

## CRECIMIENTO Y ACUMULACIÓN DE NUTRIMENTOS EN LA VARIEDAD DE PAPA ELBE-UCR

Eric Ulloa-Calvo<sup>1</sup>, Manuel E. Camacho-Umaña<sup>2/\*</sup>, Arturo Brenes-Angulo<sup>3</sup>

**Palabras clave:** nutrición mineral; crecimiento vegetal; *Solanum tuberosum*; fertilización; Andisoles.

**Keywords:** mineral nutrition; plant growth; *Solanum tuberosum*; fertilization; Andisols.


**Recibido:** 03/07/2024



**Aceptado:** 26/08/24

### RESUMEN

**Introducción.** El cultivo de la papa representa una actividad fundamental en la economía costarricense. Desde el 2015, la variedad Elbe-UCR está disponible en la agrocadena de papa, y es considerada como promisoría debido a su alta tolerancia a patógenos, plagas insectiles y condiciones de sequía, así como sus elevados rendimientos (mayores a 40 t ha<sup>-1</sup>). Pese a lo anterior, no se tienen estudios sobre crecimiento y acumulación de nutrientes que permitan una mejor planificación de la fertilización del cultivo, con miras a una producción más sostenible. **Objetivo.** Desarrollar y validar las curvas de acumulación de nutrientes en la variedad de papa Elbe-UCR, cultivada en la Zona Norte de Cartago. **Materiales y métodos.** Se recolectaron muestras de la biomasa de la planta cada 15 días después de la siembra (dds), las cuales se separaron en

parte aérea, tubérculo y raíz, para determinar su masa fresca y seca, así como su concentración de nutrientes. **Resultados y discusión.** La variedad Elbe-UCR acumuló un valor promedio de materia seca de 12016 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, de los cuales el 70% correspondió a la biomasa del tubérculo. Para un rendimiento de 40 t ha<sup>-1</sup>, esta variedad acumuló un total de 195, 20, 312, 54, 16, y 20 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca, Mg y S, respectivamente. También, acumuló un total de 336, 123, 6250, 337, y 213 g ha<sup>-1</sup> de Zn, Cu, Fe, Mn y B, respectivamente. **Conclusión.** La variedad Elbe-UCR presentó una gran capacidad de acumulación de Ca y K, y no requiere los niveles altos de N que aplican regularmente los productores en Costa Rica. Los resultados obtenidos en el presente trabajo se consideran básicos para el manejo correcto de la fertilización y desarrollo de formulaciones comerciales para esta variedad, con miras a una producción más sostenible.

\* Autor para correspondencia. Correo electrónico: manuel.camachoumana@ucr.ac.cr  
1 Eurosemillas S.A. Cartago, Costa Rica.  
 0009-0007-0485-2824.

2 Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía y Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.  
 0000-0001-7589-8327.  
3 Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.  
 0000-0001-8770-6863.

## ABSTRACT

**Growth and nutrient accumulation in the Elbe-UCR potato variety. Introduction.** Potato crop represents a fundamental activity within the Costa Rican economy. Since 2015, the Elbe-UCR variety has been available in the potato agrifood chain, being considered as promising due to its high tolerance to pathogens, insect pests, and drought conditions, as well as its high yields (greater than 40 t ha<sup>-1</sup>). Despite this, there are no studies about growth and nutrient accumulation that would allow a better fertilization planning for this potato variety, aiming to attain sustainable production. **Objective.** To develop and validate nutrient accumulation curves for the Elbe-UCR potato variety, cultivated in the Northern Zone of Cartago. **Materials and methods.** Biomass samples were collected every 15 days after planting (dap), which were

separated into aboveground biomass, tuber, and root, to determine their fresh and dry mass, as well as their nutrient concentration. **Results and discussion.** The Elbe-UCR variety accumulated an average dry matter value of 12016 kg ha<sup>-1</sup> at 135 dap, of which 70% corresponded to the tuber biomass. For a yield of 40 t ha<sup>-1</sup>, this variety accumulated a total of 195, 20, 312, 54, 16, and 20 kg ha<sup>-1</sup> of N, P, K, Ca, Mg, and S, respectively. It also accumulated a total of 336, 123, 6250, 337, y 213 g ha<sup>-1</sup> of Fe, Cu, Zn, Mn, and B, respectively. **Conclusion.** The Elbe-UCR variety showed a great capacity for Ca and K accumulation and does not require the high levels of N regularly applied by producers in Costa Rica. The results obtained in this study are considered fundamental for the management of fertilization and the development of commercial formulations for this variety, aiming for a more sustainable production.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) representa la cuarta actividad agrícola más importante a nivel mundial después del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.), el arroz (*Oryza sativa* L.) y el maíz (*Zea mays* L.) (Brenes *et al.* 2002, Earle 2020). En Costa Rica, para el 2023 se reportó un total de 3104 ha cultivadas con papa, de las cuales el 58% se ubica en las zonas altas de Cartago, con una producción total de 47292 toneladas en este sector (SEPSA 2024).

La producción de papa se ve fuertemente afectada por fenómenos climáticos, fluctuaciones en el mercado internacional, y el manejo del cultivo (Prasad 2018). En relación con este último aspecto, existen factores bióticos de importancia económica en el cultivo de la papa dentro de los cuales destacan los patógenos: el tizón tardío (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) y la marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum* Smith); en adición a plagas insectiles como el minador de la hoja de papa

(*Liriomyza huidobrensis* Blanchard) (Brenes *et al.* 2002, Gómez-Alpízar *et al.* 2007).

Un manejo integrado del cultivo de la papa (MICP) resulta fundamental para lograr la producción deseada de una forma sostenible y a un menor costo económico (Connel *et al.* 1991). Dentro de estos sistemas de manejo integrado destacan dos componentes de suma importancia: 1) el uso de cultivares mejorados genéticamente, tolerantes a plagas y enfermedades y altamente productivos (Bonnell 2008); y 2) un programa de fertilización del cultivo que contemple sus necesidades nutricionales óptimas para un rendimiento específico (Soratto *et al.* 2021).

Desde 1997, existe en Costa Rica un programa dedicado al mejoramiento genético del cultivo de la papa, a cargo del Laboratorio de Biotecnología de Plantas del Centro de Investigaciones Agronómicas en la Universidad de Costa Rica (LBP-CIA-UCR), el cual ha logrado con éxito la liberación de varias variedades (Brenes y Gómez-Alpízar 2009). En el 2015, este programa puso a disposición de la agrocadena de la papa

la variedad Elbe-UCR, un cultivar de papa con alta tolerancia al tizón tardío (*P. infestans*) y al minador de la hoja (*L. huidobrensis*), así como una muy alta productividad (mayor a 45 t ha<sup>-1</sup>) y resistencia a las condiciones de sequía y estrés.

Dentro del manejo de la nutrición mineral y la fertilización de los cultivos, es necesario conocer la tasa de acumulación de nutrientes en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo (curvas de acumulación de nutrimentos) (Bertsch 1998). El objetivo de estas curvas de acumulación de nutrimentos es cuantificar los requisitos nutricionales mínimos del cultivo para obtener un rendimiento específico, los cuales permiten la planificación de la fertilización de un cultivo (Bertsch 2003). Para el cultivo de la papa en Costa Rica, en la literatura se cuenta con diversos estudios de acumulación de nutrimentos para variedades como *Floresta*, *Granola*, y *MF-80* (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009).

Pese a lo anterior, no se cuenta con un estudio de crecimiento y acumulación de nutrimentos específico para la variedad Elbe-UCR, la cual debido a sus características deseables y vigor de planta se proyecta como una variedad muy promisoriosa para la producción de papa en potenciales escenarios de sequía, lo cual representaría un reto en los esfuerzos de adaptación al cambio climático en América Latina (Cavazos *et al.* 2024). La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar y validar las curvas de acumulación de nutrimentos en la variedad de papa Elbe-UCR, cultivada en la Zona Norte de Cartago.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental y condiciones agroecológicas

El sitio para el establecimiento de los experimentos de acumulación de nutrimentos y los ensayos de validación, se ubicó en localidad de Guarumos, cantón de Alvarado de la provincia de Cartago, Costa Rica, a una elevación de

2800 msnm. Dicho sitio se clasificó dentro del sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1967) como Bosque Pluvial Montano (bp-M), con valores de precipitación pluvial promedio entre 1800 y 2300 mm año<sup>-1</sup>, y valores anuales de temperatura entre 9 y 12°C (Solano y Villalobos 2001). Ahí, se establecieron dos sectores: 1) Guarumos 1, donde se desarrolló el experimento de las curvas de acumulación de nutrimentos (9,968947 N; 83,816903 O), y 2) Guarumos 2, donde se realizaron los ensayos de validación de las curvas (9,966783 N; 83,820833 O).

Los suelos dominantes en esta región son mayoritariamente de origen volcánico, profundos y de color oscuro, con un buen contenido de materia orgánica y baja densidad aparente, así como texturas francas, franco arenosas y arenas francas (Alvarado *et al.* 2001). Taxonómicamente, estos suelos se clasifican de acuerdo con el sistema *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 2014) dentro del orden de los Andisoles, específicamente en el Subgrupo taxonómico *Typic Hapludands* (Alvarado y Mata 2016).

En general, estos Andisoles se consideran moderadamente fértiles, pero presentan limitaciones como una alta fijación de fósforo de alrededor de 70% debido a la presencia de nano cristales de alofana (Nanzzyo *et al.* 1993, Buol *et al.* 2011), así como limitaciones en la concentración de boro, azufre y zinc (Bertsch 1998).

Se realizó un muestreo de suelo inicial para determinar la fertilidad de los sitios donde se realizaron los ensayos. Para ello se tomó una muestra compuesta siguiendo el protocolo de muestreo de suelo, con un barreno del tipo holandés y a una profundidad de 20 cm.

Dicha muestra compuesta se homogenizó y se redujo a una masa total de 0,5 kg mediante el cuarteo de muestra (Bertsch 1998). Estas muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos y Foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (LSF-CIA-UCR), donde se le realizó un análisis químico completo (pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe, Mn). Para dicho análisis se utilizó la solución extractora KCl – Olsen modificado (Bertsch *et al.* 2005), y el pH se realizó en agua

en una proporción 1:2,5 suelo:agua (Díaz-Romeu y Hunter 1987). Los parámetros de fertilidad del suelo de ambos sectores (Guarumos 1 y Guarumos 2) se resumen en la Tabla 1.

### Material vegetal, siembra y manejo del cultivo

Para la determinación de las curvas de acumulación de nutrimentos de la variedad de papa Elbe-UCR se utilizó semilla básica II de

papa, la cual fue obtenida de semilla básica I cultivada el ciclo anterior en la misma finca, de acuerdo con los lineamientos de ONS (2005). La primera siembra del ensayo para las curvas de acumulación se realizó en abril 2017. La distancia de siembra fue de 35 cm entre plantas y 75 cm entre surcos. La aporca se realizó a los 45 días después de la siembra (dds). Posteriormente, se realizó la eliminación del follaje con herbicida (“quema del cultivo”) a los 135 dds.

Tabla 1. Parámetros de fertilidad del suelo obtenidos para los sitios experimentales en la localidad de Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Finca	pH (H <sub>2</sub> O)	Adicez	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
Guarumos 1	6,6	0,14	7,15	1,18	0,37	8,84	2	81	11,1	19	214	7
Guarumos 2	6,4	0,12	4,96	1,62	0,30	7,00	2	90	10,4	23	225	7
Nivel crítico*	<b>5,5</b>	<b>0,5</b>	<b>4,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,20</b>	<b>5,00</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>5</b>

\* Niveles críticos o de referencia para los suelos de Costa Rica (Bertsch 1998).

\*\* Se utilizó la solución extractora KCL-Olsen modificado (Bertsch *et al.* 2005).

Las fórmulas de fertilizante utilizadas durante el ciclo del cultivo fueron:

1. *A la siembra*: mezcla física 14-21-13-3-7,2 (S); a una dosis de 700 kg ha<sup>-1</sup>.
2. *A la aporca*: una mezcla de dos fertilizantes comerciales; a una dosis de 2242 kg ha<sup>-1</sup>. Dichos fertilizantes fueron:
  - 12-11-18-3-8 (S)-0,02 (B)-0,2 (Fe)-0,02(Mn)-0,02(Zn); 1233 kg ha<sup>-1</sup>.
  - Kmag 0-0-22-18-22(S); 1009 kg ha<sup>-1</sup>.

Dichas fórmulas generaron un aporte total de N, P, K y Mg de 246, 124, 444, 144 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para la validación de las curvas de acumulación se utilizó semilla básica III de la misma variedad obtenida a partir de semilla básica II, también cultivada el ciclo anterior en la misma finca, de acuerdo con los lineamientos de ONS (2005). La segunda siembra, donde se realizó

la validación de dichas curvas, inició en agosto 2018, siguiendo los mismos lineamientos de siembra, fertilización y densidad que en la primera siembra. La aporca se realizó a los 48 dds y la eliminación del follaje con herbicida se realizó a los 138 dds.

Las fórmulas de fertilizante granulado utilizadas en el ensayo de validación de las curvas de absorción fueron:

1. *A la siembra*: fórmula química 12-27-8-2,5-4,3(S); a una dosis de 545 kg ha<sup>-1</sup>.
2. *A la aporca*: una mezcla de dos fertilizantes comerciales, a una dosis de 2159 kg ha<sup>-1</sup>. Dichos fertilizantes fueron:
  - Kmag 0-0-22-18-22(S); 1559 kg ha<sup>-1</sup>.
  - Fórmula química 19-4-19; 600 kg ha<sup>-1</sup>.

Dichas fórmulas generaron un aporte total de N, P, K y Mg de 179, 75, 415, 177 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Determinación de las curvas de acumulación de nutrimentos**

Se tomaron muestras de plantas completas cada 15 días a partir de la emergencia y hasta que se completó el ciclo del cultivo, a los 135 días después de siembra. Se recolectó 3 plantas completas por unidad experimental (5 unidades en total), elegidas aleatoriamente de los surcos centrales, para un total por muestreo de 15 plantas y 120 en total. En cada planta recolectada se separó la biomasa de cada componente: hojas, tallo, raíz y tubérculos. Dichas muestras se trasladaron con mucho cuidado al Laboratorio de Suelos y Foliarres del Centro de Investigaciones Agronómicas (LSF-CIA-UCR), donde se determinó el peso

fresco, el peso seco, y el porcentaje de humedad de cada componente de la biomasa de la muestra.

Para cada componente muestreado se analizó su concentración de P, Ca, Mg, K, S, Fe, Mn, Cu, Zn, y B mediante espectrometría de emisión ICP-OES Perkin Elmer optima 8300 siguiendo la metodología descrita por Kalra (1998), y la concentración de N mediante combustión seca en un analizador Elementar® rapid N° 3.

Con toda esta información anterior se construyó una base de datos. Con los valores de humedad de las muestras y el peso fresco se determinó la biomasa seca de cada componente de la biomasa de las plantas de papa. Se calculó la acumulación de nutrimentos para cada tejido multiplicando la biomasa seca por la concentración de acuerdo con las siguientes fórmulas:

Para los macroelementos N, P, K, Ca, Mg, y S:

$$\text{kg nutrimento componente}^{-1} = \frac{\text{biomasa seca (kg) componente}^{-1} * \text{elemento (\%)}}{100} \quad (1)$$

Para los elementos menores Fe, Cu, Zn, Mn y B:

$$\text{g elemento componente}^{-1} = \frac{\text{biomasa seca (kg) componente}^{-1} * \text{elemento (mg kg}^{-1}\text{)}}{1000} \quad (2)$$

Estos valores permitieron calcular la acumulación total de nutrimentos por hectárea para cada etapa del ciclo de cultivo, tomando en cuenta la acumulación total por cada planta y multiplicando por la densidad de plantas por hectárea (35000 plantas).

**Validación de las curvas de acumulación de nutrimentos**

Una vez desarrolladas las curvas de acumulación y la estimación de los requerimientos totales para un ciclo de producción de la variedad de papa Elbe-UCR, se estableció un ensayo para validar la información obtenida de las curvas de

acumulación. En dicho ensayo se utilizó un diseño de bloques completos al azar, que consistió en 4 tratamientos y 3 repeticiones cada uno. La unidad experimental fue una parcela compuesta de 6 surcos de 0,75 m de ancho por 6 m de largo, con un área aproximada de 27 m<sup>2</sup>.

Los tratamientos evaluados se detallan a continuación:

- **Curva:** dosis de fertilizante recomendadas a partir de los valores de acumulación obtenidos de las curvas generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 179, 75, 415, 177 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

- **Curva + 25%:** dosis recomendadas más un 25% de incremento de la dosis de NPK obtenida de las curvas de acumulación generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 224, 94, 519, 221 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.
- **Curva - 25%:** dosis recomendadas menos un 25% de la dosis de NPK obtenida de las curvas de acumulación generadas para la variedad Elbe-UCR. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 135, 56, 312, 132 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.
- **Testigo:** dosis y fuentes de fertilizante utilizada por el productor. Las cantidades aplicadas de N, P, K, y Mg fueron 246, 124, 444, 144 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Al momento de la cosecha, para cada uno de los tratamientos y sus repeticiones se determinó el número y peso total de tubérculos por planta de un total de 10 plantas por tratamiento, tomadas del surco central. Dichos valores se utilizaron para calcular el rendimiento total mediante un valor de densidad del cultivo de 35000 plantas ha<sup>-1</sup>.

#### **Análisis de costos de producción**

Para analizar el impacto económico de la implementación de un plan de fertilización basado en las curvas de acumulación de nutrientes en la producción de papa, se estimó una estructura de costos asociados, y se realizó un estudio de presupuestos parciales, siguiendo los lineamientos descritos en Ávalos y Villalobos (2018). Estos procedimientos permiten determinar el cambio en los costos de producción al variar las cantidades y dosis de fertilizante, y su efecto sobre el rendimiento final de la papa variedad Elbe-UCR.

#### **Análisis estadístico**

En los datos obtenidos del ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrientes, se verificaron los supuestos de homogeneidad y homocedasticidad de varianzas mediante una inspección visual de la distribución de los residuos obtenidos de los modelos ajustados (normal QQ Wally plots y Wally plots) para la variable de respuesta evaluada, en este caso el rendimiento total por área (kg ha<sup>-1</sup>) siguiendo los lineamientos descritos por Kozak y Piepho (2018).

Una vez verificados dichos supuestos, los datos fueron analizados mediante un modelo lineal generalizado (GLM), con el “tratamiento” como único factor fijo. Para la separación de medias se utilizó el método HSD-Tukey con un  $p$ -value <0,05.

Todos estos procedimientos anteriores se realizaron mediante el programa estadístico R Studio (R v. 4.0.4, 2021-02-15) “Lost Library Book” (R Studio Team 2015).

## **RESULTADOS**

#### **Crecimiento y acumulación de biomasa de la variedad de papa Elbe-UCR**

La acumulación de biomasa durante el ciclo de cultivo en esta variedad de papa se documentó desde la siembra hasta los 135 dds (Figura 1). Se observó un incremento paulatino en los valores de acumulación de la biomasa aérea (tallo y follaje) hasta los 105 dds, momento a partir del cual la planta incrementó de forma significativa la acumulación de materia seca en los tubérculos hasta alcanzar un valor promedio de 8399 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 1A).

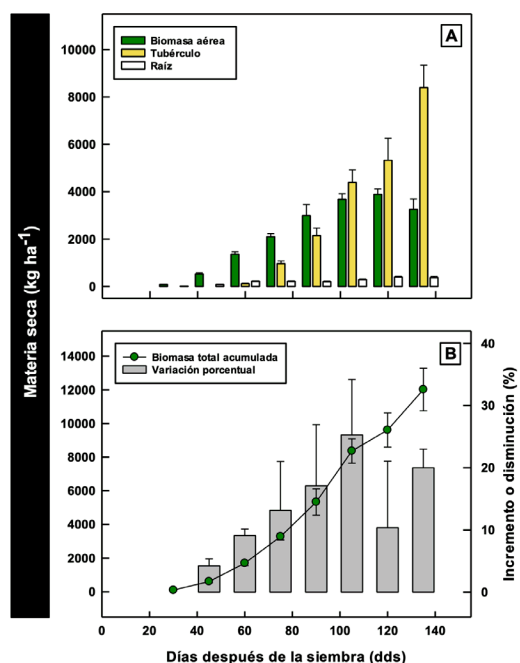


Figura 1. Crecimiento y acumulación de biomasa en la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. A) Acumulación por componente de la biomasa de la planta. B) Acumulación total y variación porcentual durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

Después de la segunda fertilización granulada (45 dds), el incremento en la biomasa total acumulada en un periodo de 15 días fue en promedio de 5%, por lo que la acumulación de materia seca llegó hasta los 105 dds sin disminuciones (Figura 1B). Curiosamente, a los 120 dds se observaron plantas con follaje amarillento (inicio de la etapa de maduración), lo cual se reflejó en una disminución de 15% respecto a la quincena anterior (105 dds). Posteriormente, a los 135 dds volvió a incrementar el contenido de materia seca, lo cual coincide con la fase de llenado de tubérculos, hasta alcanzar un valor promedio de materia seca de 12016 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1B).

### Curvas de acumulación de nutrimentos de la variedad de papa Elbe-UCR

#### Macroelementos acumulados en la biomasa de las plantas de papa

La acumulación de N, P y K (en cada componente de la biomasa y cantidad total) durante el ciclo de cultivo de esta variedad de papa se detalla en la Figura 2. En el caso del nitrógeno, la acumulación en la biomasa aérea y en la raíz llegaron de forma respectiva a valores máximos de 133 y 7,8 kg ha<sup>-1</sup> a 120 dds, mientras que en la biomasa de los tubérculos se obtuvo un valor de 75 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 2A).

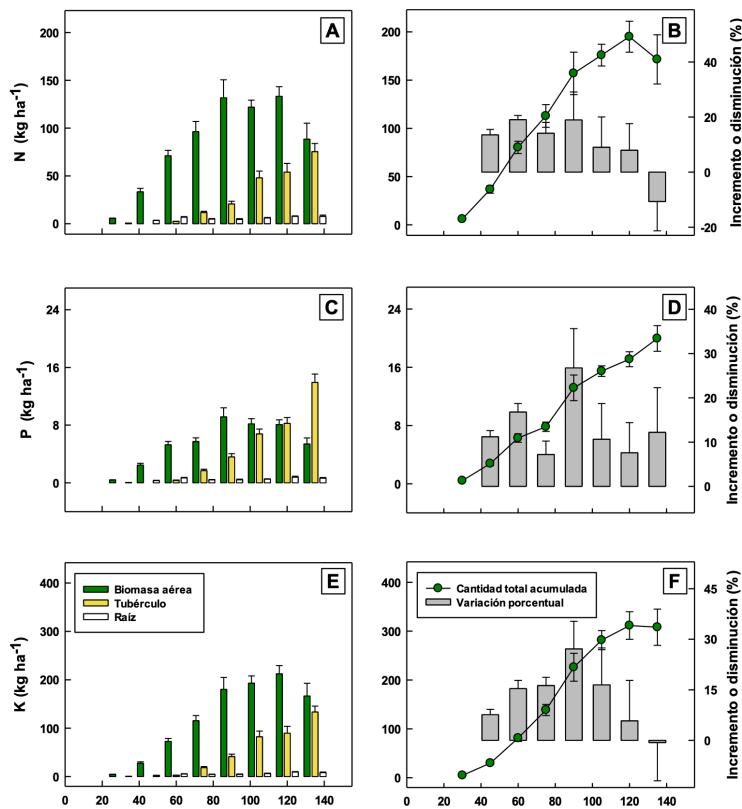


Figura 2. Acumulación de los tres macronutrientes principales (N, P, y K) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de N, P, y K por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de N, P, y K durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

La acumulación total de N en la variedad Elbe-UCR presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, llegando a un valor máximo de  $195 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 120 dds. Posteriormente, se observó una disminución en la acumulación total de este elemento (un valor de variación de -11%), la cual coincide con la etapa final de llenado y maduración de los tubérculos (Figura 2B).

Con respecto al elemento fósforo, su acumulación en la biomasa aérea alcanzó un valor

máximo de  $9 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 90 dds y se mantuvo más o menos constante hasta los 135 dds donde su acumulación descendió hasta  $5 \text{ kg ha}^{-1}$ . En adición, en la biomasa de los tubérculos se observó una clara tendencia al incremento en la acumulación de este elemento, donde se obtuvo un valor de  $14 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 135 dds. La acumulación total de P también presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, hasta alcanzar un valor máximo de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  a los 135 dds (Figura 2C).



Por otro lado, el potasio fue el elemento que se acumuló en mayor cantidad por las plantas de papa de la variedad Elbe-UCR (Figura 2). El K presentó un patrón de acumulación similar al observado en el N (Figura 2 A y B), donde la acumulación de K en la biomasa aérea y en la raíz llegaron de forma respectiva a valores máximos de 212 y 9,5 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds, mientras que en la biomasa de los tubérculos se acumuló un valor máximo de 134 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 2E).

La acumulación total de K presentó un incremento constante durante el ciclo del cultivo, llegando a un valor máximo de 312 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds. También se observó una pequeña disminución en la acumulación total de K a los 135 dds, con un valor de variación de -1% (Figura 2F).

La acumulación de Ca, Mg, y S en los distintos componentes de la planta se detalla en la Figura 3 para las diferentes etapas y para la totalidad del ciclo de cultivo. El calcio se acumuló principalmente en la biomasa aérea, con un incremento marcado desde los 45 a los 90 dds, tiempo a partir del cual el Ca acumulado se mantuvo relativamente estable y alcanzando un valor máximo de 50 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds. Este último valor contrasta con los contenidos de Ca obtenidos en la biomasa de los tubérculos y la raíz, los cuales alcanzaron valores de 2,3 y 4,7 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, a los 135 dds (Figura 3A). Al evaluar la acumulación total de Ca en el ciclo del cultivo, se obtuvo un valor máximo de 54 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds, con un ligero descenso (variación de -3,5%) a los 120 dds y un incremento final (2%) a los 135 dds (Figura 3B).

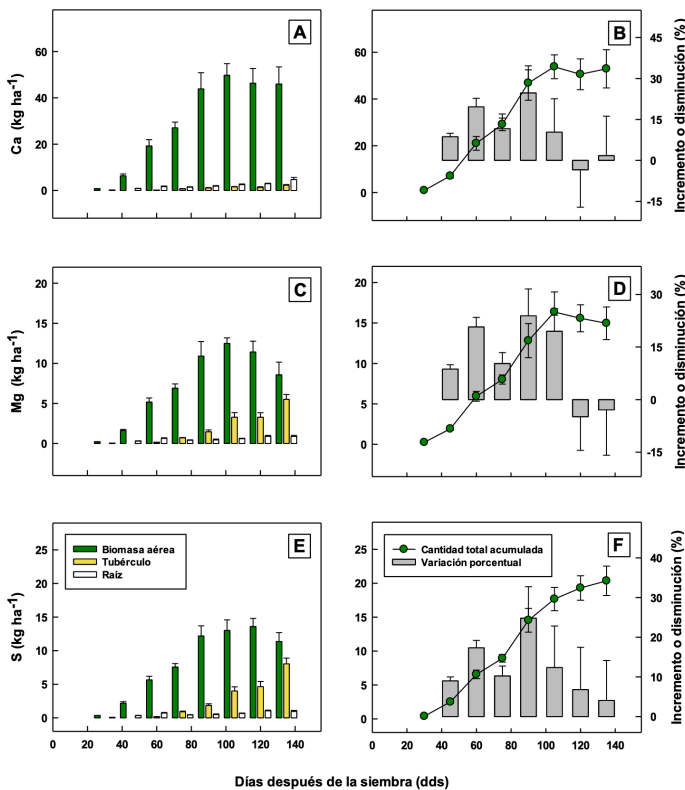


Figura 3. Acumulación de tres macronutrientes secundarios (Ca, Mg, y S) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de Ca, Mg, y S por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Ca, Mg, y S durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

De forma similar al Ca, el magnesio se acumuló principalmente en la biomasa aérea de las plantas de papa, con un incremento continuo desde los 30 hasta los 105 dds donde acumuló un valor máximo de 12,5 kg ha<sup>-1</sup>, el cual descendió paulatinamente hasta alcanzar 8,6 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 3C). Se observó un incremento en la acumulación de Mg en la biomasa de los tubérculos a partir de los 90 dds hasta obtener un valor máximo de 5,5 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds.

Los valores de acumulación total del Mg presentaron una tendencia similar a la observada en la biomasa aérea, obteniendo un valor máximo de acumulación de Mg de 16,4 kg ha<sup>-1</sup> a los 105 dds. A partir de los 105 dds se observó un descenso paulatino en las cantidades de Mg (valores de variación de -5 y -3%) hasta los 135 dds (Figura 3D).

Finalmente, la acumulación de azufre presentó un comportamiento muy similar al del magnesio, es decir, valores crecientes de acumulación en la biomasa aérea y de los tubérculos hasta alcanzar valores máximos de 14 kg ha<sup>-1</sup> a los 120 dds y 8 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, respectivamente (Figura 3E). La acumulación total de este elemento presentó un patrón similar al observado para el fósforo, con un incremento continuo hasta alcanzar un valor máximo de 20,4 kg ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 3F).

#### **Elementos menores acumulados en la biomasa de las plantas de papa**

La acumulación de los elementos menores (Zn, Cu, Fe, Mn y B) durante el ciclo de cultivo se resume en las Figuras 4 y 5. En el caso del zinc, la acumulación en la biomasa aérea, tubérculos y raíz llegó de forma respectiva a valores máximos de 222, 82,3 y 31,5 g ha<sup>-1</sup> a los 135 dds (Figura 4A). De forma similar, la acumulación total de Zn en el cultivo alcanzó un valor máximo de 336 g ha<sup>-1</sup> a los 135 dds, con un ligero descenso (variación de -2%) a los 120 dds (Figura 4B).

Al evaluar el comportamiento de la acumulación del cobre, se observó un valor de 28 ± 27 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 60 dds en el tubérculo, el cual desciende drásticamente hasta 4,5 g ha<sup>-1</sup> a los 75 dds, momento a partir del cual incrementa de forma paulatina hasta alcanzar un valor de 40 g ha<sup>-1</sup> a los 135 días (Figura 4C). Este comportamiento también se observó en la acumulación total de Cu durante el ciclo del cultivo, donde se observaron dos descensos a los 75 y 120 dds, así como tres incrementos significativos a los 60, 90 y 135 dds, con valores de variación de 29, 21 y 42%, respectivamente, hasta alcanzar un valor total acumulado de 123 g ha<sup>-1</sup> (Figura 4D).

Por otro lado, el hierro se acumuló principalmente en la biomasa aérea, con un valor máximo de 5984 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 100 dds (Figura 4E). La acumulación total a lo largo del ciclo de cultivo fue muy similar al observado en el cobre. En este aspecto, se observaron dos descensos a los 75 y 120 dds, así como dos incrementos significativos a los 60, y 105 dds, con valores respectivos de variación de 48 y 166%; siendo en este último periodo (105 dds) donde se alcanza un valor total acumulado de 6250 g ha<sup>-1</sup> (Figura 3F).

El manganeso presentó la tendencia de acumulación en los distintos componentes de la biomasa de las plantas de papa: Biomasa aérea >>> Raíces >> Tubérculos. En ese sentido, en la biomasa aérea se obtuvo un valor máximo de 50 g ha<sup>-1</sup> acumulado a los 105 dds. Curiosamente, en ese mismo momento el Mn presentó un valor máximo de 7 g ha<sup>-1</sup> en la biomasa de los tubérculos (Figura 5A). En adición, la acumulación total de Mn presentó una tendencia al incremento desde 30 hasta los 105 dds donde alcanza un máximo promedio de 337 kg ha<sup>-1</sup>, y posteriormente se observó una caída en la cantidad total acumulada, con dos descensos a los 120 y 135 con variación de -23 y -22%, respectivamente (Figura 5B).

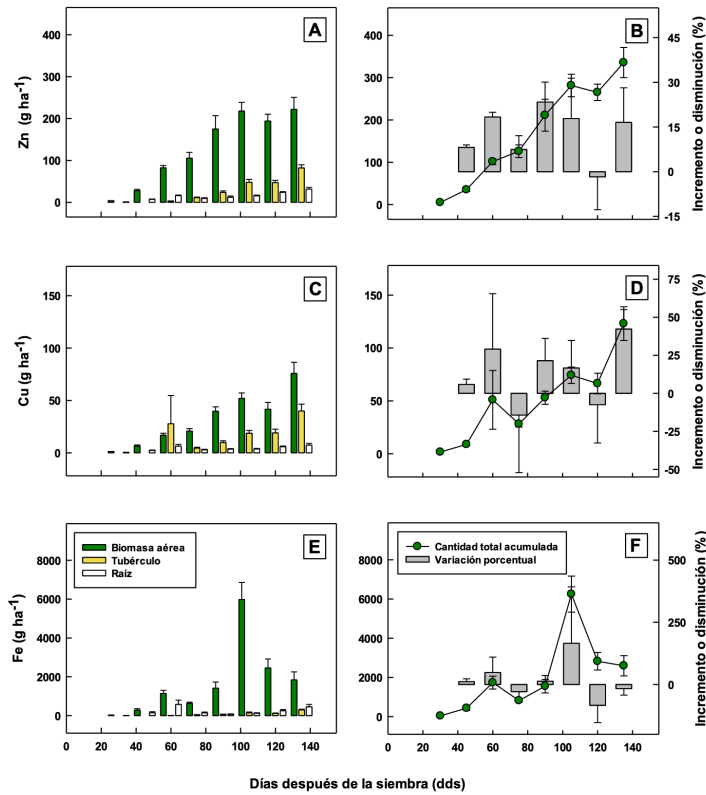


Figura 4. Acumulación de tres microelementos (Zn, Cu, y Fe) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A, C y E) representan respectivamente la acumulación de Zn, Cu, y Fe por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B, D y F) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Zn, Cu, y Fe durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

Finalmente, la acumulación del boro en los distintos componentes de la biomasa de las plantas de papa Elbe-UCR se resume en la Figura 5C. Se observó la siguiente tendencia de acumulación de B en los componentes evaluados: Biomasa aérea >>> Tubérculos >> Raíces; así como un valor máximo de  $186\ g\ ha^{-1}$  acumulado a los 105 dds en la biomasa aérea.

Al evaluar la acumulación total del B durante el ciclo de esta variedad de papa, se observó una tendencia al incremento desde los 30 hasta los 105 dds, momento donde se alcanza un valor máximo de  $211\ g\ ha^{-1}$ . A partir de este momento se observó un leve descenso en la acumulación (variación de  $-5\%$ ) seguido de un incremento en los 135 dds hasta alcanzar un valor máximo de  $212\ g\ ha^{-1}$  (Figura 5D).

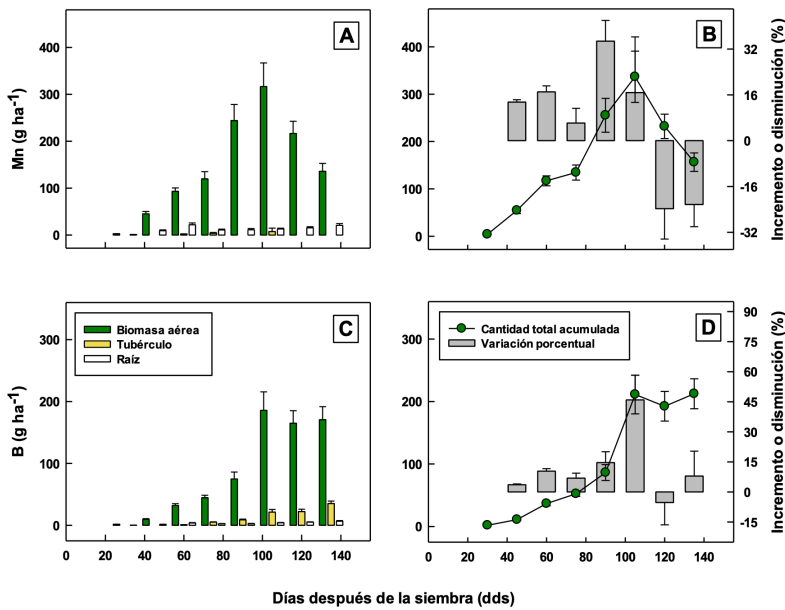


Figura 5. Acumulación de dos microelementos (Mn y B) en la biomasa de la papa variedad Elbe-UCR cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. Paneles izquierdos (A y C) representan respectivamente la acumulación de Mn y B por componente de la biomasa de la planta. Paneles derechos (B y D) representan respectivamente la acumulación total y la variación porcentual de Mn y B durante el ciclo del cultivo. Barras de error como error estándar.

### Validación de las curvas de acumulación de nutrientes de la variedad Elbe-UCR Efecto de los tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de la papa

Los resultados obtenidos para el ensayo de validación de los datos de acumulación anteriormente mencionados (Figuras 2-5) se resumen en la Figura 6. No se observaron diferencias significativas entre los rendimientos obtenidos para tratamientos evaluados (Tabla 2, Figura 6).

Indiferentemente de aumentar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante aplicado al cultivo (Curva + 25% y Curva - 25%) no se

generó un cambio significativo en el rendimiento (HSD Tukey = 8896,44 kg ha<sup>-1</sup>) al compararlo con el plan de fertilización desarrollado a partir de los valores de acumulación de nutrientes obtenidos en las curvas (Curva) o el manejo de la fertilización realizada por el agricultor (Testigo).

Estos resultados obtenidos refuerzan la validez de los valores de acumulación de nutrientes obtenidos a través de las curvas, ya que no se observó una disminución significativa en el rendimiento de la papa cuando se consideran los criterios de fertilización desarrollados a partir del conocimiento de las cantidades totales acumuladas por la variedad Elbe-UCR.

Tabla 2. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) obtenido para la variable rendimiento total en el ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Fuente de variación	SC†	gl†	CM†	F†	p-value
Tratamiento	70070000	3	23356666,7	1,05	0,4234
Error	178605000	8	22325625		
Total	248675000	11			

† SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F: Factor F.

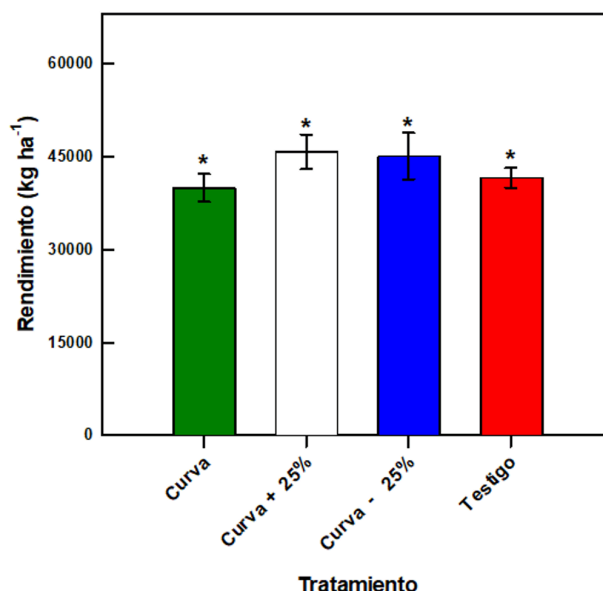


Figura 6. Rendimiento total obtenido para los tratamientos de fertilización evaluados en el ensayo de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos de la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica. \* Medias no presentaron diferencias significativas ( $p$ -value >0,05) de acuerdo con la prueba HSD-Tukey. Barras de error como error estándar.

### Presupuestos parciales y análisis de costos de producción

En adición a los resultados obtenidos en los ensayos de validación de las curvas de

acumulación, se evaluaron los costos de producción asociados. Los costos variables por la fertilización granulada para cada tratamiento (Figura 6), así como los valores de rendimiento e ingresos generados se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Inversión y ganancia neta obtenida para los tratamientos de fertilización evaluados en los ensayos de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Tratamiento	Peso	Siembra	Aporca	Mano de obra	Inversión total	Diferencia en inversión con respecto al testigo	Ingresos *	Ingresos más diferencia en inversión	Diferencia en ganancia con respecto al testigo
	kg ha <sup>-1</sup>					Colones (¢) ha <sup>-1</sup>			
Curva	39900	401422	1004336	50850	1456608	-25398	23940000	23914602	-1075398
Curva + 25%	45850	501778	1255420	63550	1820748	-389538	27510000	27120462	2130462
Curva - 25%	45150	301067	753252	38150	1092469	338741	27090000	27418741	2438741
Testigo †	41650	418148	933062	50000	1431210		24990000	24990000	

† manejo de fertilización habitual del agricultor.

\*calculado con un precio de venta de ¢600 kg<sup>-1</sup>.

La menor inversión económica y el mayor retorno por rendimiento se obtuvo en el tratamiento Curva - 25% (0,75 veces la fertilización recomendada a partir de la curva de absorción). Entre las fórmulas fertilizantes para siembra y aporca y los respectivos costos de mano de obra para aplicarlos, se invirtió un total de ¢1 092 469 y se obtuvo un incremento de 9,8% en el rendimiento con respecto al manejo de fertilización habitual del agricultor (Testigo). Para el tratamiento Curva + 25% (1,25 veces la fertilización recomendada a partir de la curva de absorción) se invirtió un total de ¢1 820 748, con un rendimiento que superó en 8,5% al que se obtuvo por el tratamiento testigo.

En el tratamiento Curva (fertilización recomendada a partir de las curvas de absorción) se invirtió un total de ¢1 456 608, y se obtuvo un rendimiento de 4,3% por debajo del obtenido en el tratamiento Testigo.

El tratamiento (con mayor retorno económico) fue el tratamiento Curva - 25%, en el que cual se obtuvo un incremento de ¢2 438 741 respecto al testigo. El tratamiento Curva + 25% presentó de igual forma una ganancia de ¢2 130 462, pero la inversión en fertilizante adicional lo colocó como el tratamiento de mayor costo de inversión.

## DISCUSIÓN

### Crecimiento y acumulación de biomasa del cultivo de la papa Elbe-UCR

De forma general, la acumulación de materia seca se vio direccionada principalmente hacia la biomasa aérea, y a partir de los 60 dds se observó que la acumulación de materia seca en la biomasa de los tubérculos incrementó significativamente hasta representar cerca de un 70% de la biomasa total acumulada 135 dds (Figura 1), de forma similar a lo observado en otros estudios de crecimiento en distintas variedades de papa distintas (Cabalceta *et al.* 2005, Oliveira *et al.* 2016, de Almeida *et al.* 2018).

Al respecto, da Silva *et al.* (2020) observaron el mismo patrón de incremento en la acumulación de materia seca a partir de los 55 dds en cinco variedades de papa en Brasil. Sierra *et al.* (2013) determinaron que el mayor incremento en la materia seca de la parte aérea se da a los 45 dds en la variedad Karú y que posteriormente los tubérculos se vuelven el mayor sumidero de materia seca, además de que las hojas y tallos no incrementan biomasa.

Curiosamente, en la variedad Elbe-UCR se observó un incremento en la biomasa radical a los 60 dds, el cual se mantuvo más o menos similar en

las restantes fechas de evaluación. Badillo-Tovar *et al.* (2004) mencionan que la biomasa radical permanece constante una vez finalizada la etapa de crecimiento vegetativo, representando apenas un 1,1% de la materia seca total. Pese a esto anterior, en la variedad Elbe-UCR la biomasa de raíz representó un 3% del total de materia seca, lo cual es característico y distintivo de este material. En este sentido, una mayor masa radicular puede representar ventajas bajo condiciones edáficas hostiles, como bajos contenidos de humedad o de nutrientes.

La variedad de papa Elbe-UCR presenta un gran potencial de rendimiento, esto debido a sus características como un sistema radical y vigor de la planta que le permiten una gran capacidad de extracción de nutrientes, lo cual se ve reflejado en la curva de crecimiento.

#### **Acumulación de nutrimentos en la biomasa del cultivo de la papa Elbe-UCR**

Los elementos que se acumularon en mayor cantidad en la biomasa total fueron el N, P, K, Ca y Mg, donde el 50% del total acumulado ocurre entre la emergencia y el inicio de la floración (Figuras 2 y 3). El orden de acumulación total de estos elementos fue  $K > N > Ca > S > Mg > P$ .

Se determinó que Elbe-UCR tiende acumular más K que N. El contenido acumulado total de K ( $312 \text{ kg ha}^{-1}$  de K) fue superior a los valores reportados en otras variedades de papa en el país, como Granola ( $284 \text{ kg ha}^{-1}$  de K) y MF-80 ( $166 \text{ kg ha}^{-1}$  de K), y ligeramente inferior a la acumulación de K por la variedad Floresta (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005). Lo contrario sucede con el N, el cual se acumula en mayor cantidad en otros cultivares de papa (Bertsch 2003). En el presente trabajo se determinó que la variedad Elbe-UCR puede absorber como máximo  $195 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno (Figura 2), 50% menos que la cantidad de nitrógeno acumulada por la variedad Floresta ( $381 \text{ kg ha}^{-1}$  N) y 16% menos de la variedad Granola ( $228 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) ambas ampliamente cultivadas en Costa Rica (Bertsch 2003). La cantidad total de N acumulado por la variedad Elbe-UCR, fue suficiente para favorecer el vigor del

área foliar, así como para obtener un rendimiento superior al promedio de  $25000 \text{ kg ha}^{-1}$  reportado para Costa Rica (Avilés y Piedra 2017).

El P total acumulado presentó un valor de  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  para un rendimiento de  $40000 \text{ kg ha}^{-1}$ . Esta cantidad fue superior a las reportadas para variedades comúnmente cultivadas en Costa Rica, entre ellas MF-80 ( $8 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) y Granola ( $8 \text{ kg ha}^{-1}$  de P), pero inferior a las cantidades requeridas por la variedad Floresta ( $23 - 27 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) para obtener rendimientos totales similares a los obtenidos en el presente trabajo (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009). Al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con los valores de acumulación total de P en el cultivo de papa reportados en la literatura ( $30 - 40 \text{ kg ha}^{-1}$  de P) en otras latitudes y con rendimientos similares (Sierra *et al.* 2013, Gómez *et al.* 2017), la variedad Elbe-UCR presenta una acumulación menor de este elemento.

Para los elementos Ca y Mg, las cantidades totales acumuladas presentaron diferencias con las cantidades reportadas para otras variedades comerciales de papa en Costa Rica (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005). En ese sentido, el Ca total acumulado por la variedad Elbe-UCR ( $54 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca) fue superior al reportado por las variedades Floresta y Granola ( $41$  y  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca, respectivamente), e inferior a las cantidades de Ca acumulado ( $75 \text{ kg ha}^{-1}$  de Ca) por otras variedades cultivadas en Chile (Sierra *et al.* 2013). De forma contraria al Ca, el Mg total acumulado por estas dos variedades comerciales mencionadas con anterioridad fueron más elevadas ( $35$  y  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg, respectivamente) que las obtenidas para la variedad Elbe-UCR ( $16 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg). Estos valores de Mg total acumulado fueron similares a los reportados por da Silva *et al.* (2020) para cuatro variedades de papa ( $17$ ,  $30$ ,  $26$ , y  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg para Agata, Asterix, Atlantic, y Taurus, respectivamente) cultivadas en Minas Gerais, Brasil.

Por otro lado, los elementos menores se acumularon en mayor cantidad en la biomasa total de la variedad de papa Elbe-UCR (Figuras 4 y 5). El orden de acumulación total de estos elementos fue  $Fe \gg \gg Mn > Zn > B > Cu$ , y dichas cantidades

acumuladas presentaron tendencias similares a las obtenidas por Bertsch (2003) para cuatro variedades comerciales, con excepción del elemento B el cual no fue reportado en dichas variedades.

En estudios más recientes sobre acumulación de nutrimentos en variedades de papa en Costa Rica (Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009) las cantidades totales de B acumulado varían entre 42 y 162 g ha<sup>-1</sup> de B, las cuales fueron más bajas que la cantidad obtenida para la variedad Elbe-UCR (212 g ha<sup>-1</sup> de B). Curiosamente, este valor de acumulación total de B obtenido en el presente estudio fue superior a los valores obtenidos por Fernandes *et al.* (2017) en cinco variedades papa y bajo tres niveles de fósforo disponible en el suelo (37 - 144 g ha<sup>-1</sup> de B).

#### **Validación de los resultados de acumulación y costos de producción**

Un aspecto novedoso del presente estudio fue la implementación de ensayos de validación de los resultados de acumulación de nutrimentos por esta variedad de papa, así como un análisis de costos de producción asociados (presupuestos parciales), ya que los estudios de acumulación de nutrimentos por el cultivo de la papa disponibles en la literatura se limitan a la descripción del crecimiento y la dinámica de acumulación de elementos esenciales durante el ciclo de cultivo (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009).

La verificación de los resultados obtenidos a partir de las curvas de acumulación de nutrimentos resulta fundamental para determinar las dosis adecuadas para la fertilización de los cultivos, optimizando los recursos para el alcance de los valores de rendimiento deseados (Bertsch 1998). Al observar los resultados de los ensayos de validación de las curvas de acumulación de nutrimentos por la papa variedad Elbe-UCR (Figura 6), se logró verificar que al incrementar o disminuir en un 25% la cantidad de fertilizante a aplicar al cultivo (dosis obtenidas a partir de las curvas de acumulación), no se obtuvo un cambio significativo en el rendimiento, en específico, no se observó un descenso en el rendimiento.

De hecho, el análisis de costos indica que al reducir en 25% la cantidad de fertilizante calculada a partir de los datos de acumulación de la papa variedad Elbe-UCR (Curva - 25%) se obtiene un mayor rédito económico (Tabla 3). Esto anterior, podría indicar que existió un consumo excesivo de nutrientes como N, lo cual pudo reducir la tuberización al promover el desarrollo vegetativo, además de reducir la materia seca de los tubérculos (Zelalem *et al.* 2009, Ruza *et al.* 2013, Gathungu *et al.* 2015, Duguma y Chewaka 2019) generando un efecto en el rendimiento final y la relación costo-beneficio asociada a un factor parcial (Ávalos y Villalobos 2018), en este caso, la fertilización del cultivo.

El presupuesto parcial tiene como objetivo comparar el efecto de un cambio tecnológico específico sobre los costos de producción y el rendimiento final de un cultivo, sin necesidad de analizar el total de costos del cultivo (Horton 1982, Reyes 2001). Esta herramienta económica resultó en un excelente complemento a la información obtenida de las curvas de acumulación de nutrientes y los ensayos de validación (Tabla 3), pues permitió determinar un cambio en los costos asociados a la selección de fertilizantes granulados.

#### **Implicaciones de los resultados obtenidos en el presente estudio**

Las cantidades promedio acumuladas en los componentes de la biomasa total de la papa variedad Elbe-UCR se resumen en la Tabla 4. Esta información se considera fundamental para el desarrollo de los planes de fertilización y formulación comercial para esta variedad, la cual presentó patrones de acumulación distintos a los reportados en la literatura para otras variedades producidas comercialmente en Costa Rica (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009), así como en otras variedades desarrolladas y cultivadas en las regiones del Sur de América (Sierra *et al.* 2013, Gómez *et al.* 2017, da Silva *et al.* 2020, Fernández *et al.* 2017).



Tabla 4. Valores promedios de acumulación de nutrientes en la papa variedad Elbe-UCR, cultivada en Guarumos de Cartago, Costa Rica.

Muestreo	Materia seca	N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
dds	g planta <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
Tubérculo												
30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60,0	10,2	2,3	0,3	2,7	0,1	0,1	0,2	2,9	27,7	12,6	1,8	1,0
75,0	82,5	11,8	1,7	18,6	0,7	0,7	0,9	11,4	4,5	45,0	3,9	5,3
90,0	183,1	2135,7	3,6	41,4	1,1	1,5	1,9	23,8	9,9	66,3	0,0	8,9
105,0	376,6	4393,2	6,8	82,3	1,6	3,3	4,0	47,9	18,6	142,0	7,4	21,3
120,0	456,5	5325,4	8,3	89,8	1,3	3,3	4,7	47,3	19,1	116,6	0,0	22,3
135,0	719,9	8398,8	13,9	133,5	2,3	5,5	8,0	82,3	40,0	298,4	0,0	35,2
Biomasa aérea												
30,0	7,4	85,9	0,4	4,6	0,7	0,2	0,3	3,9	1,2	24,6	2,9	1,7
45,0	44,7	521,0	2,5	27,6	6,3	1,6	2,2	27,9	6,6	282,0	45,3	9,6
60,0	116,7	1361,0	7,2	72,9	19,2	5,2	5,7	82,5	16,8	1145,7	93,2	31,9
75,0	180,1	2100,9	9,6	115,5	27,1	6,9	7,6	105,4	20,8	633,5	119,9	44,6
90,0	256,4	2990,9	13,8	180,1	43,9	10,9	12,2	175,1	39,6	1414,9	244,1	74,9
105,0	315,5	3680,4	12,9	193,1	49,8	12,5	13,0	217,9	52,0	5983,6	316,7	185,8
120,0	333,4	3890,1	13,3	212,2	46,3	11,4	13,6	194,1	41,6	2456,7	216,7	165,0
135,0	278,3	3247,1	88,5	5,4	166,5	46,0	8,6	222,0	75,8	1842,9	135,9	170,7
Raíz												
30,0	1,2	13,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	1,2	0,4	12,4	1,2	0,2
45,0	7,4	85,9	3,3	2,3	0,8	0,3	0,3	7,2	2,3	150,9	9,2	1,4
60,0	18,7	218,6	6,8	5,5	1,7	0,6	0,7	16,2	6,4	576,0	22,1	3,8
75,0	18,4	214,7	4,8	4,6	1,4	0,4	0,4	9,3	2,9	141,4	10,8	2,6
90,0	17,0	198,3	4,5	4,7	1,8	0,5	0,5	12,2	3,5	74,6	11,3	2,6
105,0	25,1	292,8	6,0	6,3	2,5	0,6	0,7	15,7	3,7	124,5	12,7	4,1
120,0	34,0	396,4	7,8	9,5	2,9	0,9	1,1	24,0	5,8	252,1	15,5	5,2
135,0	31,8	370,5	7,6	8,0	4,7	0,9	1,0	31,5	7,3	454,2	20,6	6,6

Muestreo	Materia seca		N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Cu	Fe	Mn	B
	g planta <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>											
dds	kg ha <sup>-1</sup> *												
	Total												
30,0	8,5	99,6	6,0	0,4	4,9	0,9	0,3	0,4	5,0	1,6	37,0	4,0	1,8
45,0	52,0	606,9	36,7	2,8	30,0	7,1	1,9	2,5	35,1	8,9	432,8	54,5	11,0
60,0	145,6	1699,1	80,3	6,3	81,1	21,0	5,9	6,6	101,5	51,0	1734,3	117,1	36,7
75,0	280,9	3277,6	112,9	7,8	138,7	29,1	8,0	8,9	126,1	28,2	820,0	134,6	52,5
90,0	456,4	5324,9	157,0	13,2	226,2	46,8	12,8	14,5	211,1	53,0	1555,8	255,4	86,3
105,0	717,1	8366,4	175,9	15,5	281,6	53,8	16,4	17,7	281,5	74,3	6250,1	336,8	211,2
120,0	823,9	9611,9	195,0	17,1	311,5	50,6	15,6	19,3	265,3	66,4	2825,4	232,1	192,4
135,0	1030,0	12016,4	171,5	20,0	308,1	52,9	15,0	20,4	335,7	123,1	2595,5	156,5	212,5
Total		12016,4	195,0	20,0	311,5	53,8	16,4	20,4	335,7	123,1	6250,1	336,8	212,5
Cosecha		8398,8	75,4	13,9	133,5	2,3	5,5	8,0	82,3	40,0	298,4	7,4	35,2
Cosecha (%)		69,9%	38,7%	69,7%	42,9%	4,2%	33,7%	39,5%	24,5%	32,5%	4,8%	2,2%	16,6%

\*Calculado con una densidad de 35000 plantas ha<sup>-1</sup>.  
El rendimiento promedio total obtenido fue de 40000 kg ha<sup>-1</sup>.

El manejo de la fertilización con NPK para la variedad evaluada en el presente estudio debería mantener un equilibrio entre las cantidades aplicadas de K y N, ya que si bien ambos elementos mantienen un sinergismo en el cultivo de papa (Grzebisz *et al.* 2017) se requiere un balance entre las cantidades de N y K, ya que un exceso de alguno de estos dos nutrientes podría resultar contraproducente. En la literatura se ha reportado que dosis muy elevadas de N prolongan la fase vegetativa y afectan las propiedades poscosecha de la papa (Giletto *et al.* 2013, Ruza *et al.* 2013, Duguma y Chewaka 2019).

Para la variedad de papa Elbe-UCR, se hipotetizó una tendencia al desarrollo de tubérculos pequeños por desbalances entre el N y K, por lo que se redujo considerablemente las aplicaciones de fuentes nitrogenadas, y se incrementó las aplicaciones con fuentes altas en potasio en comparación con las recomendaciones para otras variedades de papa disponibles en la literatura (Bertsch 2003, Cabalceta *et al.* 2005, Alvarado *et al.* 2009, Grzebisz *et al.* 2017, da Silva *et al.* 2020).

En el presente trabajo, se determinó la necesidad de reducir las dosis de N (195 kg ha<sup>-1</sup> de N) y se evaluó el uso del Kmag (0-0-22-18-22 (S)) como una fuente de K, Mg y S, generando un excelente rendimiento de tubérculos de tamaño comercial en comparación con los valores de rendimiento promedio reportados para Costa Rica (Avilés y Piedra 2017).

Pese a lo anterior, el ajuste de las dosis de fertilizante a partir de fórmulas comerciales disponibles en el mercado resultó difícil de conseguir. Esto último sugiere la necesidad de continuar con las investigaciones sobre dosis y formulación para esta variedad, la cual, debido a sus atributos como una mayor tolerancia a plagas y enfermedades, su alto contenido de

sólidos y bajo contenido de azúcares reductores (ideal para uso industrial), se presenta como una variedad muy prometedora para la agrocadena costarricense de papa.

## CONCLUSIONES

Los requerimientos nutricionales de la variedad Elbe-UCR son distintos a los de otras variedades que los productores utilizan actualmente en Costa Rica. La variedad Elbe-UCR presentó una gran capacidad de extracción de calcio y potasio, y no requiere los niveles altos de nitrógeno que se aplican regularmente los productores en Costa Rica.

Las fuentes genéricas comerciales de fertilizante granulado que se comercializan en la actualidad no se adaptan completamente a los requerimientos nutricionales de Elbe-UCR, pues se requiere mayor cantidad de calcio y menor cantidad de nitrógeno. Dichas proporciones son difíciles de conseguir en las fórmulas comerciales disponibles, por lo que se debe implementar las aplicaciones con fuente de calcio de forma independiente.

Los resultados obtenidos en la validación de las curvas de acumulación y el análisis de presupuestos parciales para la variedad Elbe-UCR, demostraron cambios en la estructura de costos de producción con los cambios en las dosis de fertilizante, donde un incremento en las dosis de fertilizante no siempre representó mayores rendimientos.

El potencial de rendimiento, características destacables en vigor, sanidad de follaje, así como propiedades industriales para la elaboración de bastones y frituras, hacen de la variedad Elbe-UCR promisoría para el mercado de Costa Rica.

## LITERATURA CITADA

- Alvarado, A; Bertsch, F; Bornemisza, E; Cabalceta, G; Forsythe, W; Henríquez, C; Mata, RA; Molina, E; Salas, R. 2001. Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo y Centro de Investigaciones Agronómicas-Universidad de Costa Rica. 111 p.
- Alvarado, A; Iturriaga, I; Smyth, JT; Ureña, JM; Portuguez, E. 2009. Efecto de la fertilización con fósforo sobre el rendimiento y la absorción de nutrimentos de la papa en un Andisol de Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(1):45-61. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v33i1.6734>
- Alvarado, A; Mata, R. 2016. Soils of Costa Rica: an agroecological approach. Chapter 4. *In* Kappelle M (ed.). *Costa Rican Ecosystems*. Chicago, USA, University of Chicago Press. p. 64-93.
- Ávalos, J; Villalobos, A. 2018. Análisis económico: un estudio de caso de *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. *Agronomía Mesoamericana* 29(1):95-104. DOI: <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27901>
- Avilés, J; Piedra, R. 2017. Manual del cultivo de papa en Costa Rica (*Solanum tuberosum* L.) San José, Costa Rica, INTA (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria). 92 p.
- Badillo-Tovar, V; Castellanos Ramos, J; Muñoz Ramos, J; Sánchez García, P; Villalobos-Reyes, S; Vargas-Tapia, P. 2004. Demanda nutrimental del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, en la región del bajo. *Revista Chapingo Serie Hortícola* 10(1):67-74.
- Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. p. 83-110
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, ACCS. p. 184-189.
- Bertsch, F; Bejarano, JA; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):137-142.
- Brenes, A; Gómez-Alpizar, L. 2009. La variedad de papa Desiree en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 33(1):155-157. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v33i1.6743>
- Brenes, A; Rivera, C; Vásquez, V. 2002. Principales enfermedades y plagas de la papa en Costa Rica. San José, Costa Rica, EUNED. s. p.
- Bonnel, E. 2008. Potato Breeding: a Challenge, as ever!. *Potato Research* 51(3):327-332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9116-z>
- Buol, SW; Southard, RJ; Graham, RC; McDaniel, PA. 2011. Soil genesis and classification. (6 ed.). Chichester, UK, John Wiley & Sons. p. 543.
- Cabalceta, G; Saldías, M; Alvarado, A. 2005. Absorción de nutrimentos en el cultivar de papa MNF-80. *Agronomía Costarricense* 29(3):107-123. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v29i3.6785>

- Cavazos, T; Bettolli, ML; Campbell, D; Sánchez Rodríguez, RA; Mycoo, M; Arias, PA; Rivera, J; Simões-Reboita, M; Gulizia, C; Hidalgo, HG; Alfaro, EJ; Stephenson, TS; Sörensson, AA; Cerezo-Mota, R; Castellanos, E; Ley, L; Mahon, R. 2024. Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Frontiers in Climate* 6: 1392033. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1392033>
- Connell, TR; Koenig, JP; Stevenson, WR; Kelling, KA; Curwen, D; Wyman, JA; Binning, LK. 1991. An integrated systems approach to potato crop management. *Journal of Production Agriculture* 4(4):453-460. DOI: <https://doi.org/10.2134/jpa1991.0453>
- da Silva, C; Soares, M; Ferreira, M; Cavalcante, A; de Andrade, G; de Aquino, L. 2020. Dry matter and macronutrient extraction curves of potato varieties in the Alto Paranaíba region, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 24(3):176-186. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n3p176-186>
- de Almeida, F; Torres, W; Cabrera, J; Arzuaga, J. 2018. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L., cv Romano), en la provincia de Huambo, Angola, bajo dos densidades de plantación. *Cultivos Tropicales* 39(3):31-40.
- Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 61 p.
- Duguma, H; Chewaka, M. 2019. Role of nitrogen on potato production: a review. *Journal of Plant Sciences* 7(2):36-42.
- Earle, R. 2020. *Feeding the People: The Politics of the Potato*. s. l. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108688451.001>
- Fernandes, AM; Soratto, RP; Souza, EFC; Job, ALG. 2017. Nutrient uptake and removal by potato cultivars as affected by phosphate fertilization of soils with different levels of phosphorus availability. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 41:e0160288. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160288>
- Gathungu, GK; Aguyoh, JN; Isutsa, DK. 2015. Optimization of seed potato specific density, starch and dry matter contents and tuberization capacity of resultant plants through integrated irrigation, nitrogen and phosphorus management. *Journal of Plant Sciences* 3(4):225-233.
- Giletto, C; Monti, M; Ceroli, P; Echeverria, H. 2013. Efecto de la fertilización con nitrógeno sobre la calidad de tubérculos de papa (var. Innovator) en el sudeste Bonaerense. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 14(2):217-222.
- Gómez-Alpízar, L; Carbone, I; Ristaino, JB. 2007. An Andean origin of *Phytophthora infestans* inferred from mitochondrial and nuclear gene genealogies. *Proceedings of the National Academy of Science* 104(9):3306-3311. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0611479104>
- Gómez, M; Magnitskiy, S; Rodríguez, L; Darghanm A. 2017. Accumulation of N, P and K in the tubers of potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. andigena) under contrasting soils of the Andean region of Colombia. *Agronomía Colombiana* 35(1):59-67.
- Grzebisz, W; Čermák, P; Rroco, E; Szczepaniak, W; Potarzycki, J; Füleky, G. 2017. Potassium impact on nitrogen use efficiency in potato – a case study from the central – east Europe. *Plant Soil Environ* 63(9): 422-427. DOI: <https://doi.org/10.17221/344/2017-pse>
- Holdridge, LR. 1967. *Life Zone Ecology*, Tropical Science Center, San José, Costa Rica.
- Horton, D. 1982. Análisis de presupuesto parcial para investigación en papa a nivel de finca. *Boletín de Información Técnica* 16. Lima, Perú, CIP (Centro Internacional de la Papa). 15 p.
- Kalra, Y. 1998. *Handbook of reference methods for plant analysis*. Soil and Plant Analysis Council, Inc. Boca Raton, FLA, CRC Press. 300 p.
- Kozak, M; Piepho, HP. 2018. What's normal anyway? Residual plots are more telling than significance tests when checking ANOVA assumptions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204(1):86-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12220>
- Nanzyo, M; Dahlgren, R; Shoji, S. 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. In Shoji, S; Nanzyo, M; Dahlgren, SR (eds.). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. *Developments in Soil Science* (21). Amsterdam, The Netherlands, Elsevier. p. 145-188.
- ONS (Oficina Nacional de Semillas). 2005. *Reglamento Técnico para la Certificación de Semilla de Papa. (Solanum tuberosum)*. Costa Rica. s. p.
- Oliveira, JS; Brown, HE; Gash, A; Moot, DJ. 2016. An explanation of yield in three potato cultivars. *Agronomy Journal* 108(4):1434-1446. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0486>
- Prasad, KK. 2018. Challenges and opportunities in potato production towards sustainable horticulture development. In *Sustainable Horticulture Development and Nutrition Security* (Vol. 3). Balgaluru, India, Scientific Publishers. p. 194-205.
- R Studio Team. 2015. *R Studio: Integrated Development for R*. Boston: R Studio, Inc. (en línea). Consultado 23 mar. 2024. Disponible en <http://www.rstudio.com>
- Reyes, M. 2001. Análisis económico de experimentos agrícolas con presupuestos parciales: re-enseñando el uso de este enfoque. *Boletín informativo* 1. Universidad de San Carlos, Guatemala. 31 p.

- Ruza A; Skrabule, I; Vaivode, A. 2013. Influence of nitrogen on potato productivity and nutrient use efficiency. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. 67(3):247-253. DOI: <https://doi.org/10.2478/prolas-2013-0043>
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2024. Boletín Estadístico Agropecuario 34. Serie Cronológica 2019 – 2022. (en línea). Consultado 2 jul. 2024. Disponible en <http://www.sepsa.go.cr/>
- Sierra, BC; Santos, A; France, I; Kalazich, B; Contreras, S. 2013. El cultivo de la papa en la región de Coquimbo. Manejo del suelo, fertilización y algunos otros factores de manejo agronómico. Boletín INIA N° 266. La Serena, Chile. 134 p.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. (12 ed.). United States Department of Agriculture. Lincoln, Nebraska, Natural Resources Conservation Service. 362 p.
- Solano, J; Villalobos, R. 2001. Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos 8(1):26-39.
- Soratto, RP; Yagi, R; Job, ALG; Fernandes, AM. 2021. Fertilization management strategies for 'Agata' potato production. Horticultura Brasileira 39:389-396. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210407>
- Zelalem, A; Tekalign, T; Nigussie, D. 2009. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to different rates of nitrogen and phosphorus fertilization on Vertisols at Debre Berhan, in the central highlands of Ethiopia. African Journal of Plant Science 3(2):16-24.



