respectivamente. Estas son, sin embargo, estimaciones indirectas que deben tomarse con precaución.

Calibración y validación del modelo SUBSTOR

Los coeficientes genéticos que permitieron un mejor ajuste entre los valores simulados y los medidos en el tratamiento AF se encuentran en la Tabla 3.

Además de la calibración de estos cinco coeficientes, también fue necesario ajustar el factor

Tabla 2. Estimación de la biomasa y del N translocados de la parte aérea a los tubérculos para el tratamiento con baja (BF) y alta (AF) fertilización.

	Biomasa		Nitrógeno	
	BF	AF	BF	AF
Biomasa o N aéreo máximo (g m ⁻²) (A)	105,5	157,7	2,18	3,95
Biomasa o N aéreo final (g m ⁻²) (B)	42,1	102,3	0,66	1,44
Translocación estimada (g m ⁻²) (A-B)	63,4	55,4	1,52	2,51
Biomasa o N de los tubérculos (g m ⁻²) (C)	326	824	2,43	6,90
% de la biomasa o N de los tubérculos proveniente de la translocación ((A-B)/C*100)	19	7	62	36

Tabla 3. Coeficientes genéticos obtenidos para la variedad arbolona en comparación con otras variedades (valores tomados de Hoogenboom *et al.* 1999). G2:Tasa de expansión foliar en grados días, G3:tasa de crecimiento potencial de los tubérculos, PD: reducción del crecimiento de los tubérculos después de la inducción de la tuberización, P2:respuesta al fotoperíodo de la iniciación de la tuberización, TC:temperatura crítica para la iniciación de la tuberización.

Variedad	G2	G3	PD	P2	TC
Arbolona	200	43,0	0,1	0,1	4,1
Majestic	2000	22,5	0,8	0,6	17,0
Sebago	2000	22,5	0,7	0,8	15,0
Atlantic	2000	25,0	0,9	0,6	17,0
Maris Piper	2000	25,0	0,8	0,4	17,0
King Edward	2000	22,5	1,0	0,6	17,0
Desiree	2000	25,0	0,9	0,6	17,0
Shepody	2000	25,0	0,7	0,6	19,0

SLNF, el cual determina la tasa de mineralización de la materia orgánica nativa y varía entre 0 y 1, tomando por defecto el valor de 1. En el caso de estos suelos de páramo, muy ricos en materia orgánica, un factor de 1 implica la mineralización de cantidades muy elevadas de nitrógeno, las cuales permitirían una producción de papa importante aun sin fertilización nitrógenada, lo cual no es la realidad en el área (Sarmiento 1995). Este factor fue disminuido a 0,5 a través de un proceso iterativo.

Otro problema que se detectó fue una sobreestimación del drenaje por el modelo y una subestimación de la evapotranspiración, problemas que se detectaron al comparar los resultados producidos por el modelo con la información disponible para el sitio. El drenaje fue simulado en

53% de la precipitación total utilizando los coeficientes de evapotranspiración, drenaje y escorrentía calculados por el modelo sobre la base de las características del suelo y de la pendiente. Este drenaje simulado excede al valor de 43% reportado por Sarmiento (2000) en una parcela adyacente, con condiciones similares de suelo y pendiente y para el mismo año del experimento. La sobreestimación del drenaje trae como consecuencia un lavado muy rápido de los nutrientes minerales. Para subsanar este problema se modificaron tres coeficientes, SLU1, el límite de evaporación, que fue aumentado de 9,5 a 30 mm, SLDR, la tasa de drenaje, que fue disminuida de 0,6 a 0,3 y SLRO, la curva de escorrentía, que fue aumentada de 83 a 90. Estos cambios

Tabla 4. Comparación entre los valores observados y simulados en el tratamiento utilizado para la calibración del modelo, alta fertilización (AF).

Variable	OBS	SIM	% BIAS
Biomasa foliar máxima (kg/ha)	720	725	+1
Biomasa de tallos máxima (kg/ha)	829	588	-29
Biomasa de raíces promedio (kg/ha)	125	337	+170
Biomasa de tubérculos final (kg/ha)	2616	2602	+1.5
Biomasa total final (kg/ha)	3757	3602	-4
Fecha de tuberización (días después de la siembra)	90	92	
N en las hojas (%)	3,74	3,82	+2
N en los tallos (%)	2,40	4,34	+81
N en las raíces (%)	2,26	2,23	-1
N en los tubérculos (%)	1,16	1,29	+11
N total final (kg/ha)	86,1	105,8	+19

MODELIZACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN PÁRAMOS

Tabla 5. Comparación entre los valores observados y simulados en el tratamiento utilizado para la validación del modelo, baja fertilización (BF).

Variable	OBS	SIM	% BIAS
Biomasa foliar máxima (kg/ha)	408	300	-26
Biomasa de tallos máxima (kg/ha)	501	254	-30
Biomasa de raíces promedio (kg/ha)	96.4	142	+48
Biomasa de tubérculos final (kg/ha)	1289	1242	+4
Biomasa total final (kg/ha)	1955	1616	-17
Fecha de tuberización (días después de la siembra)	80	92	
N en las hojas (%)	3,14	3,06	-2
N en los tallos (%)	2,11	3,32	+57
N en las raíces (%)	1,96	1,86	-5
N en los tubérculos (%)	1,05	1,29	+23
N total final (kg/ha)	32,2	48,4	+50

permitieron llevar el valor de drenaje a 45%, el cual está mucho más cerca del valor conocido para el área.

Usando los coeficientes genéticos mencionados y modificando los otros parámetros indicados se obtuvo una simulación satisfactoria para la biomasa aérea máxima y la biomasa final de tubérculos, con desviaciones de solo 1 y 1,5% entre los valores observados y simulados respectivamente (Tabla 4). Sin embargo para la biomasa de tallos y de raíces la diferencia entre los valores observados y simulados resultó considerablemente mayor, simulándose un 29% menos tallos y un 170% más raíces. La relación entre valores observados y simulados de biomasa de los diferentes compartimientos puede ser observada con más detalle en la Figura 2.

En cuanto al N, las concentraciones para hojas y raíces fueron simuladas correctamente, más no para los tubérculos y los tallos, los cuales fueron sobreestimados por el modelo (Tabla 4, Figura 3). Como consecuencia de la sobreestimación del N en tallos y tubérculos, el N final simulado del cultivo resultó 19% mayor que el observado.

En la Tabla 5 pueden observarse los resultados de la validación que se realizó utilizando el tratamiento BF. Es de hacer notar que para la producción de tubérculos el valor simulado estuvo muy cerca del observado, pero para los demás compartimientos del cultivo hubo desviaciones de entre 26 y 48%. Nuevamente la discrepancia mayor fue para las raíces, aunque resultó menor que en la calibración. El N fue simulado en forma correcta

para hojas y raíces pero no para tallos y tubérculos, al igual que ocurrió en la calibración. Debido a la sobreestimación en la concentración de N de algunos compartimientos el N final del cultivo fue sobreestimado en 50% para el tratamiento BF.

En las Tablas 4 y 5 puede observarse que el modelo simuló la iniciación de la tuberización 92 días después de la siembra para ambos tratamientos. Lo que representa dos días después del valor medido para AF y 12 días después del valor medido para BF. Es decir que el modelo no simuló una tuberización precoz como consecuencia del déficit de nitrógeno.

En la Figura 4 se presenta la simulación de la dinámica de absorción de N por el cultivo para ambos tratamientos. Puede observarse que el patrón bimodal de absorción descrito anteriormente para el tratamiento AF no fue correctamente simulado, ya que el modelo produjo un único pico de absorción en fase II, cuando simuló una absorción mayor que la observada. Para el tratamiento BF los resultados de la simulación son más parecidos a los observados, simulándose un único pico de absorción en fase II pero sobreestimándose la absorción en fase III.

DISCUSION

Los dos tratamientos presentaron diferencias marcadas en el desarrollo de la biomasa, en la concentración de N, en la fecha de inicio de la tuberización y en dinámica de absorción de N, evidenciándose un claro déficit de N en el

tratamiento con menor fertilización. Los resultados obtenidos sugieren que la producción de esta variedad de la subespecie *andigenum* en ambientes de páramo, depende de una adecuada disponibilidad de N durante dos periodos críticos del desarrollo del cultivo, correspondientes a la tasa máxima de despliegue foliar (fase II) y al período final del llenado de los tubérculos (fase III). Los resultados también sugieren que si no hay suficiente N disponible durante el primer pico de absorción se producirá una tuberización precoz y un desarrollo insuficiente de la biomasa aérea, lo cual ocurrió en el tratamiento BF. Por otra parte, pareciera que si no hay disponibilidad de N durante el periodo de llenado de los tubérculos entonces la principal fuente de N será la translocación interna y en consecuencia la producción disminuirá, ambos fenómenos acaecidos en BF. Este patrón de requerimientos de nitrógeno por el cultivo y de respuesta al déficit, derivado de los resultados presentados, debe ser verificado con mayor trabajo de campo, ya que la falta de réplicas de los tratamientos experimentales no permite formular conclusiones definitivas.

El patrón bimodal de absorción de N observado en el tratamiento AF, en conocimiento de los autores, no está reportado en la literatura sobre papa, probablemente debido a que las variedades comúnmente estudiadas tienen un ciclo de vida más corto y en este caso los dos picos de absorción estarían sobrepuestos. Sin embargo, Westermann y Kleinkopf (1985) en uno de los pocos trabajos donde se analiza la disponibilidad de N en el suelo y los requerimientos del cultivo de papa a lo largo del desarrollo, encuentran que durante la fase de maduración de los tubérculos las plantas necesitan cantidades importantes de N.

La tuberización precoz ha sido reportada en la literatura como una respuesta fisiológica al déficit nutritivo o hídrico (Milthorpe 1963, Dyson y Watson 1971, Moorby 1978, Kleinkopf *et al.* 1981, Westermann y Kleinkopf 1985, Fahem y Haverkort 1988). Esta tuberización precoz está siempre acompañada de una reducción del crecimiento aéreo, ya que una vez desencadenada los tubérculos se transforman en los meristemas dominantes y en los pozos principales para los compuestos orgánicos e inorgánicos (Moorby 1978). Como la tuberización es un proceso irreversible, si ocurre precozmente generará plantas con poco follaje y poca capacidad de producir asimilados aunque el déficit desaparezca posteriormente.

Dyson y Watson (1971) obtienen, midiendo la concentración de N en la subespecie *tuberosum*, valores muy similares a los nuestros para hojas y tallos. Sin embargo, para los tubérculos reportan valores entre 20 y 80% mayores. Ezeta y McCollum (1972) miden para una variedad de la subespecie *andigenum* valores de N muy próximos a los obtenidos por nosotros y al comparar con diversas variedades de la subespecie *tuberosum* concluyen que los tubérculos de la subespecie *andigenum* son considerablemente más pobres en N.

La respuesta contrastante del cultivo a ambos tratamientos de fertilización nos permite utilizar uno de ellos para la calibración y el otro para la validación del modelo, ya que este responde a situaciones muy diferentes en cada caso. Es importante señalar que para la calibración hubo que cambiar considerablemente los coeficientes genéticos en comparación con los rangos reportados para la subespecie *tuberosum* (Travasso *et al.* 1996, Hoogenboom *et al.* 1999, Tabla 3). En particular esta variedad presenta una tasa de expansión foliar (G2) 10 veces menor, una tasa de crecimiento potencial de los tubérculos (G3) mucho más alta, una baja respuesta de la tuberización al fotoperíodo (P2) y una temperatura mínima crítica para la iniciación de la tuberización (TC) extremadamente baja. Las diferencias entre estos coeficientes y los reportados en la literatura, en condiciones de clima templado, revisten cierta lógica si se los interpreta en función de las características ambientales de la alta montaña tropical, donde las bajas temperaturas durante todo el año explicarían la menor temperatura crítica y los pocos cambios anuales en longitud del día explicarían la poca respuesta al fotoperíodo. Queda planteado hasta que punto las diferencias en los coeficientes genéticos pueden atribuirse a particularidades de la subespecie *andigenum* en relación a *tuberosum*, o son el resultado de las condiciones climáticas de la alta montaña tropical. Para aclarar este punto se requiere calibrar el modelo en las mismas condiciones climáticas para la subespecie *tuberosum*.

Por otra parte, la necesidad de reducir el factor de mineralización (SLNF) para lograr calibrar el modelo nos estaría indicando una materia orgánica muy estable en estos suelos de páramo. La modificación de este factor se encuentra apoyada por estudios realizados en el mismo suelo por Coûteaux *et al.* (2002), quienes observan que la

materia orgánica se descompone mucho más lentamente de lo que cabría esperarse en función de la temperatura, de las condiciones de humedad del lugar y de la textura del suelo, lo cual es atribuido a procesos de estabilización en los cuales el aluminio podría estar jugando un papel importante.

En cuando al balance hídrico, pensamos que uno de los mayores problemas del modelo para simular los flujos correctamente es el cálculo incorrecto de la evapotranspiración potencial (ETP). En este sentido, Sarmiento (2000) encuentra que los modelos empíricos utilizados para calcular la ETP, los cuales se basan en la temperatura media, subestiman fuertemente la ETP en ambientes de montaña ya que fueron desarrollados para condiciones de baja altitud y no consideran el efecto positivo de la altitud sobre la evaporación.

El modelo SUBSTOR sobreestimó apreciablemente la biomasa de raíces aunque las diferencias pueden también deberse a errores experimentales comunes en la medición de este compartimiento, ya que es difícil recuperar eficientemente las raíces del suelo. El caso de los tallos, la fuerte subestimación indicaría una arquitectura diferente de esta subespecie, aspecto que tendría que tomarse en cuenta para mejorar el modelo.

En cuanto al nitrógeno, encontramos diferencias tanto en la dinámica de absorción como en la cantidad total absorbida, la cual fue sobreestimada. El patrón bimodal de absorción, que fue medido en el tratamiento AF no fue simulado correctamente. Una posible razón es que el drenaje simulado sea todavía muy alto y por lo tanto el lavado de N esté sobreestimado y esto cause un déficit simulado mayor al real durante la fase III.

Los resultados presentados, aunque preliminares y lejos de permitirnos plantear conclusiones definitivas, sirvieron para realizar una primera exploración de si el modelo SUBSTOR puede ser calibrado y validado para las condiciones de la alta montaña venezolana y para señalar algunas prioridades de investigación para avanzar en esta dirección. En este sentido, puede decirse que este primer intento de calibrar y validar el modelo SUBSTOR resultó bastante satisfactorio, aunque la modificación de algunos aspectos del modelo podría ser necesaria para obtener mejores resultados. Tres direcciones para futuras investigaciones quedan planteadas: 1) la necesidad de conocer mejor la arquitectura y patrones de

asignación de los asimilados y del nitrógeno de las variedades cultivadas localmente, así como incluir en el modelo una respuesta del inicio de la tuberización al déficit de nitrógeno; 2) se necesita explorar con más detalle la respuesta de la ETP a la altitud, para disponer de mejores modelos empíricos para estimar este parámetro, el cual tiene mucho peso en determinar los diferentes flujos del balance hídrico y 3) debe profundizarse en el conocimiento de la dinámica de mineralización de la materia orgánica del suelo y en la existencia de posibles efectos estabilizadores en condiciones de alta montaña.

Ejemplo de aplicación del modelo

Presentamos a continuación un pequeño ejercicio de simulación con el objetivo de ilustrar las posibles aplicaciones de este modelo para el manejo agronómico del cultivo de papa. Con este fin vamos a utilizarlo para explorar la hipótesis, derivada de los datos presentados anteriormente, de que el cultivo responderá de forma diferencial a cada una de las siguientes situaciones de disponibilidad de N:

1) Sin déficit: En este caso se espera una tuberización tardía y un desarrollo vigoroso de la biomasa foliar durante la fase II. Durante la fase III habría un segundo pico de absorción de N que junto con la translocación permitiría un buen llenado de tubérculos y una producción máxima.

2) Con déficit permanente: producción aérea baja, tuberización precoz, producción mínima.

3) Déficit en fase II que desaparece en fase III: Se espera una reducción del desarrollo de la biomasa aérea y una tuberización precoz. La producción será algo mayor que en el caso anterior ya que puede haber absorción de N en fase III, pero debido al escaso desarrollo foliar la asimilación estará limitada.

4) Disponibilidad en fase II y déficit en fase III: La biomasa aérea se desarrollará normalmente y la tuberización será tardía pero el llenado de tubérculos se verá limitado por la falta de N en fase III y dependerá principalmente de la translocación, siendo la producción menor que en el caso 1, pero mayor que en los casos 2 y 3.

Para explorar esta hipótesis con el modelo se diseñó una simulación en la que el fertilizante nitrogenado fue aplicado en diferentes formas, tratando de conseguir las cuatro situaciones descritas anteriormente. Se utilizó la misma dosis de fertilización que en el tratamiento AF (160 kgN

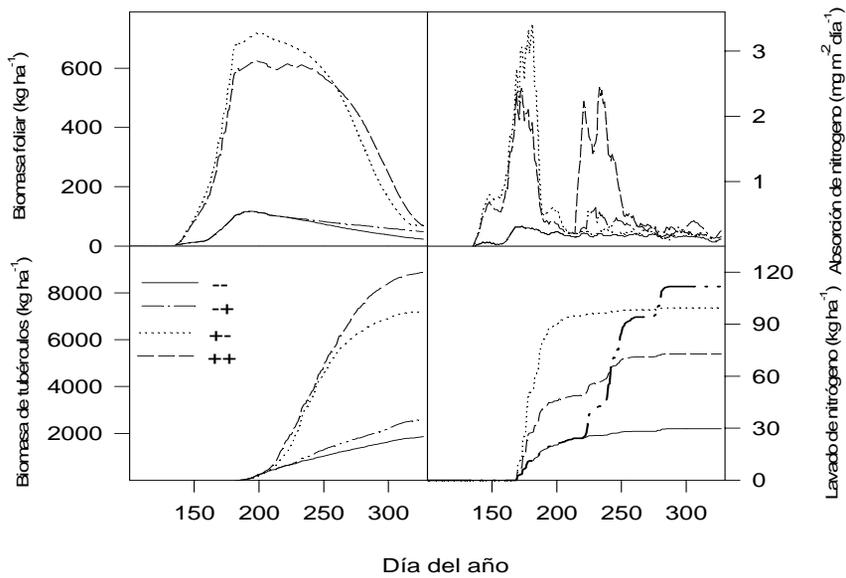


Figura 5. Resultados de la simulación por el modelo SUBSTOR de cuatro escenarios de disponibilidad de N. — sin fertilización, +- fertilización en fase II, -+ fertilización en fase III, ++ fertilización fraccionada en fases II y III.

ha⁻¹) según los siguientes tratamientos: 1) sin fertilización, 2) todo el fertilizante aplicado al inicio de la fase II, 3) todo el fertilizante aplicado al inicio de la fase III, 4) fertilizante fraccionado en dos dosis iguales y aplicadas una al inicio de la fase II y la otra al inicio de la fase III.

Algunos de los resultados de esta simulación pueden observarse en la Figura 5 donde se observa que el modelo simuló la biomasa foliar y de tubérculos de acuerdo a lo esperado por la hipótesis planteada. Sin embargo no simuló diferencias en la fecha de tuberización. En el caso de la fertilización fraccionada se simularon dos picos de absorción, siendo este el tratamiento con mayor producción de tubérculos aunque con una biomasa foliar algo menor. También fue este tratamiento el que presentó mayor cantidad de N absorbido y menores pérdidas por lavado en comparación con los otros tratamientos fertilizados. También cabe observar que en el caso de una fertilización única al inicio de la fase III, el aumento en rendimiento y en área foliar son poco importantes con relación al tratamiento no fertilizado.

Es importante tener presente que los resultados presentados en la Figura 5 pueden no corresponder exactamente con los que se

obtendrían al realizar el experimento de campo, sobre todo en el caso del lavado de N, que fue un parámetro que no pudimos calibrar con nuestro experimento. Sin embargo estos resultados nos indican las tendencias que podemos esperar y nos muestran la potencialidad de utilización del modelo para entender la respuesta del cultivo y diseñar manejos agronómicos más eficientes. Sin embargo, hay que continuar calibrando el modelo y mejorándolo para adaptarlo a las variedades y condiciones particulares de la alta montaña tropical.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Nelson Márquez por su ayuda en el trabajo de campo y de laboratorio. Este trabajo fue financiado por el CDCHT (ULA), proyectos (C-446-90 y C-447-90) y recibió apoyo de CYTED para el intercambio de investigadores (Proyecto XII.4-MOSAndes).

LITERATURA CITADA

BOWEN, W., H. CABRERA, V. BARRERA, y G. BAIGORRIA. 1999. Simulating the response of potato to applied nitrogen. Pp. 381-386, in CIP Program

MODELIZACIÓN DEL CULTIVO DE PAPA EN PÁRAMOS

- Report 1997-1998. International Potato Center, Lima, Peru.
- BOWEN, W., P. THORNTON y G. HOOGENBOOM. 1998. The simulation of cropping sequences using DSSAT. Pp. 313-327, *in* Tsuji, G., G. Hoogenboom y P. Thornton (eds): Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers.
- COUTEAUX, MM., L. SARMIENTO, P. BOTTNER, D. ACEVEDO y J.M. THIERY. 2002. Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968 m) in the tropical Andes. *Soil Biology and Biochemistry* 34(1): 69-78.
- DYSON, P. y D. WATSON. 1971. An analysis of the effects of nutrient supply on the growth of potato crops. *Annals of Applied Biology* 69: 47-63.
- EZETA, F. y R. MCCOLLUM. 1972. Dry-matter production, and nutrient uptake and removal by *Solanum andigena* in the Peruvian Andes. *American Potato Journal* 49: 151-163.
- FAHEM, M. y A. HAVERKORT. 1988. Comparison of the growth of potato crops grown in autumn and spring in North Africa. *Potato Research* 31: 557-568.
- GIJSMAN, A. y W. BOWEN. 2001. Simulating crop production in low-input agricultural systems with DSSAT linked to the CENTURY soil organic matter module. In *Proceedings of the Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development*. CD-Rom. CIP, Lima, Peru.
- HODGES, T., B. JOHNSON y L. MANRIQUE. 1989. SUBSTOR: A model of potato growth and development. *Agronomy Abstracts*, 16. Madison, Wisconsin American Society of Agronomy.
- HOOGENBOOM, G., P. WILKENS y Y. TSUJI. 1999. DSSAT v 3, Volume 4. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- KLEINKOPF, GE., D.T. WESTERMANN y R.B. DWELLE. 1981. Dry matter production and nitrogen utilization by six potato cultivars. *Agronomy Journal* 42: 77-80.
- MAHDIAN, M. y J. GALLICHAND. 1995. Validation of the SUBSTOR model for simulating soil water content. *Transactions of the ASAE* 38: 513-520.
- MILTHORPE, F. 1963. Some aspects of plant growth. An introductory survey. Pp. 3-16, *in* Ivins, J y F. Milthorpe (eds): *The Growth of the Potato*. Butterworths, Londres.
- MINISTERIO DE PRODUCCIÓN Y COMERCIO. 1999. Potencialidades agrícolas del Estado Mérida. Venezuela. Informe técnico.
- MONASTERIO, M. 1980. Las formaciones vegetales de los páramos de Venezuela. Pp. 93-158, *in* M. Monasterio (ed.): *Estudios Ecológicos en los Páramos Andinos*. Editorial de la Universidad de Los Andes. Mérida.
- MOORBY, J. 1978. The physiology of growth and tuber yield. Pp. 153-194, *in* Harris, P.M. (ed): *The Potato Crop*. Chapman and Hall, Ltd. Londres.
- PENNING DE VRIES, F. y R. RABBINGE. 1995. Models in research and education, planning and practice. Pp. 1-18, *in* Haverkort, A., D. MacKerron (eds): *Potato Ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- RITCHIE, J., T. GRIFFIN y B. JOHNSON. 1995. SUBSTOR: functional model of potato growth, development and yield. Pp. 401-435, *in* Kabat, P. *et al.* (eds.): *Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system*. Wageningen.
- SARMIENTO, L. 1995. Restauration de la fertilité dans un système agricole à jachère longue des hautes Andes du Venezuela. Ph.D. Thesis. Université de Paris XI.
- SARMIENTO, L. 2000. Water balance and soil loss under long fallow agriculture in the Venezuelan Andes. *Mountain Research and Development* 20(3): 246-253.
- TRAVASSO, M., D. CALDIZ y J. SALUZZO. 1996. Yield prediction using the SUBSTOR-potato model under Argentinean conditions. *Potato Research* 39: 305-312.
- TSUJI, G., G. UEHARA y S. BALAS (eds). 1994. DSSAT. Versión 3. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- VOS, J. 1995. Nitrogen and the growth of potato crops. Pp. 101-110, *in* Haverkort, A. y D. MacKerron (eds): *Potato Ecology and modelling of crops under conditions limiting growth*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- WESTERMANN, D. y G. KLEINKOPF. 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal* 77: 616-621.

Recibido 14 de enero de 2002; revisado 22 e abril de 2002; aceptado 25 de mayo de 2002