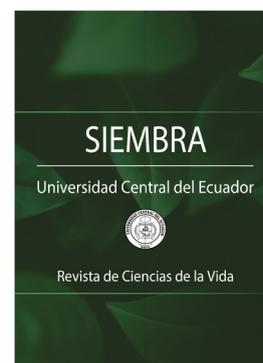


Eficiencia de uso del nitrógeno por el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en suelos volcánicos de Chimborazo, Ecuador

Nitrogen use efficiency in potato crop (*Solanum tuberosum* L.) in volcanic soils of Chimborazo, Ecuador

Fátima Gaibor¹, José Espinosa², Yamil Cartagena³,
Rafael Parra⁴, Cristhian Torres Carrera⁵, Soraya Alvarado-Ochoa⁶



Siembra 11 (2) (2024): e2665

Recibido: 23/10/2020 / Revisado: 28/01/2021 / 13/09/2021 / 25/07/2024 / Aceptado: 26/08/2024

¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Agronomía. Jerónimo Leiton y Av. La Gasca s/n. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Ecuador.

✉ fatimagaibor@gmail.com

Instituto Superior Tecnológico Crecermás. Vía Quito km 12 ½ margen derecho-segunda línea. Santa Cecilia. 210205, Sucumbios, Ecuador.

✉ fatimagaibor@istec.edu.ec

Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Sede Amazonas. Vía Quito km 12 ½ margen derecho- segunda línea. Santa Cecilia. 210205, Sucumbios, Ecuador.

✉ fatimagaibor@puceamazonas.edu.ec

Universidad de Sevilla. Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. c/María de Padilla, s/n. 41004. Sevilla, España.

✉ fatgairam@alum.us.es

https://orcid.org/0000-0003-0307-5377

² Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Agronomía. Jerónimo Leiton y Av. La Gasca s/n. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Ecuador.

✉ jespinoso@fragaria.com.ec

https://orcid.org/0000-0003-3398-6008

³ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Estación Experimental Santa Catalina. Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. Panamericana Sur Km. C.P. 170518. Mejía, Pichincha, Ecuador.

✉ yamil.cartagena@iniap.gob.ec

https://orcid.org/0000-0003-2447-2769

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias INIAP. Estación Experimental Santa Catalina. Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. Panamericana Sur Km. C.P. 170518. Mejía, Pichincha, Ecuador.

✉ rafael.parra@iniap.gob.ec

https://orcid.org/0009-0005-7633-6744

⁵ Universidad de Córdoba. Candidato a Doctorado en Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y de Desarrollo Rural Sostenible. Avd. Medina Azahara, 5, Poniente Sur. 14071. Córdoba, España.

✉ cristhiantorres066@gmail.com

https://orcid.org/0009-0006-4858-2339

⁶ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas, Carrera de Agronomía. Jerónimo Leiton y Av. La Gasca s/n. Ciudadela Universitaria. 170521. Quito, Ecuador.

✉ spalvarado@uce.edu.ec

https://orcid.org/0000-0003-4710-8281

*Autor de correspondencia:
fatimagaibor@gmail.com

Resumen

La provincia de Chimborazo es una de las zonas de mayor producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Ecuador y el manejo de la nutrición del cultivo es uno de los limitantes para alcanzar altos rendimientos. El objetivo de la presente investigación fue determinar la eficiencia de uso del nitrógeno (EU_N) y las dosis de nitrógeno (N) necesarias para llegar a la meta de rendimiento de las variedades de papa Superchola e INIAP-Natividad. Los experimentos se implementaron bajo un Diseño de Parcela Dividida con tres repeticiones en dos localidades paperas (Cortijo Bajo y Chañag) de la provincia de Chimborazo-Ecuador, desde mayo a noviembre del año 2016. Las variables evaluadas fueron extracción de N y rendimiento total de tubérculos, con las cuales se calcularon la eficiencia agronomía de N (EA_N) y las dosis de fertilización nitrogenada necesarias para las dos variedades de papa evaluadas. Los resultados indicaron que el aumento en rendimiento del cultivo de papa fue consistentemente menor a medida que se incrementaron las dosis de N con una clara respuesta cuadrática para las dos variedades. La EA_N de la variedad Superchola varió entre 130 y 160, mientras que la EA_N de la variedad INIAP-Natividad entre 120 y 150 kg de papa kg^{-1} de N aplicado; estos valores de EA_N permitieron determinar la dosis de fertilización nitrogenada ($120 kg^{-1} N ha^{-1}$ y $80 kg^{-1} N ha^{-1}$ para Superchola y 80 y $110 kg^{-1} N ha^{-1}$ para INIAP-Natividad en Cortijo Bajo y Chañag, respectivamente) que serán necesarias para lograr la meta de rendimiento en el siguiente ciclo de siembra de papa en el correspondiente dominio de recomendación de fertilización. Se concluye que el cálculo de la EA_N permite ajustar efectivamente las recomendaciones de fertilización nitrogenada para el cultivo de papa bajo las condiciones edafo-climáticas estudiadas.

Palabras clave: recomendación de fertilización por dominio, dosis crecientes de N, eficiencia agronomía de nitrógeno, rendimiento de papa.

Abstract

Chimborazo province is one of Ecuador's main potato (*Solanum tuberosum* L.) production areas, where crop nutrition management is a key factor limiting yield. This study aimed to determine the Nitrogen

SIEMBRA

https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA

ISSN-e: 2477-8850

Periodicidad: semestral

vol. 11, núm 2, 2024

siembra.fag@uce.edu.ec

DOI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i2.2665>



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial

Use Efficiency (UE_N) and the Nitrogen (N) rates needed to achieve yield goals for the Superchola and INIAP-Natividad potato varieties. Field experiments were conducted using a split-plot design with three replicates in two potato growing areas (Cortijo Bajo and Chañag) of Chimborazo province in Ecuador, from May to November 2016. The variables evaluated were total plant N recovery and total tuber yields, which were used to calculate Nitrogen Agronomic Efficiency (AE_N) and the N fertilizer rates needed to reach the yield goals for these potato varieties. Results indicated that the increase in potato yield consistently diminished as N fertilizer rates increased, with a clear quadratic function response for the two varieties. The AE_N for the Superchola variety ranged from 130 to 160 kg of tuber kg^{-1} of applied N, while the AE_N for the INIAP-Natividad variety ranged from 120 to 150 kg of tuber kg^{-1} of applied N. These values determined the N fertilizer rates required to achieve the yield goals in the following potato production cycle for the fertilizer recommendation domain: 120 kg^{-1} N ha^{-1} and 80 kg^{-1} N ha^{-1} for Superchola, and 80 and 110 kg^{-1} N ha^{-1} for INIAP-Natividad in Cortijo Bajo and Chañag, respectively. The study concluded that calculating the AE_N effectively adjusts N fertilization recommendations for potato crops under the soil and climatic conditions studied.

Keywords: fertilizer recommendation domain, increasing nitrogen rates, nitrogen agronomic efficiency, potatoes yield.

1. Introducción

La papa (*S. tuberosum*), con un consumo promedio de 26 kg persona⁻¹ año⁻¹, es uno de los cultivos más importantes de Ecuador (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2019). En el año 2018, la superficie sembrada fue de 22.107 ha con una producción total de 517.655 t. La provincia del Carchi concentra la mayor producción de papa en Ecuador con 38 % del total nacional, seguido por Chimborazo con 16,6 % y Tungurahua con 10,3 % (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2019). En el mismo año, el mayor rendimiento promedio se obtuvo también en Carchi que superó la media nacional (23,4 t ha^{-1}) con 32,0 t ha^{-1} ; mientras que Cotopaxi es la provincia con menor rendimiento con 11,2 t ha^{-1} (MAG, 2019).

Los altos rendimientos del cultivo de papa están estrechamente relacionados con una precisa y adecuada fertilización a base de macro y micronutrientes (Yara, 2021), debido a su alta demanda en fertilizantes agrícolas por hectárea, siendo esto un factor clave para incrementar los rendimientos y obtener tubérculos de calidad (Nick y Borém, 2017). Esta demanda se debe a que este cultivo posee un sistema radicular relativamente poco profundo y con reducido desarrollo en relación con el rendimiento (Muleta y Aga, 2019).

Investigaciones sobre la nutrición y fertilización del cultivo de papa en los suelos de la Sierra Centro Norte de Ecuador indicaron que el N es el nutriente que más limita la producción (Arroyo Terán, 2015). El N realiza un papel fundamental en el crecimiento y desarrollo de las plantas; y constituye alrededor del 1 al 4 % de la materia seca de una planta. Las plantas absorben N en forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Al interior de la planta, se combina con compuestos producidos por el metabolismo de los carbohidratos para la formación de moléculas orgánicas básicas como los aminoácidos y las proteínas (Bell, 2016). El N al constituirse como el componente principal de las proteínas, es parte de la mayoría de los procesos principales del desarrollo de las plantas e influye positivamente en el rendimiento de tubérculos. Adicionalmente, una cantidad idónea de N en la planta de papa ayuda en la absorción de otros nutrientes y maximiza la producción y productividad de la papa (Kahsay, 2019). De otra parte, el uso inadecuado de fuentes nitrogenadas puede ocasionar pérdidas importantes de este nutriente desde el suelo por procesos de nitrificación, lixiviación y volatilización. Adicionalmente, el exceso de N no absorbido por la planta provocaría contaminación del agua por lixiviación de nitratos (NO_3^-) y contribuiría con el calentamiento global a causa de la emisión de óxidos de N (Fagodiya et al., 2020).

La eficiencia en el uso del nitrógeno [EU_N] depende, en gran medida, de las propiedades del suelo, que entendidas y manejadas adecuadamente pueden evitar pérdidas de este nutriente, promueven la acumulación de biomasa y mantiene la vida del suelo. La EU_N se puede estudiar a través de la evaluación de fuentes adecuadas, dosis, épocas y formas de aplicación de N (Instituto Internacional de Nutrición de Plantas [IPNI], 2012). Para generar una recomendación de fertilización nitrogenada para un sitio específico o para un dominio de recomendación (áreas con condición similar de suelo y clima) se debe considerar también la meta de rendimiento del cultivo (rendimiento más alto obtenible en el sitio con la menor cantidad de N); ya que se ha demostrado que la dosis recomendada de N está asociada con el potencial genético de rendimiento de la variedad, adaptación a las características del suelo y manejo agronómico (Camacho Gallardo, 2018).

El análisis químico de N en el suelo no es necesariamente una buena herramienta de apoyo para determinar la cantidad de N biodisponible en el suelo para el cultivo como base para desarrollar una recomendación de fertilización; debido a que el contenido de las diversas formas químicas de este nutriente está influenciado por las condiciones de suelo y clima del sitio de recomendación. Por esta razón, se han desarrollado métodos alternativos de evaluación del estado nutricional del cultivo para realizar ajustes encaminados a alcanzar la meta de rendimiento (García y Espinosa, 2008). Entre estos métodos están la detección visual de síntomas de deficiencia en la planta (Havlin et al., 2014) y herramientas no destructivas como la medición de clorofila para estimar la concentración de N en las hojas (Cassman et al., 2002). Sin embargo, una alternativa efectiva para encontrar la dosis de nutrientes necesaria para lograr la meta de rendimiento es la metodología, que se basa en el comportamiento de la planta en un sitio específico y que busca satisfacer la brecha entre la cantidad de nutrientes que necesita el cultivo para acumular la meta de rendimiento y el aporte de nutrientes presentes en el suelo (Alvarado Ochoa et al., 2011; Witt et al., 2006).

2. Materiales y Métodos

La investigación se condujo en las localidades de Cortijo Bajo y Chañag, ubicadas en la parroquia Quimiag de la provincia de Chimborazo-Ecuador, entre los meses de mayo y noviembre de 2016. Los sitios están localizados a 3.149 y 3.273 m s.n.m., respectivamente, tienen una precipitación anual promedio de 618,1 mm y una temperatura promedio anual de 11,2 °C, según datos reportados de la estación meteorológica más cercana a las dos localidades (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2015). La ubicación es de 1° 42' 18,631" S de latitud y 78° 34' 20,495" W de longitud para Cortijo Bajo; mientras que Chañag está ubicado a 1° 37' 17,953" S de latitud y 78° 31' 38,28" W de longitud. El suelo de los dos sitios se clasifica como Hapludand, cuyas características físicas y químicas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los suelos de Cortijo Bajo y Chañag, Chimborazo.
Table 1. Physical and chemical characteristics of the soils in Cortijo Bajo and Chañag, Chimborazo.

Propiedad del suelo	Localidades	
	Cortijo Bajo	Chañag
Pendiente	20 %	25 %
Textura	Areno limo arcillosa	Areno limo arcillosa
pH	6,4 LA	6,7 M
MO (%)	8,4 A	7,5 A
P (mg kg ⁻¹)	19,5 A	9,8 M
K (cmol ₊ kg ⁻¹)	0,5 A	0,3 M
Ca (cmol ₊ kg ⁻¹)	20,1 A	22,6 A
Mg (cmol ₊ kg ⁻¹)	4,7 A	1,7 M
S (mg kg ⁻¹)	10,2 M	9,3 B
Zn (mg kg ⁻¹)	2,6 M	1,7 B
Cu (mg kg ⁻¹)	12,9 A	8,4 A
Fe (mg kg ⁻¹)	353,5 A	228 A
Mn (mg kg ⁻¹)	6,7 M	4,6 M
B (mg kg ⁻¹)	0,3 B	0,5 B

A= Alto, M= Medio, B= Bajo, LA= Ligeramente ácido

Fuente / Source: (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP], 2016)

Se evaluó el efecto de dosis crecientes de N (0, 60, 120, 180 y 240 kg de N ha⁻¹) en la absorción total de N, rendimiento de tubérculos y la EA_N en dos variedades de papa, Superchola e INIAP-Natividad. El fertilizante nitrogenado que se utilizó fue urea (46 % N). Todos los tratamientos recibieron la aplicación homogénea de 300 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (super fosfato triple), 100 kg de K₂O ha⁻¹ (fosfato monopotásico) y 30 kg de S ha⁻¹ (sulpo-mag) con base en el análisis de suelos. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 35,7 m² (5,95 m x 6 m) con 5 surcos separados entre sí por 1,20 m y con una separación de 0,35 m entre plantas. Se utilizó un Diseño de Parcelas Divididas, siendo la variedad la parcela grande y las dosis de N las subparcelas. Cada tratamiento se replicó tres veces. Para evaluar la extracción total de N se tomaron tres plantas al azar de los tres surcos centrales de cada parcela neta a la madurez fisiológica. Las plantas se dividieron en follaje, raíz y tubérculos, se pesaron en fresco y luego se secaron a 65 °C hasta peso constante. La materia seca de cada órgano fue molida y tamizada por una malla No. 40; misma que luego fue analizada para N total mediante el método semi micro-Kjeldahl (Bremner, 1996).

Con los resultados de la concentración de N total y de la materia seca de cada órgano se calculó la extracción total de N por planta (kg ha⁻¹). Para la determinación del rendimiento total de tubérculos se cosecharon y se pesaron los tubérculos de los tres surcos centrales de cada unidad experimental y se reportaron en t ha⁻¹. Los resultados se analizaron estadísticamente con el programa estadístico Infostat versión profesional (Di Rienzo et al., 2018). La EA_N se calculó mediante la ecuación [1].

$$EA_N = \frac{R_{+N} - R_{-N}}{\text{Dosis N}} \quad [1]$$

donde:

- EA_N = kg tubérculo por cada kg de N utilizado.
- R_{+N} = Rendimiento con la aplicación de cada dosis de N.
- R_{-N} = Rendimiento sin la aplicación de N (testigo).

Adicionalmente, se utilizó el método gráfico para estimar la EA, donde se contrasta la curva de rendimiento con los valores de la eficiencia agronómica con las dosis evaluadas, por lo tanto, la EA_N a utilizarse se localiza en el punto que esta empieza a decrecer. Este punto se localiza en la intercepción de la curva de la EA y la curva de rendimiento.

Una vez definido el cálculo de la EA_N, con esta información se procedió a calcular la dosis de N a aplicar cambiando algebraicamente los términos de la fórmula original. A continuación, se describe la fórmula para el cálculo de la dosis de N (ecuación [2]).

$$\text{Dosis de N} = \frac{R_{+N} - R_{-N}}{EA_N} \quad [2]$$

donde:

- R_{+N} = Rendimiento con la aplicación de cada dosis de N.
- R_{-N} = Rendimiento sin la aplicación de N (testigo).
- EA_N = kg tubérculo por cada kg de N utilizado.

Por otro lado, la dosis óptima fisiológica [DOF] se vincula con el nivel de nutrientes necesario para que la planta alcance un punto en el cual un elemento específico no se convierta en un factor que limite su crecimiento y desarrollo. Lograr o mantener este nivel no garantiza la obtención de rendimientos máximos, pero si los demás factores intervinientes en el sistema están en niveles óptimos, el factor nutricional en cuestión no será un obstáculo para alcanzar dichos rendimientos (Thompson y Troeh, 1982). Para la determinación de la DOF y la dosis óptima económica [DOE] se aplicó un modelo de regresión múltiple de segundo orden con ajuste cuadrático (Y = β₀ - β₁X + β₂X²) con la metodología descrita por Rebolledo (1999). A continuación, se describe las fórmulas para el cálculo de la DOF (ecuación [3]) y DOE (ecuación [4]).

$$DOF = \frac{-\beta_1}{-2\beta_2} \quad [3]$$

$$DOE = \frac{-\beta_1 - RCN}{-2\beta_2} \quad [4]$$

donde:

- β₁ y β₂ = parámetros de regresión de la función cuadrática.
- RCN = Relación de costo del nutriente por kg.

Mientras que el método gráfico se realizó mediante el contraste del rendimiento en kg ha^{-1} , la EA_N y las dosis de N, donde la curva corta a la altura de un rendimiento superior a la media esperada, con una dosis intermedia de fertilización.

Finalmente, el análisis económico se realizó con el análisis del presupuesto parcial y la tasa de retorno marginal de los tratamientos; mismo que fue propuesto por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Perrin et al., 1983).

3. Resultados y Discusión

3.1. Extracción de nitrógeno por el cultivo

Los resultados de la extracción de N por el cultivo de papa a las dosis crecientes de N aplicadas al suelo en Cortijo Bajo y Chañag se presentan en las Figuras 1 y 2, respectivamente. Se observó que la extracción de N aumenta en forma lineal con el incremento en la dosis de N en las dos variedades; es decir, que la planta absorbió en proporción directa a las cantidades de N suministradas hasta la dosis más alta (240 kg N ha^{-1}). Las plantas no pueden absorber nutrientes indefinidamente y la respuesta lineal en extracción de N hasta la dosis de 240 kg N ha^{-1} sugiere que la papa cultivada en estos suelos podría seguir absorbiendo N a dosis más altas hasta saturar su capacidad de absorción y mostrar una respuesta cuadrática. Mucho del N absorbido por la planta a altas dosis de aplicación del nutriente al suelo es consumo de lujo y no aporta al rendimiento (White, 2012).

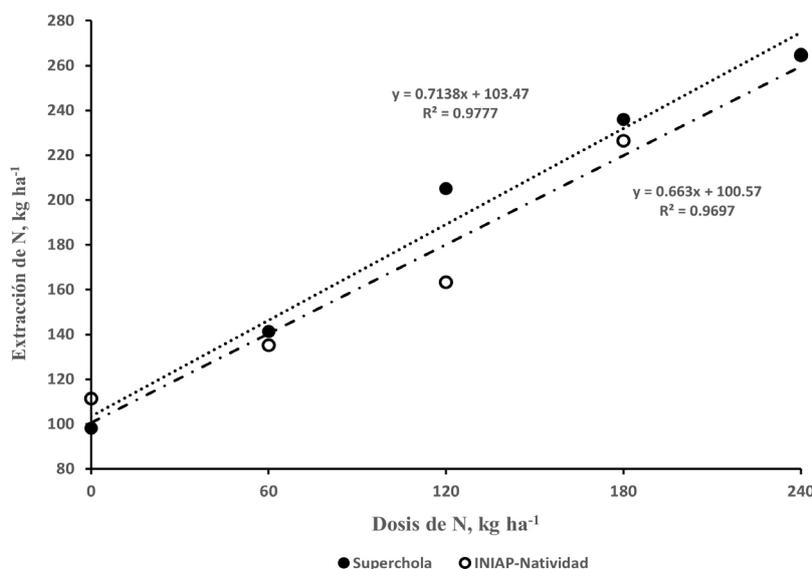


Figura 1. Extracción total de nitrógeno de las variedades Superchola e INIAP-Natividad en Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.
Figure 1. Total nitrogen extraction of the Superchola and INIAP-Natividad varieties in Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.

La extracción de nutrientes por el cultivo de papa depende de la variedad, estado de fertilidad del suelo, condiciones ambientales, rendimiento y manejo del cultivo. Estudios de absorción de nutrientes por el cultivo de papa en suelos volcánicos de Costa Rica reportados por Bertsch (2009), indican que este cultivo absorbe 230 kg N ha^{-1} para un rendimiento de 69 t ha^{-1} ; y que la máxima absorción ocurre a los 87 días después de la siembra. Por otro lado; Oyarzún et al. (2002), sostienen que el cultivo de papa de la Sierra de Ecuador puede extraer 70 kg N ha^{-1} cuando el rendimiento es de 17 t ha^{-1} y de 220 kg N ha^{-1} para un rendimiento de 50 t ha^{-1} . Adicionalmente, la planta de papa absorbe la mayoría del N antes del período de máximo crecimiento y desarrollo del tubérculo; lo que sugiere que la planta asimila más del 50 % del total de N absorbido antes del llenado de tubérculo con una demanda diaria que varía entre 6 y $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Horneck y Rosen, 2008).

El encontrar una recomendación de la cantidad de N a aplicarse al suelo para llegar a la meta de rendimiento en un sitio específico o en un dominio de recomendación es una tarea difícil por la dinámica de este nutriente en el suelo. Se podría pensar entonces que la absorción total de N a la madurez fisiológica podría ser un parámetro que ayude a encontrar la dosis apropiada de N para llegar al rendimiento objetivo en busca de reponer los nutrientes que el cultivo ha extraído del suelo y que no han sido reciclados (Gómez Sánchez, 2014).

Los datos de la presente investigación demuestran que hubo una extracción alta de N en el tratamiento testigo (sin aplicación de N) sugiriendo que existe un aporte importante de N nativo del suelo en los dos sitios que, según el análisis correspondiente, tienen un alto contenido de materia orgánica (Tabla 1). El nivel alto de materia orgánica reportado en el análisis y la respuesta a la fertilización nitrogenada estaría explicado por la calidad de materia orgánica estable que caracteriza a los suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas de la Sierra Norte de Ecuador en elevaciones superiores a 3.200 m s.n.m., cuya fracción arcillosa está dominada por complejos humus-aluminio (Zehetner et al., 2003). Por lo que, los compuestos orgánicos atrapados en estos complejos son inactivos, dejando de ser parte de la fracción orgánica activa del suelo que se mineraliza y es capaz de liberar N al suelo (Benavides y Gonzales, 1998; Inoue y Higashi, 1988; Takahashi y Dahlgren, 2016).

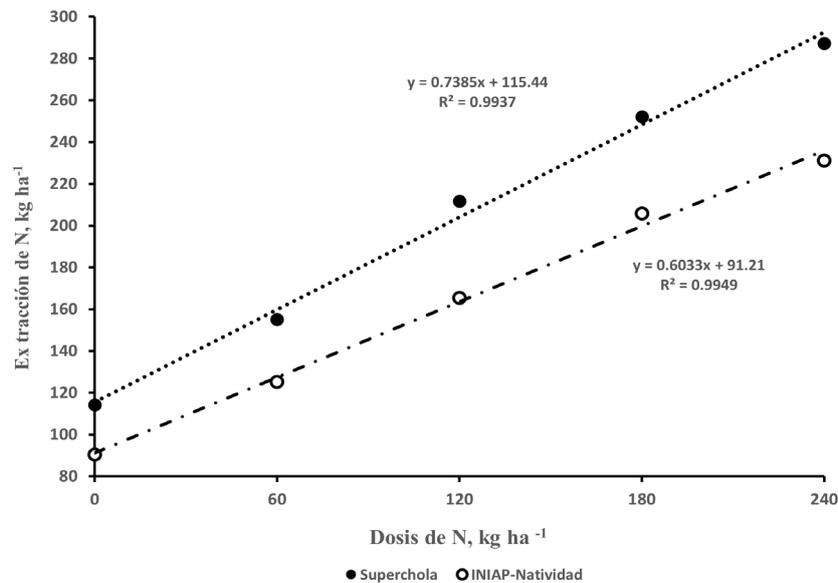


Figura 2. Extracción total de nitrógeno de las variedades Superchola e INIAP-Natividad en Chañag, Quimiag, Chimborazo.
Figure 2. Total nitrogen extraction of the Superchola and INIAP-Natividad varieties in Chañag, Quimiag, Chimborazo.

3.2. Rendimiento de tubérculos

La respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N en el rendimiento de tubérculos de papa tuvo un comportamiento diferente al de la absorción total de N en los dos sitios y en las dos variedades evaluadas; ya que los incrementos en rendimiento fueron consistentemente menores a medida que se incrementaron las dosis de N en clara respuesta cuadrática; comportamiento que se conoce como rendimientos decrecientes a la aplicación de dosis de N (Figuras 3 y 4). Este comportamiento ha sido documentado en diversos sitios en el mundo; mostrando diferentes potenciales de rendimiento dependiendo de las variedades evaluadas y de las condiciones de fertilidad del suelo (Banerjee et al., 2016).

Con los valores de las curvas de rendimiento, se puede calcular la dosis óptima fisiológica [DOF] (el punto más alto de la curva) que indicaría la dosis de N necesaria para lograr ese rendimiento, valor que pasaría a ser la recomendación de N para el sitio. Sin embargo, estos valores son casi siempre muy altos al no considerar la EU_N . En este estudio, los valores calculados de DOF para las variedades Superchola e INIAP-Natividad para Cortijo Bajo fueron de 227 y 538 kg de N ha⁻¹; respectivamente. Los datos altos e irreales obtenidos para INIAP-Natividad se deben a que el cálculo debe encontrar el punto teórico más alto de la curva de respuesta que continúa creciendo luego de la última dosis de N evaluada en el experimento (240 kg N ha⁻¹). Lo mismo sucede en la localidad de Chañag (Figuras 3 y 4). Como se observa, es difícil utilizar la DOF como el valor para la recomendación de fertilización de N para el cultivo de papa en el dominio de recomendación de los sitios estudiados. Oyarzún et al. (2002), consideran que el valor de la DOF para las zonas paperas de las provincias de Pichincha, Cotopaxi, Carchi y Cañar es de 160 kg de N ha⁻¹, que quizá sea un valor más real, pero que incluye a todas las variedades y todos los dominios de recomendación de las zonas de producción de papa en la Sierra Norte de Ecuador.

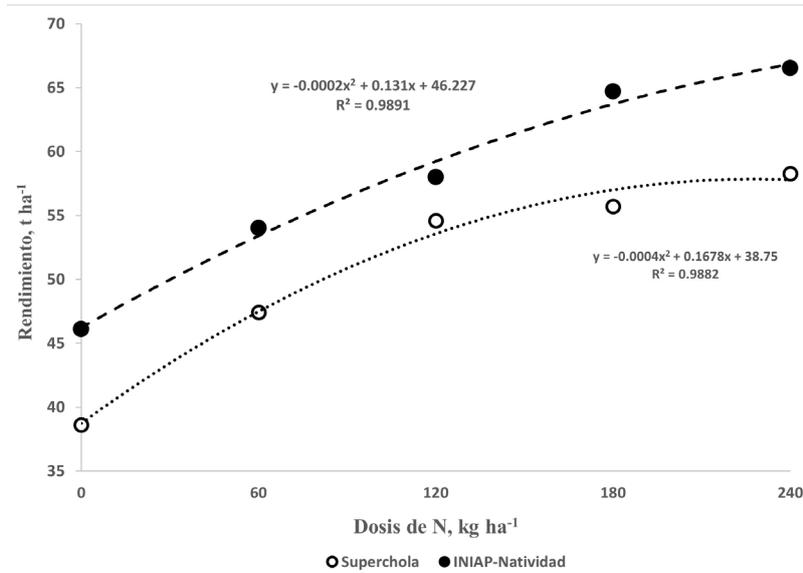


Figura 3. Efecto de las dosis de nitrógeno en el rendimiento total de tubérculos de papa en Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.
Figure 3. Effects of nitrogen doses on the total tuber yield of potatoes in Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.

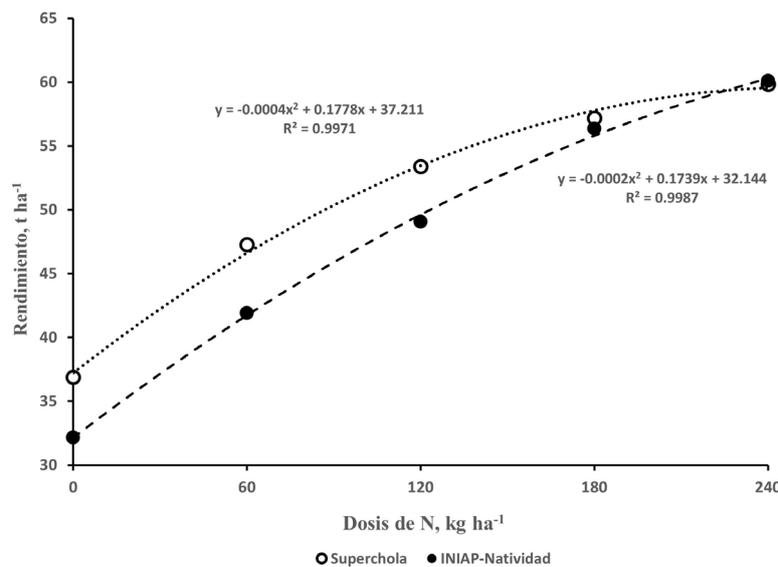


Figura 4. Efecto de las dosis de nitrógeno en el rendimiento total de tubérculos de papa en Chañag, Quimiag, Chimborazo.
Figure 4. Effects of nitrogen doses on the total tuber yield of potatoes in Chañag, Quimiag, Chimborazo.

3.3. Eficiencia de uso del nitrógeno como base para la recomendación

Se requiere de un adecuado suplemento de N para obtener rendimientos altos y rentables de papa (Abdallah et al., 2016); sin embargo, es importante destacar que el uso excesivo de N en los sistemas de producción agrícola contribuye a la contaminación ambiental, sobre todo en suelos desgastados, donde la eficiencia de uso del N de los fertilizantes es baja, debido a que la tercera parte del fertilizante aplicado se pierde en la atmósfera o se filtra hacia aguas subterráneas en forma de amoníaco, óxido nítrico y nitratos (Vera Arteaga et al., 2019). Por otro lado, la deficiencia de N en la etapa de tuberización afecta significativamente el rendimiento del cultivo (Marouani y Harbeoui, 2016).

La relación entre el rendimiento de un cultivo y el suplemento de N se ajusta a una función de rendimientos decrecientes que hace difícil alcanzar rendimientos altos sin que se incrementen los problemas ambientales y de salud provocados por el uso ineficiente de N. La absorción de N y los rendimientos del cultivo medidos con experimentos de campo se incrementan con las dosis de N hasta que gradualmente alcanzan su máximo que está determinado por el potencial del rendimiento del sitio de evaluación. A las dosis bajas de N la res-

puesta en rendimiento es grande porque el N es el principal factor limitante del crecimiento y el rendimiento final del cultivo. A medida que se incrementan las dosis de N la respuesta en rendimiento es cada vez menor y en ocasiones negativa en una típica respuesta cuadrática (Banerjee et al., 2016).

La EU_N es un índice que incorpora las contribuciones del N nativo del suelo (rendimiento del cultivo sin aplicación de N al suelo), la eficiencia de absorción y la eficiencia de incorporación del N a la acumulación de rendimiento (rendimiento potencial). Dobermann (2007) y Snyder (2009), describieron las formas útiles de definir la EU_N que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Definiciones de la eficiencia de uso del nitrógeno.

Table 2. Definitions of nitrogen use efficiency.

Término EU_N	Fórmula*
Factor parcial de productividad [FPP _N]	R/D
Eficiencia agronómica del N aplicado [EA _N]	(R-R ₀)/D
Eficiencia fisiológica del N aplicado [EF _N]	Uc/D
Eficiencia aparente de recuperación del N [ER _N]	(U-U ₀)/D

* D = Cantidad de N aplicada (como fertilizante, residuos orgánicos y otros); R = Rendimiento de la porción cosechada del cultivo con la aplicación de N; R₀ = Rendimiento del tratamiento control sin la aplicación de N; U_c = Contenido de N de la porción cosechada del cultivo; U₀ = Acumulación total de N en la biomasa aérea del cultivo sin aplicación de N. / D = Amount of N applied (as fertilizer, organic residues and others); R = Yield of the harvested portion of the crop with N application; R₀ = Yield of the control treatment without N application; U_c = N content of the harvested portion of the crop;

U₀ = Total N accumulation in the aboveground biomass of the crop without N application.

Adaptado de / Adapted from: Dobermann (2007) y Snyder (2009)

El Factor Parcial de Productividad de N [FPP_N], la forma más amplia de medir la EU_N , es la relación entre el rendimiento y la cantidad de N aplicado. Este factor no toma en cuenta el N nativo del suelo y entrega valores altos de eficiencia que no son realistas, muchas veces se usa para desarrollar estadísticas de estimación de uso de nutrientes.

La EA_N es la forma más práctica de calcular la EU_N y se puede implementar fácilmente en el campo. Este índice relaciona la diferencia entre el rendimiento con aplicación de N y el rendimiento sin aplicación de N con la dosis de N aplicada. De esta forma se toma en cuenta en el cálculo la contribución del N nativo del suelo al rendimiento.

La Eficiencia Fisiológica del N [EF_N] y la Eficiencia Aparente de Recuperación de N [ER_N] siguen el mismo esquema de cálculo de las dos eficiencias anteriores, pero se calculan con la absorción total de N del cultivo. Son menos prácticas porque requieren el uso de laboratorio.

Como se mencionó anteriormente, la información de las curvas de rendimiento como respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N no son suficientes para definir la dosis de N necesaria para obtener la meta de rendimiento en un sitio particular o un dominio de recomendación de una zona de producción de papa. En la mayoría de los casos, la dinámica del N impide que el análisis de N en el suelo sea una herramienta que ayude a determinar la cantidad de N necesaria para lograr la meta de rendimiento (Cassman et al., 2002). Esta situación hizo necesario desarrollar métodos de diagnóstico basados en la planta antes que en el suelo (Witt et al., 2006). Las curvas de rendimiento en respuesta a la aplicación de N se pueden utilizar para calcular la EA_N (cantidad de tubérculo de papa que se puede obtener con cada kg de N aplicado) según la siguiente relación: $EA_N = (R_{+N} - R_{-N}) / \text{dosis N}$, este cálculo se presenta en la Tabla 3. Se observa que la EA_N se reduce a medida que se incrementan las dosis de N, en consecuencia, es posible la utilización de un método gráfico para encontrar la EA_N en el punto de la curva en la que esta empieza a decrecer de forma clara, este punto es la intercepción de la curva de rendimiento a las dosis de N con la curva de EA_N. La representación gráfica de la asociación entre el rendimiento y la EA_N para la variedad Superchola se presenta en las Figuras 5 y 6, y para la variedad INIAP Natividad en las Figuras 7 y 8.

De la Figura 5 se puede observar que la meta de rendimiento de la variedad Superchola en Cortijo Bajo estaría alrededor de 55.000 kg ha⁻¹, que la EA_N sería de 130 kg de papa kg⁻¹ de N y que la dosis de N recomendada para la siguiente siembra en el sitio sería de 120 kg N ha⁻¹.

La meta de rendimiento de la variedad Superchola en Chañag (Figura 6) estaría alrededor de 50.000 kg ha⁻¹, que la EA_N sería de 160 kg de papa kg⁻¹ de N y que la dosis de N recomendada para la siguiente siembra en el sitio sería de 80 kg N ha⁻¹. En la Figura 7 se observa que la meta de rendimiento de la variedad INIAP-

Natividad en Cortijo Bajo sería de alrededor de 55.000 kg ha⁻¹, que la EA_N sería de 120 kg de papa kg⁻¹ de N y que la dosis de N recomendada para la siguiente siembra en el sitio sería de 80 kg N ha⁻¹. En la Figura 8 se observa que la meta de rendimiento de la variedad INIAP-Natividad en Chañag es de alrededor de 50.000 kg ha⁻¹, que la EA_N es de 150 kg de papa kg⁻¹ de N y que la dosis de N recomendada para la siguiente siembra en el sitio sería de 110 kg N ha⁻¹.

Tabla 3. Rendimiento y eficiencia agronómica de nitrógeno de las variedades Superchola e INIAP-Natividad en las localidades de Cortijo Bajo y Chañag, Quimiag, Chimborazo, 2016.

Table 3. Yield and nitrogen agronomic efficiency of the Superchola and INIAP-Natividad varieties in the localities of Cortijo Bajo and Chañag, Quimiag, Chimborazo, 2016.

Dosis de N kg ha ⁻¹	Cortijo Bajo		Chañag	
	Rendimiento kg papa ha ⁻¹	EA _N kg papa kg ⁻¹ N	Rendimiento kg papa ha ⁻¹	EA _N kg papa kg ⁻¹ N
Superchola				
0	38.610		36.890	
60	47.430	147	47.270	173
120	54.600	133	53.390	138
180	55.710	95	57.200	113
240	58.270	82	59.540	94
INIAP-Natividad				
0	46.120		32.150	
60	54.030	132	41.900	163
120	58.020	99	49.070	141
180	64.730	103	56.360	135
240	66.550	85	60.100	116

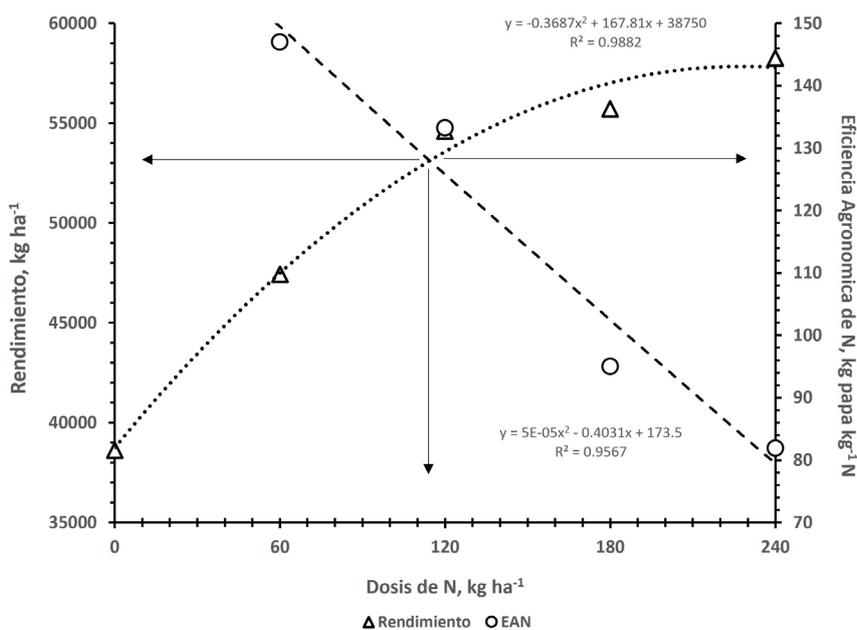


Figura 5. Rendimiento de tubérculos y eficiencia agronómica de N en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N de la variedad Superchola en Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.

Figure 5. Tuber yield and N agronomic efficiency in response to increasing N doses of the Superchola variety in Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.

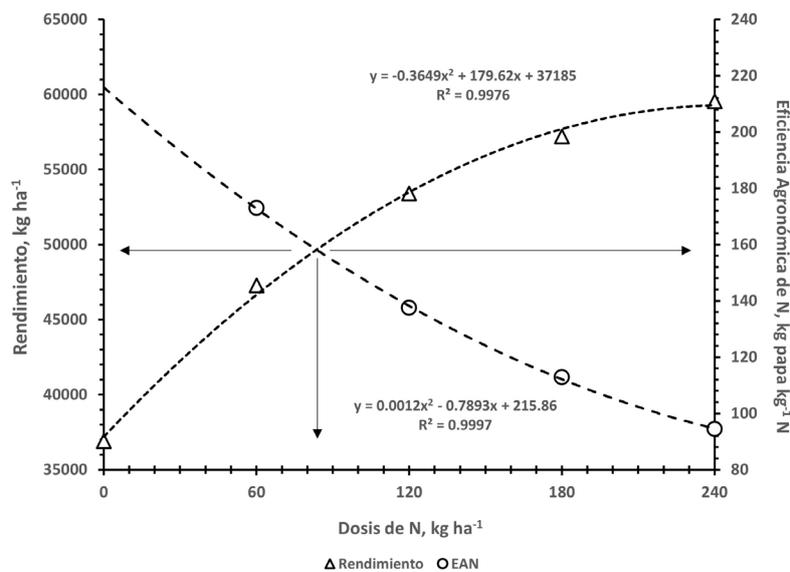


Figura 6. Rendimiento de tubérculos y eficiencia agronómica de N en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N de la variedad Superchola en Chañag, Quimiag, Chimborazo.

Figure 6. Tuber yield and N agronomic efficiency in response to increasing N doses of the Superchola variety in Chañag, Quimiag, Chimborazo.

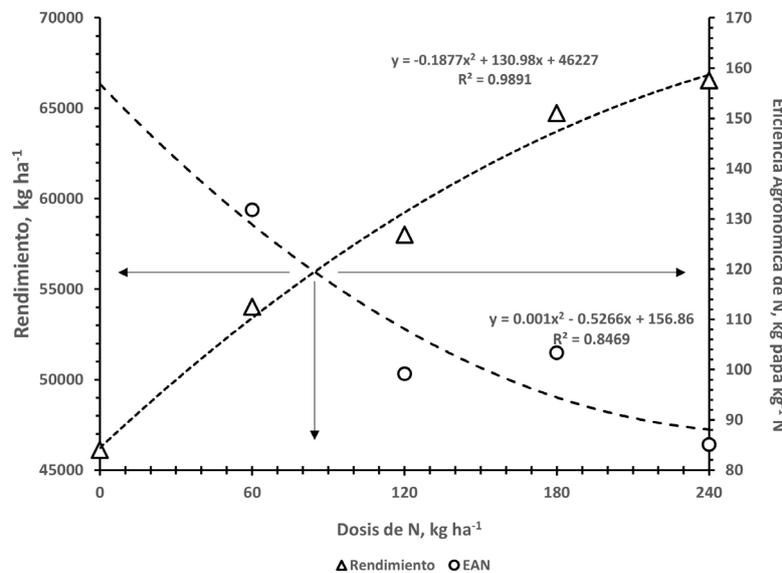


Figura 7. Rendimiento de tubérculos y eficiencia agronómica de N en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N de la variedad INIAP Natividad en Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo

Figure 7. Tuber yield and N agronomic efficiency in response to the application of increasing N doses of the INIAP Natividad variety in Cortijo Bajo, Quimiag, Chimborazo.

Estos resultados concuerdan con Gutiérrez et al. (2018), quienes, para cultivos de avena, obtuvieron la mejor EAN con dosis de 70 y 140 kg N ha⁻¹; no obstante, con dosis mayores de kg N ha⁻¹ la EAN disminuye. Por otro lado, Marouani y Harbeoui (2016) reportaron mayores rendimientos y N extraído por los tubérculos con las dosis más elevadas de N (200 kg ha⁻¹).

En la Tabla 4 se presenta una comparación entre los datos de la evaluación agronómica encontrados en este experimento y los datos del análisis económico. Se observa que las dosis obtenidas por el método gráfico son muy cercanas a las que produjeron el mejor rédito económico a través del método de Perrin et al. (1983), conducido con los datos de respuesta a la aplicación de dosis de N en las dos variedades y los dos sitios de evaluación.

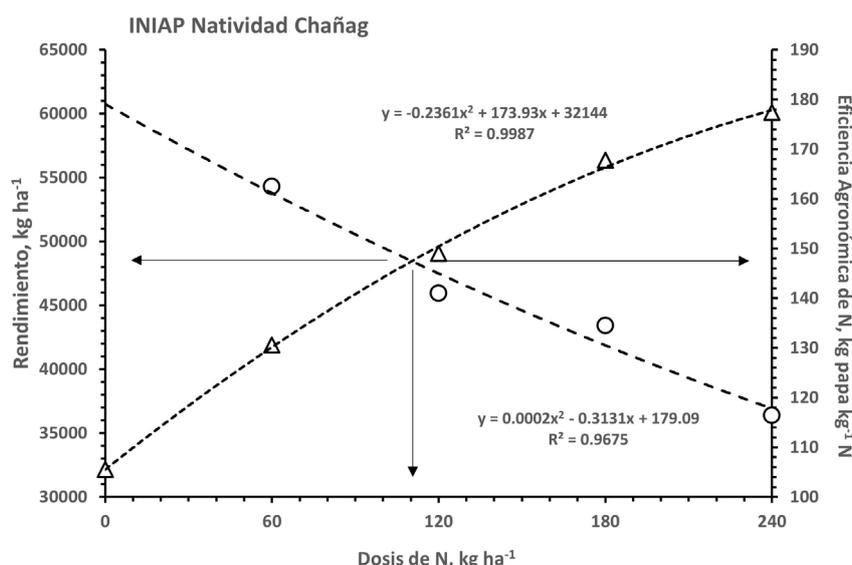


Figura 8. Rendimiento de tubérculos y eficiencia agronómica de N en respuesta a la aplicación de dosis crecientes de N de la variedad INIAP Natividad en Chañag, Quimiag, Chimborazo.

Figure 8. Tuber yield and N agronomic efficiency in response to the application of increasing N doses of the INIAP Natividad variety in Chañag, Quimiag, Chimborazo.

Tabla 4. Comparación de la eficiencia agronómica y la correspondiente dosis de aplicación de nitrógeno obtenidas por el método gráfico y las dosis de nitrógeno que produjeron la mejor respuesta económica de las variedades Superchola e INIAP Natividad en Cortijo Bajo y Chañag, Quimiag, Chimborazo, 2016.

Table 4. Comparison of agronomic efficiency and the corresponding nitrogen application doses obtained by the graphical method and the nitrogen doses that produced the best economic response of the Superchola and INIAP Natividad varieties in Cortijo Bajo and Chañag, Quimiag, Chimborazo, 2016.

Sitio	Evaluación agronómica			Evaluación económica	
	Meta de rendimiento	Dosis	EA _N	Beneficio neto	Dosis
Superchola					
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg papa kg ⁻¹ N	US \$ ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
Cortijo Bajo	55.000	120	130	12.294	120
Chañag	50.000	80	160	12.831	60
INIAP-Natividad					
Cortijo Bajo	55.000	80	120	8.630	120
Chañag	50.000	110	150	10.268	120

Las EA_N obtenidas en este experimento se pueden usar para calcular la dosis de N necesaria para lograr la meta de rendimiento del cultivo de papa en el dominio de recomendación (zona en la que son iguales las condiciones de clima y suelo) de producción de papa en Quimiag. La meta de rendimiento (rendimiento de papa que el ambiente permite con el mejor manejo agronómico conocido y con la dosis más eficiente de N), es decir (R_{+N}), necesario también para el cálculo, fue establecida por el experimento. De esta forma se determina la dosis de N para cada ciclo de producción. Una vez obtenida y probada la dosis, se puede mejorar la EA_N, es decir, más rendimiento con la misma dosis de N, mediante el manejo agronómico (mejores formas de localizar el N en el suelo, diferentes fuentes de N, fraccionamiento cuidadoso de la dosis, mejor manejo de plagas y riego, entre otros.). Los datos de este experimento indican que el ambiente permitiría producir 70.000 kg ha⁻¹ de tubérculos y que con mejor manejo agronómico esta podría ser la nueva meta de rendimiento para el dominio de recomendación. Con este método, la planta es la que finalmente permite determinar la dosis de N necesaria para lograr la meta de rendimiento y hacer eficiente el uso de N. Esta estrategia es fácil de implementar y manejar por los agricultores.

4. Conclusiones

Los experimentos conducidos en Cortijo Bajo y Chañag en Quimiag, Chimborazo, permitieron determinar que la EA_N de la variedad Superchola varió entre 130 y 160 kg de papa kg^{-1} de N aplicado, mientras que la EA_N de la variedad INIAP-Natividad varió entre 120 y 150 kg de papa kg^{-1} de N aplicado. Estos valores permitieron determinar la dosis de N que sería necesario aplicar en el siguiente ciclo de siembra de papa Superchola e INIAP Natividad en el correspondiente dominio de recomendación. Con eso se logra mejorar la EU_N en el cultivo de las dos variedades de papa. Las recomendaciones de las dosis de aplicación de N obtenidas con la evaluación agronómica (120 y 80 $kg\ ha^{-1}$ para Superchola e INIAP Natividad en Cortijo; mientras que 80 y 110 $kg\ ha^{-1}$ para las mismas variedades en Chañag) se comparan con las dosis que lograron el mejor rédito en la evaluación económica de los rendimientos (120 $kg\ ha^{-1}$ para las dos variedades en Cortijo Bajo; mientras que 60 y 120 $kg\ ha^{-1}$ para Superchola e INIAP Natividad; respectivamente en Chañag). Por otro lado, es evidente que la extracción de N no puede servir de única guía para futuras recomendaciones de fertilización; ya que su análisis llevaría a sobrefertilización para alcanzar la meta de rendimiento del cultivo.

Agradecimientos

Nuestro reconocimiento y sentida gratitud al Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP y todo el personal que estuvo involucrado en el proceso investigativo; a quienes hacen la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Central del Ecuador por su gran aporte en la formación profesional del estudiante del país; y de manera especial a los agricultores, Sr. Olmedo Camuana y Sr. Francisco Dávalos, por su generosidad al haber posibilitado la instalación de los experimentos en sus fincas y el valioso espacio brindado para el intercambio de aprendizajes logrados a través de la ejecución de este estudio.

Financiamiento

Esta investigación fue realizada por el Departamento de Manejo de Suelos y Aguas de la Estación Experimental Santa Catalina del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP a través del proyecto PIC13IEE002 “INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y NUTRICIÓN EN CULTIVOS DE ARROZ, MAÍZ DURO Y PAPA, CON MODELOS DE PREDICCIÓN DE COSECHAS MEDIANTE MÉTODOS ESPACIALES Y ESPECTRALES (Maíz Duro)” financiado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación-SENESCYT.

Contribuciones de los autores

- Fátima Gaibor: investigación, curación de datos, metodología, análisis formal, redacción - borrador original.
- José Espinosa: visualización, supervisión, investigación, redacción – revisión y edición.
- Yamil Cartagena: metodología, análisis formal.
- Rafael Parra: metodología, curación de datos, investigación.
- Cristhian Torres Carrera: metodología, curación de datos, investigación.
- Soraya Alvarado-Ochoa: conceptualización, adquisición de fondos, administración del proyecto, supervisión, investigación, curación de datos, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros o no financieros que podrían haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Referencias

- Abdallah, F. ben, Olivier, M., Goffart, J. P., y Minet, O. (2016). Establishing the nitrogen dilution curve for potato cultivar Bintje in Belgium. *Potato Research*, 59(3), 241-258. <https://doi.org/10.1007/s11540-016-9331-y>
- Alvarado Ochoa, S. P., Jaramillo, R., Valverde, F., y Parra, R. (2011). Manejo de nutrientes por sitio específico en el cultivo de maíz bajo labranza de conservación para la provincia de Bolívar. Boletín Técnico no. 150. INIAP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/handle/41000/455>
- Arroyo Terán, F. A. (2015). Identificación de las prioridades de fertilización en papa (*Solanum tuberosum* L.), variedad superchola, en andisoles de la Sierra Norte Ecuatoriana. Universidad Tecnológica Equinoccial. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/4480>
- Banerjee, H., Ray, K., Sarkar, S., Puste, A., Mozumder, M., y Rana, L. (2016). Impact of nitrogen nutrition on productivity and nutrient use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) In an inceptisol of west Bengal, India. *SAARC Journal of Agriculture*, 13(2), 141-150. <https://doi.org/10.3329/sja.v13i2.26575>
- Bell, C. (2016). *The importance of nitrogen for plant health and productivity*. Mammoth.
- Benavides, G., y Gonzales, E. (1988). Determinación de las propiedades Andicas y clasificación de algunos suelos de páramo. *Suelos Ecuatoriales*, 17, 58-64.
- Bertsch, F. (2009). Raíces, tubérculos y cormos. En F. Bertsch (ed.), *Absorción de nutrimentos por los cultivos* (pp. 184-185). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. <https://www.intagri.com/memorias/nutricion-vegetal/absorcion-de-nutrimientos-por-los-cultivos>
- Bremner, J. M. (1996). Total nitrogen. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, y M. E. Sumner (eds.), *Methods of Soil Analysis* (1085-1121). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Camacho Gallardo, E. E. (2018). *Evaluación de características agroindustriales en cuatro genotipos de papa (Solanum tuberosum L.) bajo dos niveles de fertilización*. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16476>
- Cassman, K. G., Dobermann, A., y Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132-140. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2018). InfoStat versión 2018. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency—measurement and management. En A. Krauss, K. Isherwood, y P. Heffer (eds.), *Fertilizer Best Management Practices: General Principles, Strategy for Their Adoption and Voluntary Initiatives Versus Regulations* (pp. 1-28). International Fertilizer Industry Association. https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2007_IFA_FBMP%20Workshop_Brussels.pdf
- Fagodiya, R. K., Kumar, A., Kumari, S., Medhi, K., y Shabnam, A. A. (2020). Role of nitrogen and its agricultural management in changing environment. En *Contaminants in Agriculture* (pp. 247-270). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_12
- García, J. P., y Espinosa, J. (2008). Relación del índice de verdor con la aplicación de nitrógeno en diez híbridos de maíz. *Informaciones Agronómicas*, (71), 9-14. <http://www.ipni.net/publication/ia-la hp.nsf/issue/IA-LAHP-2008-4>
- Gómez Sánchez, M. I. (2014). *Absorción, extracción y manejo nutricional específico en el cultivo de papa en la planicie cundiboyacense*. FEDEPAPA-PAAC-INGEPLANT. <https://ingeplant.co/wp-content/uploads/Reporte-investigacion-Papa-02.pdf>
- Gutiérrez, F., Loayza, C., Portilla, A., & Espinosa, J. (2018). Evaluación de dosis de nitrógeno sobre la acumulación de biomasa, composición bromatológica y eficiencia de uso en avena forrajera (*Avena sativa*), variedad Dorada. *Siembra*, 5(1), 071-078. <https://doi.org/10.29166/siembra.v5i1.1428>

- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., y Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management* (8th ed.). Pearson.
- Horneck, D., y Rosen, C. (2008). Measuring nutrients accumulation rates of potatoes for better management. *Better Crops*, 92(1), 4-6. <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2008-1>
- Inoue, K., y Higashi, T. (1988). Al- and Fe-humus complexes in Andisols. En D. I. Kinloch, S. Shoji, F. H. Beinroth, y H. Eswaran (eds.), *Proceedings of Ninth International Soil Classification Workshop* (pp. 547-557). Japan.
- Instituto Internacional de Nutrición de Plantas [IPNI]. (2012). *4R de la nutrición de plantas*. IPNI. <http://www.ipni.net/article/IPNI-3255>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (2019). *Encuesta de superficie y producción agropecuaria*. INEC. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP]. (2016). *Reporte de análisis de suelos*. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Departamento de Suelos y Aguas.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2015). *Reporte Estación Riobamba Politécnica*. INAMHI. <https://www.inamhi.gob.ec/>
- Kahsay, W. S. (2019). Effects of nitrogen and phosphorus on potatoes production in Ethiopia: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1572985. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1572985>
- Marouani, A., y Harbeoui, Y. (2016). Eficiencia de uso de nitrógeno en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Acta Agronómica*, 65(2), 164-169. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.48200>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2019). *Ecuador se proyecta a ser exportador de papa*. Sistema de Información Pública Agropecuaria. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/sipa-estadisticas/estadisticas-productivas>
- Muleta, H. D., y Aga, M. C. (2019). Role of nitrogen on potato production: A review. *Journal of Plant Sciences*, 7(2), 36-42. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20190702.11>
- Nick, C., y Borém, A. (2017). *Batata do Plantio à Colheita*. Editora UFV.
- Oyarzún, P., Chamorro, F., Córdova, J., Merino, F., Valverde, F., y Velázquez, J. (2002). Manejo agronómico. En M. Pumisacho, y S. Sherwood (eds.), *Cultivo de la papa en Ecuador* (pp. 51-82). INIAP-CIP. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2802>
- Perrin, R. K., Winkelmann, D. L., Moscardi, E. R., y Anderson, J. R. (1983). *Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos. Un manual metodológico de evaluación*. CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/3816>
- Rebolledo, H. (1999). *Estimación de modelos de regresión a experimentos de fertilización y obtención de dosis óptimas económicas de insumos agrícolas*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Snyder, C. S. (2009). Eficiencia de uso del nitrógeno: desafíos mundiales, tendencias futuras. *Informaciones Agronómicas*, (75), 1-5. https://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/eficienciaeuso_snyder.pdf
- Takahashi, T., y Dahlgren, R. A. (2016). Nature, properties and function of aluminum–humus complexes in volcanic soils. *Geoderma*, 263, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.032>
- Thompson, L. M., y Troeh, F. R. (1982). *Los suelos y su fertilidad* (4^a ed.). Editorial Reverte. https://www.reverte.com/libro/los-suelos-y-su-fertilidad_91568/
- Vera Arteaga, D., Cedeño García, G., Cedeño-García, G., Cargua Chávez, J., y Garay Lugo, M. (2019). Eficiencia agronómica de nitrógeno y producción de *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. en función de dos frecuencias de corte. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 35(3), 251-260. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000405>
- White, P. J. (2012). Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. En *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 135-189). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Witt, C., Pasuquin, J. M., y Dobermann, A. (2006). Toward a site specific nutrient management approach for maize in Asia. *Better Crops*, 90(2), 28-31. <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/issue/BC-2006-2>
- Yara. (2021). *Incrementar la producción de la papa*. Yara. <https://www.yara.com.ec/nutricion-vegetal/papa/rendimiento-de-la-papa/>
- Zehetner, F., Miller, W. P., y West, L. T. (2003). Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797-1809. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1797>