

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO
DE PAPA: RESPUESTA FISIOLÓGICA Y
EFICIENCIA DE USO**

por

Nicolás NÚÑEZ LEFEBRE

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2023**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra). Paula Colnago

Ing. Agr. (Dra). Amabelia del Pino

Tribunal:

Ing. Agr. (Dr). Santiago Dogliotti

Ing. Agr. (Dra). Cecilia Berrueta

Ing. Agr. (Dra). Paula Colnago

Ing. Agr. (Dra). Amabelia del Pino

Fecha:

26 de enero de 2024

Estudiante:

Nicolás Núñez Lefebre

Agradecimientos

A mis padres, Mary Lefebre y Ruben Núñez, a mi abuela, María Mateos y a mi hermana, Sofía Núñez, por ser pilares fundamentales durante este camino, por el apoyo incondicional durante estos años, por lo que me enseñaron y por brindarme la posibilidad de llegar a este punto. A mi novia Julieta, por la ayuda y la motivación durante la realización de este trabajo.

A Paula Colnago, por acompañarme durante la etapa final de la carrera, por orientarme, enseñarme y compartirme de forma generosa su conocimiento y experiencia. A Amabelia del Pino, por la orientación y la ayuda en la realización y mejora de este trabajo.

A Francisco Vilaró, quien acompañó la tesis desde los inicios y colaboró en todo momento. A Bettina Lado, por el apoyo con el análisis de los datos. A Paola Gaiero, quien siempre me dio el espacio para avanzar con este trabajo y, a su vez, contribuyó a mejorarlo. A Paula Rodríguez y Gisella Hernández por la disposición, el tiempo y los comentarios. A todos los compañeros y amigos que me dejaron estos años.

A Quito, Natalia Curbelo, Néstor, Natalia da Rosa, Rodrigo y a todo el personal del Centro Regional Sur de Facultad de Agronomía, por la excelente predisposición, el cuidado diario de las plantas y el apoyo en las tareas en el campo durante todo el ensayo.

Tabla de contenido

Hoja de Aprobación	2
Agradecimientos	3
Lista de Tablas y Figuras	6
Resumen	8
Abstract	9
1. Introducción	10
2. Revisión Bibliográfica.....	12
2.1. Origen y Botánica del Cultivo de Papa	12
2.2. Ciclo del Cultivo y Etapas del Desarrollo	12
2.3. Formación del Rendimiento.....	14
2.4. Situaciones Productivas: Rendimiento Potencial, Alcanzable y Real.....	15
2.5. Calidad del Suelo y Nutrición del Cultivo	16
2.5.1. Fósforo	17
2.5.2. Potasio.....	17
2.5.3. Calcio	17
2.5.4. Magnesio	18
2.5.5. Azufre	18
2.6. Nitrógeno.....	18
2.6.1. Efecto de la Nutrición Nitrogenada en el Crecimiento Foliar	19
2.6.2. Efecto del Nitrógeno Sobre el Ciclo	20
2.7. Consecuencias Ambientales del Uso de Fertilizantes Nitrogenados.....	21
2.8. Eficiencia de Uso de los Nutrientes	22
2.8.1. Indicadores de la Eficiencia de la Fertilización	22
2.9. Materiales Genéticos.....	24
2.9.1. Arequita	24
2.9.2. Red Magic	25
3. Materiales y Métodos	26
3.1. Delimitación Espacio-Temporal	26
3.2. Caracterización Climática	26
3.3. Caracterización Suelos.....	27
3.4. Descripción de los Tratamientos	28

3.5. Diseño Experimental	29
3.6. Descripción del Manejo	29
3.7. Variables Medidas.....	30
3.7.1. Crecimiento y Desarrollo del Cultivo	30
3.7.2. Tasa de Crecimiento.....	31
3.7.3. Absorción de Nitrógeno	31
3.7.4. Rendimiento	31
3.8. Indicadores de Eficiencia de la Fertilización	32
4. Resultados.....	33
4.1. Efecto del Genotipo y la Fertilización Nitrogenada en el Crecimiento y Desarrollo del Cultivo	33
4.1.1. Crecimiento del Follaje	33
4.1.2. Crecimiento y Desarrollo de los Tubérculos.....	35
4.1.3. Tasa de Crecimiento.....	36
4.1.4. Partición de Materia Seca en la Planta	37
4.2. Absorción de Nitrógeno	38
4.3. Concentración de Nitrógeno en la Planta	40
4.4. Rendimiento	41
4.4.1. Tamaño de los Tubérculos.....	42
4.5. Extracción de Nitrógeno con la Cosecha	44
4.6. Indicadores de Eficiencia.....	44
5. Discusión	50
5.1. Efecto del Genotipo y el Nitrógeno Sobre el Crecimiento y Desarrollo del Cultivo.....	50
5.1.1. Ciclo del Cultivo.....	50
5.2. Absorción de Nitrógeno.....	52
5.3. Rendimiento	54
5.4. Eficiencia de la Fertilización	56
6. Conclusiones	58
7. Referencias Bibliográficas.....	60

Lista de Tablas y Figuras

Tabla No.	Página
Tabla 1. Resultado del análisis de suelo.....	28
Tabla 2. Estimación de la proporción del total del nitrógeno requerido cubierta por la fertilización y el proveniente del suelo, considerando un rendimiento de 40 Mg ha ⁻¹	28
Tabla 3. Aplicaciones de herbicidas y fungicidas durante el ciclo del cultivo	30
Tabla 4. Fórmulas de cálculo de indicadores de eficiencia de la fertilización utilizados.....	32
Tabla 5. Número de ramas en función de la dosis de nitrógeno aplicada como fertilizante a los 53, 73 y 105 días de ciclo.....	33
Tabla 6. Índice de Área Foliar (IAF) por tratamiento en las distintas fechas de muestreo.....	35
Tabla 7. Tasa de crecimiento diaria promedio total, de tubérculos y del resto de la planta durante el ciclo	37
Tabla 8. Distribución relativa promedio de la materia seca en la planta a los 35, 53, 73 y 105 días post-plantación	38
Tabla 9. Absorción total de nitrógeno según dosis de nitrógeno aplicada.....	39
Tabla 10. Nitrógeno absorbido total y en porcentaje por tratamiento en las distintas fases según la partición de asimilados del cultivo	40
Tabla 11. Extracción de nitrógeno por tonelada de tubérculo y por hectárea.....	44
Tabla 12. Índice de Cosecha (IC) e Índice de Cosecha de Nitrógeno (ICN) por tratamiento.....	45
Tabla 13. Indicadores de eficiencia de la fertilización por tratamiento	47

Figura No.	Página
Figura 1. Modelo teórico de la evolución del IAF y del peso seco de tubérculos en un cultivo de papa en función de los días desde plantación.....	13
Figura 2. Componentes teóricos de cada nivel de rendimiento	15
Figura 3. Temperatura media, máxima y mínima y precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo	26
Figura 4. Comparación temperatura media diaria y precipitación mensual durante el ciclo del cultivo frente al promedio de los 10 años anteriores.....	27
Figura 5. Curvas de evolución del Índice de Área Foliar (IAF).....	34

Figura 6. Curvas de crecimiento de la materia seca de tubérculos.....	36
Figura 7. Contenido de nitrógeno total en muestras en tratamientos de fertilización contrastantes de cada cultivar	39
Figura 8. Curvas de dilución del nitrógeno en la planta	41
Figura 9. Rendimiento total, comercializable y descartes por tratamiento	42
Figura 10. Distribución de los tubérculos según su peso por tratamiento	43
Figura 11. Boxplot con tamaño promedio de tubérculos comerciales y su variación	43
Figura 12. Rendimiento total y materia seca de tubérculos en función del nitrógeno aplicado como fertilizante por cultivar.....	48
Figura 13. Rendimiento total en función del nitrógeno absorbido	49
Figura 14. Absorción de nitrógeno en función del nitrógeno aplicado como fertilizante en ambos cultivares.....	49

Resumen

La papa es uno de los cultivos de mayor importancia en lo que respecta a alimentación humana. En nuestro país se realiza en dos ciclos al año, determinados por las condiciones climáticas. Uno de los factores de mayor incidencia sobre el largo del ciclo es la fertilización nitrogenada. Un alto aporte favorece el desarrollo del follaje y extiende la duración del ciclo. En el ensayo se evaluaron distintas dosis de nitrógeno en dos materiales genéticos. Se realizaron 3 bloques completos al azar en los cuales se distribuyeron aleatoriamente los tratamientos. Los mismos consistieron en dos materiales genéticos, Arequita y Red Magic, y 4 dosis de nitrógeno: 0, 70, 140 y 210 kilogramos por hectárea. De la combinación de ambos factores surgen 8 tratamientos. Se realizaron 4 muestreos a lo largo del ciclo del cultivo. Se evaluaron distintas variables relacionadas al crecimiento y desarrollo de las plantas y el contenido de nitrógeno en los distintos órganos. Al final del ciclo se determinó el rendimiento en tubérculos y se calcularon distintos indicadores de eficiencia. El área foliar se vio fuertemente condicionada por la nutrición nitrogenada, siendo mayor con altas dosis del nutriente. La tuberización solamente fue afectada por los materiales genéticos, siendo superior en Arequita. La absorción de nitrógeno estuvo condicionada por la fertilización; a pesar de esto, se registró un comportamiento desigual entre los cultivares, demostrando Arequita una mayor capacidad de absorción en todas las condiciones. El cultivar nacional, además, presentó los mayores rendimientos, aunque las altas dosis afectaron la calidad comercial del producto, aumentando el calibre de los tubérculos. A pesar de que el nitrógeno afectó el área foliar, no se observó un efecto sobre la tuberización. En todos los casos se alcanzó un muy bajo índice de cosecha; esto sugiere que existen otros desajustes que limitan la capacidad del cultivo de alcanzar los máximos rendimientos. Arequita mostró ser un material capaz de adaptarse a una mayor diversidad de ambientes nutricionales, consiguiendo una gran eficiencia en tratamientos sin agregado del nutriente y siendo capaz de responder hasta dosis muy altas de fertilización. El comportamiento de Red Magic sugiere que es un material que requiere un manejo muy ajustado de la fertilización, presentando una limitada capacidad de absorber nutriente disponible en el suelo y un rendimiento óptimo con dosis medias de nitrógeno.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, cultivo de papa, nitrógeno, eficiencia de uso de los nutrientes, ajuste del ciclo, fisiología, fertilidad

Abstract

The potato is one of the most important crops in terms of human nutrition. In our country it is carried out in two cycles a year, determined by weather conditions. One of the factors with the greatest impact on the length of the cycle is nitrogen fertilization. A high nitrogen supply favors the development of foliage and extends the duration of all crop's phases. In this trial, different doses of nitrogen were evaluated in two genetic materials. Three complete random blocks were carried out in which the treatments were randomly distributed. They consisted of two genetic materials, Arequita and Red Magic, and four doses of nitrogen: 0, 70, 140 and 210 kilograms per hectare. From the combination of both factors, eight treatments emerge. Four samplings were carried out throughout the crop cycle. Variables related to the growth and development of the plants, and the nitrogen content in the different organs were evaluated. At the end of the cycle, the tuber yield was determined and different efficiency indicators were calculated. Leaf area was strongly conditioned by nutrition, being greater with high doses of the nutrient. However, tuberization was only affected by genetic materials, being higher in Arequita. Nitrogen absorption was conditioned by the nitrogen dose. Arequita demonstrating a very high capacity to absorb large amounts of nitrogen in all conditions. The national cultivar, in addition, presented the highest yields, although the high doses affected the commercial quality of the product, increasing the caliber of the tubers. Red Magic had considerably lower yields and was not able to respond to high fertilization. Although nitrogen affected leaf area, no effect on tuberization was observed. In all cases, a very low accumulation of dry matter was achieved in the tubers. This suggests that there are other imbalances that limit the crop's ability to achieve maximum yield. Arequita proved to be a material capable of adapting to a greater diversity of nutritional environments, achieving great efficiency in treatments without added nutrients and being able to respond to very high doses of fertilization. The behavior of Red Magic suggests that it is a material that requires very tight fertilization management, presenting a limited capacity to absorb nutrients available in the soil and optimal performance with medium doses of fertilization.

Keywords: Solanum tuberosum, potato crop, nitrogen, nutrient use efficiency, cycle adjustment, physiology, fertility

1. Introducción

La papa se encuentra entre las hortalizas de mayor relevancia, tanto en Uruguay como en el mundo. Actualmente se estima que es el tercer cultivo en importancia en lo que respecta a alimentación humana, solamente por detrás del trigo y el arroz. Es un producto esencial para la seguridad alimentaria y con perspectivas a aumentar aún más su participación frente a las expansiones demográficas previstas para los próximos años (Centro Internacional de la Papa, 2023).

Según datos estadísticos de la web FAOSTAT, perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023), la producción mundial de papa alcanzó los 359 millones de toneladas en 2020, con un área sembrada de aproximadamente 16,5 millones de hectáreas. En el caso de Uruguay, la producción se divide en dos ciclos principales, uno en otoño y otro en primavera, con un área de 2.180 y 870 hectáreas respectivamente, totalizando para la zafra 2022-2023, 3.050 hectáreas anuales (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2023).

El cultivo de papa requiere condiciones de temperatura moderada, entre 15 y 25°C. No tolera las heladas y con temperaturas por encima de los 30°C se detiene completamente su crecimiento. Debido a esto, en nuestras condiciones, se adapta a dos estaciones productivas que permiten el desarrollo de ciclos cortos a medios. En ambos casos, las bajas temperaturas invernales y las altas temperaturas en los meses de verano pautan el inicio y fin de los mismos (Aldabe & Aldabe, 1976).

Una particularidad de este rubro hortícola es que la producción nacional presenta una alta incorporación de tecnología y un alto grado de mecanización. Si bien la superficie en los últimos años ha disminuido considerablemente, los rendimientos han ido en aumento, encontrándose actualmente alrededor de las 25 toneladas por hectárea. Esta mejora se sustenta principalmente en la genética y en el ajuste de las prácticas de manejo de los cultivos (DIEA, 2023).

Uno de los aspectos de mayor importancia es la fertilización. Dentro de los elementos minerales, el nitrógeno presenta una relevancia especial debido a su notorio efecto sobre aspectos claves para el crecimiento y desarrollo del cultivo, siendo uno de los factores determinantes del largo del ciclo.

El cultivo de papa, generalmente, se produce en sistemas con un uso intensivo de insumos, lo que lleva a que los aportes de fertilizantes nitrogenados por unidad de área sean muy importantes. Debido a su dinámica en el suelo, es un nutriente muy susceptible a pérdidas, por lo que cobran una gran importancia los aspectos relacionados a su utilización (Irisarri, 2009). La aplicación excesiva, sumada a la fuerte tendencia mundial a regular el suministro máximo del nutriente por su potencial como contaminante, lleva a la necesidad de buscar alternativas de manejo que mejoren su eficiencia de uso (Fassana et al., 2022).

Un factor fundamental para determinar la capacidad de un cultivo de extraer y utilizar el nutriente es la genética. Sin embargo, el desempeño de los materiales puede ser variable en función del ambiente. Esto lleva a la necesidad de conocer el comportamiento de cada cultivar en nuestras condiciones productivas.

El objetivo de este trabajo es contribuir al manejo del cultivo de papa a través del ajuste de la fertilización nitrogenada. Se buscará generar información acerca del comportamiento en relación al nutriente de diferentes materiales genéticos y, a su vez, se evaluará la eficiencia con la que los mismos son capaces de utilizarlo.

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Origen y Botánica del Cultivo de Papa

El cultivo de la papa se inicia en los Andes, cerca de la actual frontera entre Perú y Bolivia, en los alrededores del lago Titicaca. Una vez domesticada, la papa se extendió a toda la región andina y, posteriormente, a Europa, para luego ser difundida al resto del mundo. En la actualidad es cultivada en una gran variedad de condiciones ambientales (Alonso, 1996; Fabiani, 1967; Horton, 1987; Montaldo, 1984).

La papa se encuentra dentro de la familia *Solanaceae*. La mayoría de las papas de interés comercial pertenecen a la especie *Solanum tuberosum*. Son plantas herbáceas que pueden clasificarse como dicotiledóneas anuales, aunque son capaces de persistir vegetativamente en el campo como tubérculos de una estación de crecimiento a otra (Alonso, 1996; Horton, 1987; Montaldo, 1984).

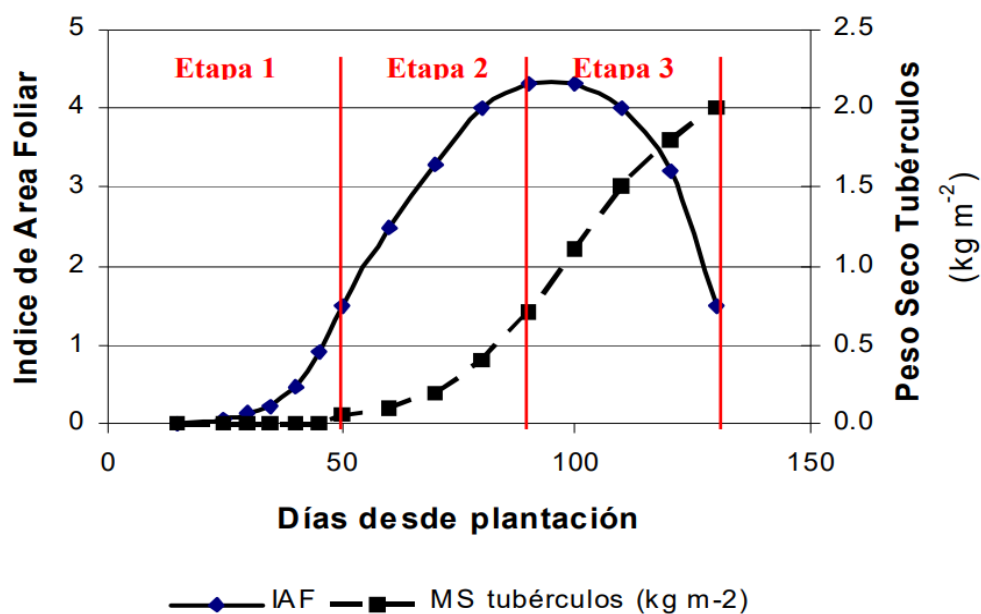
2.2. Ciclo del Cultivo y Etapas del Desarrollo

El ciclo del cultivo de papa se puede dividir en cuatro fases, cada una de las cuales comienza y termina con una etapa característica del desarrollo. La fase 0 inicia con la plantación y termina con la emergencia del cultivo. Durante la fase 1 tiene lugar el crecimiento foliar; posteriormente, las yemas aéreas de los tallos dan lugar a ramas y las subterráneas a estolones. En la fase 2, los estolones cesan su elongación y sus extremidades se dilatan para formar los tubérculos. Finalmente, la fase 3 va desde el momento en que se alcanza la máxima área foliar hasta el final del cultivo (Ellissèche, 1999; Huarte & Capezio, 2013).

La distribución de los fotoasimilados en la planta varía de forma considerable durante las distintas etapas del ciclo. Está determinada por las relaciones de fuente/fosa entre los distintos órganos (Kooman, 1995). De acuerdo a la distribución de asimilados en la planta, podemos distinguir 3 etapas (Figura 1). Durante la etapa, 1 estos son utilizados para el desarrollo de hojas, tallos y raíces. Luego de la emergencia, la mayor proporción de la materia seca total se encuentra en el follaje (Dogliotti et al., 2011; Kooman, 1995).

Figura 1

Evolución del IAF y de los tubérculos en un cultivo de papa



Nota. Tomado de Dogliotti et al. (2011).

Durante la etapa 2 ocurre el crecimiento inicial de los tubérculos. La tuberización se inicia por la acumulación de carbohidratos de reserva en la región subapical de los estolones. Una vez iniciado el proceso, los tubérculos pasan a ser los órganos de mayor demanda de fotosintatos. Durante esta etapa, se da una competencia entre el desarrollo de los mismos y el del área foliar (Dogliotti et al., 2011; Kooman, 1995). La demanda de asimilados se maximiza durante el llenado de los tubérculos; se observa un incremento tanto en la tasa fotosintética como en la translocación de fotoasimilados desde las hojas (Dwelle, 1990).

Finalmente, la fase 3 se extiende desde el final del crecimiento foliar hasta la senescencia del cultivo. Durante este último periodo, el total de los asimilados son destinados al crecimiento de los tubérculos (Horton, 1987; Kooman & Haverkort, 1995). La maduración ocurre a partir del comienzo del amarillamiento del follaje (Alonso, 1996; Horton, 1987; Huarte & Capezio, 2013).

El patrón de crecimiento de la planta y la distribución relativa de su materia seca son parámetros importantes para entender y modificar las prácticas de manejo del cultivo (Alva et al., 2002). El largo del período de plantación a inicio de tuberización influye en la duración de las siguientes etapas, por lo que determina el largo total del ciclo (Biemond, 1995; Kooman et al., 1996).

La diferenciación de ramas y hojas en la planta de papa ocurre en la etapa 1; su duración es un factor determinante del número de niveles de ramificación y, por lo tanto, del número de hojas formadas por la planta. Durante la siguiente etapa, al haber un mayor número de primordios foliares, el pico de área foliar se retrasa, así como también la senescencia del follaje durante la etapa final del ciclo (Dogliotti et al., 2011).

Se ha registrado una relación proporcional entre la duración de la primera etapa y el de las dos siguientes. Se determinó que el alargamiento de un día en el período previo al inicio de la tuberización resulta en una extensión de 3 días en la duración total del ciclo de crecimiento del cultivo. El largo del ciclo es uno de los principales determinantes del rendimiento, por lo que las prácticas de manejo que lo afecten tienen una gran relevancia sobre el resultado productivo final (Dogliotti et al., 2011; Kooman et al., 1996).

2.3. Formación del Rendimiento

La formación del rendimiento en el cultivo de papa es un proceso complejo que depende de múltiples variables. El resultado final comienza a definirse a partir de la densidad de plantación y del estado fisiológico de los tubérculos semilla. Estos factores determinan el número de tallos por unidad de área y, eventualmente, el número de tubérculos por tallo. La cantidad de brotes depende principalmente de la variedad, pero también es influenciada por las condiciones climáticas y del suelo (Horton, 1987; Koch et al., 2019; Lynch & Tai, 1985 como se cita en Lynch et al., 2001).

El proceso de tuberización se desarrolla en tres etapas: inducción, iniciación y crecimiento radial de los tubérculos. La inducción se traduce, en primer lugar, en una detención de la elongación de los estolones. La iniciación comprende la formación de los esbozos de tubérculos. Finalmente, luego de formado el tubérculo, este crece de forma radial hasta el final del ciclo del cultivo; este periodo de ganancia de peso se denomina llenado (Ellissèche, 1999; Horton, 1987; Peterson et al., 1985).

Este último periodo es el más crítico para la determinación del rendimiento y la calidad del cultivo. El largo de la fase de llenado y la tasa con la que se dé la misma van a definir el peso final de los tubérculos. La extensión de la fase de crecimiento depende de la duración del follaje, por lo que, algunos de

los factores que más influyen en esta etapa son la temperatura, la fertilización, el riego y el manejo de enfermedades (Alonso, 1996; Huarte & Capezio, 2013).

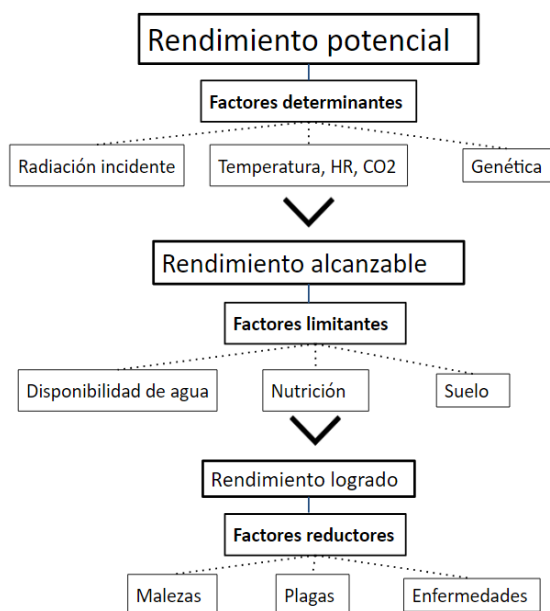
El rendimiento final es resultado de la fracción total de la biomasa que es particionada hacia los tubérculos, o sea, del índice de cosecha (IC). Este término es utilizado en agricultura para cuantificar la producción de los cultivos en relación al monto total de biomasa que producen (Price & Munns, 2018).

2.4. Situaciones Productivas: Rendimiento Potencial, Alcanzable y Real

Van Ittersum y Rabbinge (1997) propusieron tres categorías para ordenar los factores que determinan distintas situaciones productivas: factores que intervienen en definir el rendimiento potencial, factores que limitan el rendimiento y definen el rendimiento alcanzable y factores reductores que definen el rendimiento realmente obtenido o cosechado. Esta clasificación permite jerarquizar factores de acuerdo al impacto que tendrán sobre la producción del cultivo (Figura 2).

Figura 2

Componentes teóricos de cada nivel de rendimiento



Nota. HR= Humedad relativa. Adaptado de Van Ittersum y Rabbinge (1997).

Los factores que definen el rendimiento potencial son la radiación, la temperatura, el CO₂, y el material genético. Las condiciones climáticas a las que estará expuesto el cultivo quedan definidas con la fecha de siembra y cosecha

(ciclo del cultivo) y la zona de producción. Los factores de manejo que definen el rendimiento potencial son la variedad y la densidad (Lutaladio et al., 2009; Oliveira et al., 2017).

Los factores que definen el rendimiento alcanzable son la disponibilidad de agua y la disponibilidad de nutrientes. El suelo y su calidad física, química y biológica interviene en la definición del rendimiento alcanzable ya que determina la capacidad de almacenamiento de agua e interviene en la dinámica de nutrientes para el cultivo. Finalmente, los factores que explican rendimiento real son aquellos que reducen el rendimiento alcanzable: la competencia de malezas, las enfermedades y las plagas que afectan al cultivo (Lutaladio et al., 2009; Oliveira et al., 2017).

En el caso particular del cultivo de papa, el rendimiento depende de las condiciones en las que se dé la tuberización. Este proceso se ve afectado, principalmente, por el fotoperiodo, la temperatura y la disponibilidad de agua. Además de esto, factores como el tipo de semilla, la edad fisiológica del tubérculo madre, la genética y aspectos relacionados al suelo y la nutrición pueden afectar el proceso. La respuesta es compleja y existen muchos factores actuando de forma interrelacionada (Ewing, 1985).

2.5. Calidad del Suelo y Nutrición del Cultivo

La papa se adapta a una gran variedad de suelos. Los mejores para el cultivo son porosos, friables y bien drenados, con un horizonte A de una profundidad mínima entre 25 y 30 centímetros (Aldabe & Aldabe, 1976; Montaldo, 1984). Suelos pesados, aparte de presentar una limitada aireación, actúan mecánicamente sobre el tubérculo, impidiendo su normal crecimiento (Aldabe & Aldabe, 1976).

Un suplemento adecuado de nutrientes minerales es crucial para lograr un alto rendimiento y una calidad adecuada (Koch et al., 2019). Las necesidades nutricionales de la planta de papa dependen de la cantidad total de materia seca producida (Alonso, 1996). En nuestro país, los ciclos de papa se caracterizan por presentar un largo entre 90 y 120 días; por ser este un cultivo de rápido desarrollo, la fertilidad del suelo es un factor de suma importancia para la producción (Aldabe & Aldabe, 1976; Montaldo, 1984).

2.5.1. Fósforo

El cultivo de papa requiere grandes cantidades de fósforo en comparación con otros cultivos. Este elemento es absorbido como ion monovalente H_2PO_4 , denominado fosfato. El fósforo se encuentra en la planta tanto en forma orgánica como inorgánica. Tiene participación en fenómenos metabólicos y energéticos (Aldabe & Aldabe, 1976; Koch et al., 2019; Montaldo, 1984).

La falta de fósforo asimilable se refleja en bajos rendimientos y pobre calidad. Los síntomas de deficiencia en el follaje son hojas de color verde oscuro opaco y de aspecto encrespado, con bordes que aparecen color rojo amarronado o violáceos y curvados hacia arriba. Los tubérculos pueden mostrar manchas pardo-rojizas en su interior (Aldabe & Aldabe, 1976; Montaldo, 1984).

2.5.2. Potasio

El potasio es absorbido como ion K^+ . Este elemento tiene gran importancia en el metabolismo de la planta (Montaldo, 1984). En el caso de la papa es esencial en ciertas reacciones enzimáticas de transformación, por lo que una nutrición insuficiente tiene como consecuencia una mala maduración (Aldabe & Aldabe, 1976; Koch et al., 2019).

Un aporte adecuado de potasio es necesario para una alta producción de biomasa y desarrollo foliar. Las plantas con deficiencia presentan un aspecto achaparrado, con entrenudos cortos, hojas de color oscuro, verde azuladas, con manchas cloróticas internervales y bordes enrollados. En el tubérculo, la falta de potasio provoca manchas grisáceas y ennegrecimiento en la cocción (Aldabe & Aldabe, 1976; Montaldo, 1984).

2.5.3. Calcio

El calcio es esencial para el cultivo de papa, principalmente debido a su rol como constituyente de la pared celular y en la estabilización de las membranas (Koch et al., 2019). Las plantas de papa con deficiencia de calcio tienen tallos delgados y muestran un aspecto arbustivo característico. Las hojas, especialmente las apicales, presentan superficies angostas, con bordes necrosados y curvados hacia arriba (Aldabe & Aldabe, 1976).

2.5.4. Magnesio

El magnesio interviene en los procesos de fotosíntesis por ser es un componente indispensable de la clorofila. Juega un rol importante en la partición de fotoasimilados y la síntesis de proteínas, es constituyente de enzimas y participa en el metabolismo de los hidratos de carbono, por lo que es necesario para la síntesis de almidón (Aldabe & Aldabe, 1976; Koch et al., 2019; Montaldo, 1984).

La deficiencia de magnesio produce en el follaje de la papa un color verde algo más claro que el normal. La clorosis aparece primero en hojas viejas. La planta presenta, además, enrollado foliar, clorosis generalizada, acortamiento de pecíolos, falta de desarrollo de la parte apical y reducción de los entrenudos del tallo. Las hojas afectadas sufren un marchitamiento prematuro y mueren rápidamente. En los tubérculos, el déficit de magnesio provoca problemas en la cocción (Aldabe & Aldabe, 1976; Montaldo, 1984).

2.5.5. Azufre

El azufre es esencial para muchos metabolitos celulares y es componente de aminoácidos y bloques de proteínas. El principal síntoma de deficiencia es un amarillamiento, debido a la pérdida de clorofila. Este nutriente puede ser trasladado por la planta vía floema y xilema, pero el movimiento hacia hojas nuevas es restringido, por lo que la deficiencia se acentúa en las mismas (Koch et al., 2019).

2.6. Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes de mayor importancia para el crecimiento de las plantas. Es esencial para la formación de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, enzimas y constituyentes de membrana, además de que es un componente vital de la molécula de clorofila (Aldabe & Aldabe, 1976; Duguma & Chewaka, 2019; Koch et al., 2019). El cultivo de papa requiere grandes cantidades de este nutriente para tener un buen desempeño (Ospina et al., 2014).

Un aporte limitado de nitrógeno provoca una restricción en el crecimiento de la parte aérea de la planta. El principal síntoma de deficiencia es una clorosis foliar, debida a la perturbación de los cloroplastos, que se distribuye de forma

equitativa en toda la hoja (Mengel & Kirkby, 2000). Además de esto, las plantas presentan un aspecto achaparrado, débil desarrollo de tallos y se adelanta la tuberización. Las hojas inferiores son las primeras en presentar síntomas (Aldabe & Aldabe, 1976).

El contenido de nitrógeno en la fracción mineral del suelo es muy bajo. El total del nutriente en la capa arable de los suelos oscila comúnmente entre el 0,02 y 0,40 % del total. En Uruguay ese porcentaje oscila entre 0,08 % en Acrisoles y 0,35% en Brunosoles y Vertisoles (Gianquinto et al., 2013; Rabuffetti, 2017).

El nitrógeno en el suelo se encuentra principalmente asociado a biomoléculas en la materia orgánica. Las fuentes orgánicas no pueden ser utilizadas directamente por las plantas, por lo tanto, requieren una transformación a nitrógeno mineral. Este es un proceso bioquímico llevado a cabo por los microorganismos del suelo. La mineralización neta y la tasa de mineralización dependen de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, así como también de la composición y las condiciones ambientales donde se desarrolla el proceso (Monsalve et al., 2017; Rabuffetti, 2017).

La papa necesita tener una buena disponibilidad de este nutriente durante la primer etapa de desarrollo para la producción de tallos y hojas (Montaldo, 1984). Las aplicaciones deben realizarse poco antes o al momento de la plantación. Lo mejor es aplicarlo de forma fraccionada para acompañar de mejor manera la demanda del cultivo (Ojala et al., 1990 como se cita en Koch et al., 2019).

2.6.1. Efecto de la Nutrición Nitrogenada en el Crecimiento Foliar

Aportes crecientes de nitrógeno, dentro de determinados límites, se traducen en mejores rendimientos, principalmente, por su efecto como promotor del desarrollo del follaje. El total de la producción de materia seca del cultivo depende principalmente de la duración de su área foliar. Dichas variables la más afectada por la fertilización nitrogenada (Biemond et al., 1995; Ellissèche, 1999).

Los efectos positivos sobre la misma están dados, principalmente, por una estimulación de la ramificación apical. Además de esto, el nitrógeno provoca una mayor tasa de expansión foliar y hojas de mayor tamaño. A su vez, estimula

la brotación y aumenta el número de hojas por brote, dando como resultado un incremento en la tasa de aparición de hojas (Biemond et al., 1995; Ospina et al., 2014).

Frente a deficiencias del nutriente, su contenido en la planta disminuye y la acumulación de carbono es afectada negativamente. La disminución en la producción de biomasa puede estar asociada, en primer lugar, a una reducción en la radiación interceptada total o a una disminución en la eficiencia de conversión a materia seca. A su vez, puede estar actuando una combinación de ambos fenómenos (Muchow & Davis, 1988 como se cita en Hu et al., 2023).

2.6.2. Efecto del Nitrógeno Sobre el Ciclo

El nitrógeno afecta de forma notoria el largo de las distintas etapas en el ciclo del cultivo de papa. Durante etapas tempranas del desarrollo, las necesidades del nutriente son relativamente bajas, por lo que la tuberización puede ser suprimida o retrasada por un alto aporte (Alonso, 1996; Koch et al., 2019). Los mayores requerimientos se dan durante el llenado de los tubérculos (Ojala et al., 1990 como se cita en Koch et al., 2019).

Se ha propuesto que la acumulación de carbohidratos en la punta del estolón es la responsable del comienzo de la tuberización; todas las condiciones que promuevan dicha acumulación son favorables al proceso. Aplicaciones continuas de nitrógeno favorecen el crecimiento de brotes. La escasez de asimilados para el tejido vegetal subterráneo, provocada por el excesivo crecimiento aéreo, podría ser un factor responsable del retraso o incluso la inhibición completa de la tuberización (Krauss, 1985).

Existen diversos reguladores de crecimiento que afectan la formación de estolones y tubérculos en el cultivo de papa. La tuberización está controlada por un balance entre sustancias promotoras e inhibidoras. El suministro de nitrógeno controla la iniciación y el crecimiento del tubérculo con gran precisión; esto sugiere que dicho efecto está basado en cambios en los niveles endógenos de fitohormonas, de forma similar a lo que ocurre con el fotoperiodo o la temperatura (Krauss, 1985).

2.7. Consecuencias Ambientales del Uso de Fertilizantes Nitrogenados

Si bien los diferentes nutrientes son elementos cruciales para el desarrollo de los cultivos, las aplicaciones excesivas pueden tener efectos negativos sobre el ambiente (Fassana et al., 2022). Un manejo adecuado de la fertilización requiere conocer la fertilidad del suelo y, a su vez, asociarla con la demanda total y la tasa diaria de acumulación nutrimental del cultivo (Sifuentes et al., 2013).

El desajuste en el aporte de nitrógeno puede traer aparejado una mayor probabilidad de pérdidas del nutriente en el ambiente. Bajo ciertas condiciones, parte del nitrógeno inorgánico presente en el suelo, puede pasar a formas gaseosas y perderse en la atmósfera. Los dos procesos más importantes en la agricultura son la volatilización de amoníaco y la desnitrificación (Biemond, 1995; Koch et al., 2019; Rabuffetti, 2017).

Además de las pérdidas gaseosas del nutriente, existen otras asociadas a su dinámica y movilidad en la solución del suelo. Las características de absorción de nitrógeno de los cultivos, en conjunto con las grandes cantidades de fertilizantes nitrogenados utilizados, predisponen estas situaciones de pérdida (Biemond, 1995). Las más importantes, además de la extracción del cultivo, se deben al lavado y la erosión (Alonso, 1996).

La erosión es un proceso que afecta los horizontes superficiales del suelo. Es causante de grandes pérdidas de nitrógeno, principalmente debido a que la mayor proporción de este nutriente se encuentra asociado a la materia orgánica, la cual se concentra en los primeros centímetros del perfil (Rabuffetti, 2017).

El nitrógeno, bajo forma de nitratos, no forma compuestos insolubles con los componentes del suelo ni es retenido por el complejo coloidal, por lo que es transportado fácilmente con el agua que se mueve en el suelo. Frente a movimientos hídricos descendentes, se da la lixiviación del nutriente (Rabuffetti, 2017).

Debido al sistema radicular superficial de la papa, no es posible la captura de este elemento desde capas profundas del suelo. Esto lleva a un incremento en el riesgo de lavado en profundidad del nitrato más allá de la zona radicular. El nitrógeno lixiviado es mayor en suelos de textura liviana y en

condiciones de regadío o con fuertes lluvias (Aldabe & Aldabe, 1976; Alonso, 1996; Koch et al., 2019).

La acumulación de nitratos en el subsuelo por lixiviación provoca que estos puedan incorporarse a las aguas subterráneas o ser arrastrados hacia cauces y reservorios superficiales, configurando entonces un riesgo ambiental. En aguas superficiales, los nitratos contribuyen a la degradación de ecosistemas acuáticos. En conjunto con otros compuestos, sobre todo fosfatos, promueven el crecimiento de algas y plantas acuáticas, provocando un agotamiento del oxígeno en los cuerpos de agua; este proceso se denomina eutrofización (Rabuffetti, 2017; Zabaleta et al., 2023).

La erosión, el escurrimiento superficial, el drenaje subsuperficial y el flujo de aguas subterráneas son las principales vías de transporte del nitrógeno hacia aguas superficiales. Cuando los aportes del nutriente exceden los requerimientos del cultivo y/o cuando el fertilizante se aplica en momentos no correlacionados con la época de mayor absorción, aumentan las probabilidades de pérdidas de nitratos de la zona radicular (Rabuffetti, 2017).

2.8. Eficiencia de Uso de los Nutrientes

La incertidumbre en la estimación de los parámetros de las curvas de respuesta, en conjunto con la gran variabilidad en las condiciones del suelo y el clima, han llevado a los agricultores a optar por aplicaciones excesivas de fertilizantes, para evitar así cualquier reducción del rendimiento. Estos desajustes en el aporte han dado origen a problemas medioambientales, asociados a un flujo excesivo de nutrientes dentro y fuera de los agroecosistemas (Fassana et al., 2022).

Conocer la dinámica de la absorción de los nutrientes es un insumo básico para establecer programas de fertilización que se ajusten de forma precisa a la demanda de los cultivos, permitiendo un desarrollo óptimo de los mismos y minimizando los posibles impactos ambientales y pérdidas económicas (Bertsch, 2009).

2.8.1. Indicadores de la Eficiencia de la Fertilización

Una de las formas de evaluar la eficiencia de uso de un nutriente es cuantificar el incremento en el rendimiento por unidad de fertilizante agregado.

La misma puede ser medida a través de diversos indicadores. El objetivo de los mismos es comprender la dinámica de los nutrientes en relación a la planta y, a partir de esto, evaluar posibilidades de mejora en lo que respecta a la fertilización del cultivo (Fassana et al., 2022).

La recuperación aparente del nutriente aplicado (RA) hace referencia al aumento en la absorción del nutriente por unidad de nutriente aplicado. Depende principalmente de la congruencia entre la demanda de la planta y la liberación de nutrientes del fertilizante. Está determinada por el método y momento de aplicación, la cantidad y la forma con que se aplica el nutriente, así como también por variables que inciden en el crecimiento del cultivo, entre las que se destacan el genotipo, el clima, la densidad y el grado de afectación por distintos tipos de estreses, tanto bióticos como abióticos (Bruulsema et al., 2004; Fassana et al., 2022).

La eficiencia fisiológica del nutriente aplicado (EF) refiere al aumento en el rendimiento por unidad de aumento en la absorción de nutrientes del fertilizante. Está relacionada a la capacidad de la planta para transformar los nutrientes añadidos en rendimiento físico. Este indicador se encuentra determinado principalmente por el genotipo, el ambiente y el manejo del cultivo. Una EF baja sugiere un crecimiento subóptimo dado por otro factor limitante, ya sea por la mala aplicación del nutriente en cuestión, la deficiencia de otro nutriente o por algún tipo de estrés y/o manejo inadecuado (Fassana et al., 2022).

La eficiencia de utilización interna de un nutriente (EUI) se calcula a partir del rendimiento total en relación a la absorción total del nutriente. Es útil para describir la habilidad de una planta para transformar los nutrientes adquiridos, tanto desde el suelo como de los fertilizantes, en rendimiento físico. Está afectada por el genotipo, el ambiente y el manejo. Una EUI muy alta sugiere una deficiencia del nutriente, mientras que una EUI baja refiere a una conversión interna de nutrientes limitada por otros factores de estrés (Bock, 1984 como se cita en García Lamothe, 2014; Fassana et al., 2022).

La eficiencia agronómica del nutriente aplicado (EA) está basada en el aumento en el rendimiento por unidad de nutriente aplicada. Es producto de la recuperación de nutrientes y de la eficiencia con la que la planta utiliza cada unidad adicional de nutriente. Está determinada por los factores que afectan la

RA y la EF (Fassana et al., 2022; Mollet et al., 1982 como se cita en García Lamothe, 2014).

La productividad parcial del factor del nutriente aplicado (PPF) se obtiene a través de la relación entre el total de producto cosechado y el nutriente aplicado. Este indicador integra la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados y los del suelo (Fassana et al., 2022).

En el caso del cultivo de papa, el rendimiento en materia seca del tubérculo por unidad de nitrógeno aplicada puede ser definida como la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) (Tiemens-Hulscher et al. 2014 como se cita en Koch et al., 2019). Cada paso de la EUN de la planta, incluida la absorción de nitrógeno, el transporte, asimilación y removilización está regulado por factores ambientales y genéticos. La EUN en el caso de la papa puede ser considerada baja en comparación con otros cultivos. Esto se puede atribuir a su sistema radicular poco profundo que conduce a una absorción restringida (Ospina, 2016).

2.9. Materiales Genéticos

Las variedades pueden presentar diferencias en cuanto al grado de adaptación a nuestros ambientes y sistemas de cultivo. Observaciones empíricas y comportamientos productivos registrados en suelos empobrecidos en nuestro país, sugieren que los cultivares de papa producto del mejoramiento nacional podrían contar con una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes (F. Vilaró, comunicación personal, 2023).

Entre las principales variedades de papa utilizadas en Uruguay se encuentran Chieftain, Red Magic, Rudolph y Arequita. Según la DIEA (2021), para la primavera 2020/21, la variedad con mayor área plantada fue Red Magic, con un total de 354 ha, representando un 26% del total. Es seguida por Chieftain, la cual presentó una superficie similar. Como tercera en importancia se ubicó Arequita, con una superficie de 124 hectáreas, representando un 9% del total.

2.9.1. Arequita

El cultivar INIA Arequita es de ciclo semitemprano a semitardío (100-120 días) y período medio de dormición (80-90 días). La planta se caracteriza por presentar un desarrollo inicial lento y luego muy vigoroso. Los tubérculos son de tamaño medio a grande y de forma oval-alargada. Tienen piel lisa, de color

rosado intenso y pulpa crema pálida, muy uniformes en cuanto a forma y tamaño (González & Giménez, 2017).

Presenta un potencial de producción alto que va de 40 a 50 toneladas por hectárea, con un comportamiento similar tanto en primavera como en otoño. Presenta tolerancia a sequía y cuenta con una alta resistencia a virus, siendo inmune a al virus del mosaico severo de la papa y resistente a virus del enrollado de la hoja de la papa y a sarna común (*Streptomyces scabies*) (González & Giménez, 2017).

2.9.2. Red Magic

El cultivar Red Magic tuvo su origen en Estados Unidos, proviene del programa de mejoramiento genético de la Universidad de Cornell, en Nueva York (Government of Canada, 2023). Es distribuida por la empresa francesa Germicopa. Se caracteriza por ser un material semitardío, con tubérculos oblongos cortos, de color rojo y pulpa blanca (Isterra, 2023).

El desarrollo inicial de esta variedad es muy lento, pero luego es capaz de alcanzar vigores elevados. El rendimiento es medio, presenta un número intermedio de tubérculos de gran calibre por planta. El reposo vegetativo es largo. Cuenta con una alta resistencia frente al virus del mosaico severo de la papa y *Alternaria*, así como también a sarna común (*Streptomyces scabies*) (Isterra, 2023).

3. Materiales y Métodos

3.1. Delimitación Espacio-Temporal

El experimento se realizó en el Centro Regional Sur de Facultad de Agronomía, ubicado en el kilómetro 35 de camino Folle, en la localidad de Progreso, Departamento de Canelones (Latitud 34°36'47"S, Longitud 56°13'4"O). El ensayo se instaló el 26 de septiembre de 2022 y se cosechó el 9 de enero de 2023.

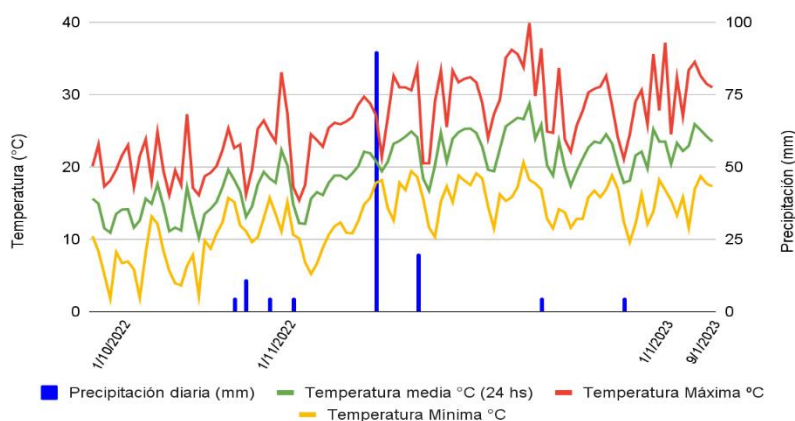
3.2. Caracterización Climática

El ciclo del cultivo abarcó la primavera de 2022 y parte del verano 2022/23. Las plantas estuvieron bajo condiciones de temperatura y fotoperiodo crecientes. Las temperaturas fueron, en promedio, desde los 15°C al inicio del ciclo hasta los 25°C, a principios del mes de enero (Figura 3). La temperatura estuvo por encima del promedio registrado en el periodo 2012/2023 (Figura 4).

La estación en la que se llevó a cabo el ensayo se caracterizó por ser muy seca; se registró un evento de precipitación importante en todo el ciclo del cultivo a mediados del mes de noviembre (Figura 3). En comparación con la precipitación promedio mensual respecto a los 10 años anteriores, se observó una notoria disminución (Figura 4).

Figura 3

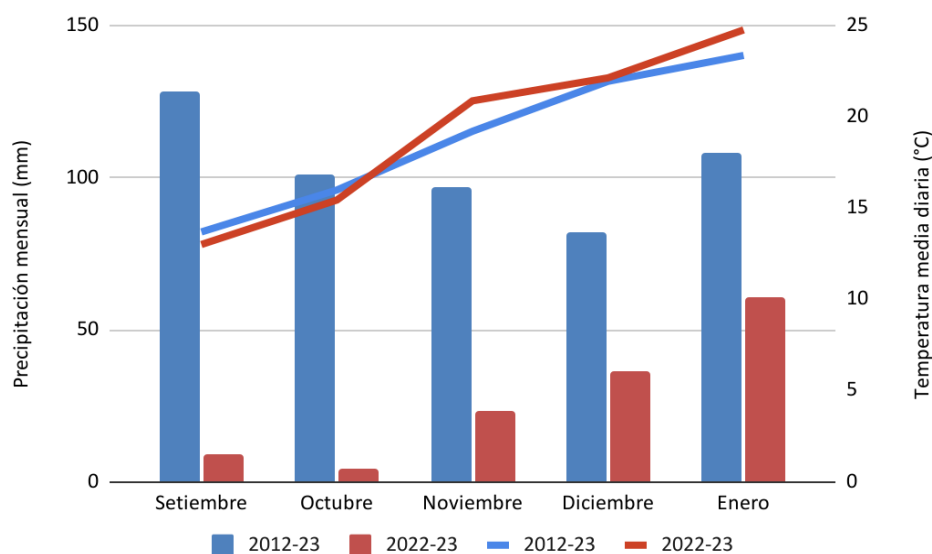
Temperatura y precipitaciones registradas durante el ciclo del cultivo



Nota. Gráfico realizado en base a datos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, 2023) para Las Brujas, Canelones.

Figura 4

Comparación temperatura media diaria y precipitación mensual frente al promedio de los 10 años anteriores



La humedad relativa diaria presentó un decremento persistente durante el ciclo del cultivo, con valores máximos diarios superiores al 75% en septiembre y mínimos promedio entorno al 64% en enero. El comportamiento de la misma fue similar al promedio de los 10 años anteriores.

3.3. Caracterización Suelos

Según la carta de reconocimiento de suelos 1/1.000.000 (Durán, 1976), el sitio del ensayo se encuentra comprendido dentro de la unidad Tala Rodríguez. Esta unidad se caracteriza por presentar como suelos dominantes Brunosoleseutricos típicos/lúvicos (limosos y limo-arcillosos) y Vertisoles rúpticoslúvicos (típicos) (limo-arcillosos).

El suelo sobre el que se realizó el ensayo se trata de un Vertisol de clase textural arcillo arenoso, en un muy buen estado de conservación. Presenta un 46% de arena, un 16% de limo y un 38% de arcilla. El contenido de materia orgánica, estimada a partir del carbono orgánico, es de 3,75%.

A partir de los resultados del análisis de suelo se estimó el contenido total de nutrientes disponibles para el cultivo (Tabla 1). Se asume una densidad aparente de $1,25 \text{ Mg.m}^{-3}$. El aporte de nitrógeno se estimó en base al porcentaje

de materia orgánica; se consideró una tasa de mineralización promedio de 3 %. El cálculo se realizó para un ciclo con una duración de tres meses y medio.

Tabla 1

Resultado del análisis de suelo

mg/kg			cmolc/kg	
Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
70,12	50	0,92	19,65	5,24

3.4. Descripción de los Tratamientos

Se utilizaron dos cultivares, Arequita, producto del programa de mejoramiento genético nacional y Red Magic, variedad extranjera con amplia difusión en el país. Para cada cultivar se aplicaron 3 dosis de nitrógeno, 70, 140 y 210 kgN.ha⁻¹ y un tratamiento control sin el agregado de fertilizante nitrogenado (Tabla 2). La dosis máxima del nutriente a utilizar fue seleccionada en base al manejo convencional realizado por los productores, según la descripción del mismo en la Evaluación Nacional de Cultivares (Instituto Nacional de Semillas [INASE], 2018), de los últimos 10 años. Se consideraron los requerimientos de absorción para un rendimiento de 40 toneladas por hectárea.

Tabla 2

Estimación de la proporción del nitrógeno requerido cubierta por la fertilización y el suelo

Fertilización (kgN/ha)	70	140	210
Absorción total cubierta por fertilizante agregado (%)	36	73	109,09
Absorción total cubierta por fertilizante agregado+aporte teórico del suelo (%)	67	104	140,08

Nota. Requerimientos para un estimado rendimiento de 40 toneladas según lo propuesto por Ciampitti y García (2007).

3.5. Diseño Experimental

Se utilizó un diseño factorial en bloques completos al azar. Los factores evaluados fueron distintas dosis de nitrógeno en dos cultivares. En total se utilizaron 4 dosis del nutriente y dos materiales genéticos, dando como resultado 8 tratamientos. Se construyeron 3 bloques en función de la pendiente del terreno, delimitando una zona alta, una media y una baja, dentro de cada una de las cuales se sortearon al azar los tratamientos.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el programa R versión 2023.03.1+446. Se utilizaron distintos modelos en función de la distribución de las variables medidas. Para las que presentaron distribución normal se utilizó un modelo mixto, en el cual se incluyó como factor al tiempo, mientras que para las variables discretas se ajustó un modelo con distribución QuasiPoisson. La comparación de medias se realizó a través de diferencia mínima significativa (DMS) y/o mediante el test de Tukey. Se utilizó una probabilidad de error de 0,05 en todos los casos.

3.6. Descripción del Manejo

El ensayo se instaló a partir de papa semilla certificada, procedente de un semillero en la zona este del país (Empresa Todocampo). El peso promedio de los tubérculos fue de 94 y 95 gramos en Arequita y Red Magic respectivamente. El marco de plantación utilizado fue de 0,80 x 0,30 m, dando como resultado una densidad de 4,16 plantas/m². La plantación se hizo sobre camellones. Se realizó un riego por aspersión para contribuir con la preparación del suelo previo a la plantación. Una vez instalado el ensayo, el riego fue por goteo durante todo el ciclo del cultivo.

Los requerimientos nutricionales del cultivo se estimaron a partir de la absorción y extracción total propuesta por Ciampitti y García (2007) y un rendimiento objetivo de 40 toneladas por hectárea. Se realizó una fertilización de base en la que se aportó fósforo y potasio.

La fertilización nitrogenada se aportó de forma fraccionada. Se aplicó un tercio del total para cada tratamiento a la plantación. La segunda aplicación se realizó luego del primer aporque, 40 días luego de la instalación del cultivo, y el último tercio se aplicó en el segundo aporque, a los 60 días de ciclo.

Previo a la plantación se aplicaron herbicidas preemergentes para el control de malezas durante las primeras etapas del cultivo. A lo largo del ciclo se realizaron aplicaciones puntuales de fungicidas; las mismas se decidieron en base al monitoreo periódico de las plantas (Tabla 3).

Tabla 3

Aplicaciones de herbicidas y fungicidas durante el ciclo del cultivo

Tipo de producto	Principio activo	Fecha de aplicación	Concentración
Herbicida	Metribuzin 480 g/l	17/10/2022	1,30cc/L
Herbicida	Haloxifop-P-metil 108g/L	17/10/2022	30 cc/L
Fungicida	Mancozeb 80 % p/p	18/10/2022	8 g/L
Fungicida	Azoxistrobin 250 g/L	29/11/2022	20 cc/L
Fungicida	Mancozeb 80 % p/p	29/11/2022	8 g/L
Fungicida	Azoxistrobin 250 g/L	19/12/2022	20 cc/L
Fungicida	Mancozeb 80 % p/p	19/12/2022	8 g/L

3.7. Variables Medidas

3.7.1. Crecimiento y Desarrollo del Cultivo

El momento de emergencia se consideró como el punto en el cual el 50% de los tubérculos plantados presentaban brotes por encima del suelo. Se realizaron 4 muestreos a los 35, 53, 73 y 105 días de ciclo. En cada muestreo se tomaron dos plantas por parcela y se midió el número y peso de hojas, tallos y tubérculos. Además, se registró el peso de la parte aérea y subterránea. Para la determinación del peso de las muestras, se utilizó una balanza digital (Ohaus, Scout Pro-4001, Alemania), capacidad 4000 g, sensibilidad 0,10 g.

Para la estimación del Índice de Área Foliar (IAF) se utilizó una medición indirecta, a través del peso específico de las hojas (g/cm^2). El procedimiento consistió en tomar con un sacabocado trozos de 2 cm^2 del limbo de 10 hojas por planta y pesarlo en una balanza de precisión. A partir del peso específico de hoja se estimó el área foliar por planta. Una vez calculado el área foliar individual, se estimó el IAF utilizando la densidad de plantación.

Las distintas fases del cultivo, según la partición de asimilados, se determinaron en base a la extrapolación de los datos de las gráficas de crecimiento de tubérculos y las de evolución del IAF. Se consideró la fase 1 desde la emergencia hasta el inicio de la tuberización. La fase 2 fue hasta que se observó el máximo IAF en cada tratamiento y la fase 3 se extendió desde ese momento hasta la cosecha.

3.7.2. Tasa de Crecimiento

La tasa de crecimiento (TCC) del cultivo se determinó a partir del cociente entre la diferencia en la materia seca acumulada de un muestreo a otro y la duración en días del periodo entre muestreos.

3.7.3. Absorción de Nitrógeno

Para la determinación de la absorción de nitrógeno por el cultivo se asoció el peso seco de los tejidos con las concentraciones del nutriente en los mismos, según lo que recomienda Bertsch (2009). La absorción de los tratamientos se determinó en cuatro momentos del ciclo, a los 35, 53, 73 y 105 días. La concentración de nitrógeno en las diferentes fracciones se determinó mediante autoanizador NC, Flash EA 1112, ThermoScientific.

La absorción por fase se estimó mediante la sumatoria de la acumulación diaria de nitrógeno de cada tratamiento en el periodo correspondiente a cada una. El nitrógeno absorbido diario se calculó a través del cociente entre la diferencia en el contenido de nitrógeno de un muestreo a otro y los días entre los mismos.

3.7.4. Rendimiento

El rendimiento se midió a los 105 días de ciclo. Se cosecharon de forma manual los 4 metros lineales centrales de uno de los canteros de la parcela. Los tubérculos cosechados se clasificaron según su tamaño y se pesaron individualmente. A partir de lo cosechado de los 3,8 m² se estimó el rendimiento en kg.ha⁻¹ y se clasificó en categorías según su peso.

El rendimiento comercial se determinó a partir de descontarle al rendimiento total lo correspondiente a la fracción descarte y los tubérculos con

un peso inferior a 40 gramos. La fracción de descarte estuvo constituida por tubérculos con problemas sanitarios y/o rajado.

3.8. Indicadores de Eficiencia de la Fertilización

Para analizar el efecto del nitrógeno y del genotipo en los resultados productivos, se estimaron distintos indicadores de eficiencia de la fertilización (Tabla 4).

Tabla 4

Fórmulas de cálculo de indicadores de eficiencia de la fertilización utilizados

Indicador	Fórmula de cálculo
Recuperación aparente (RA)	$RA = U - U_0 / F$
Eficiencia fisiológica (EF)	$EF = (Y - Y_0) / (U - U_0)$
Eficiencia de utilización interna (EUI)	$EUI = Y / U$
Eficiencia agronómica (EA)	$EA = (Y - Y_0) / F$ ó $EA = RA \times EF$
Productividad parcial del factor (PPF)	$PPF = Y / F$
Índice de cosecha (IC)	$IC = MS_{tub} / MS_{máx}$
Índice de cosecha de nitrógeno (ICN)	$ICN = N_{tub} / N_{total}$

Nota. U = Absorción total del nutriente en la biomasa aérea a la madurez ($kg \cdot ha^{-1}$) en una parcela fertilizada; U_0 = Absorción total del nutriente en la biomasa aérea a la madurez ($kg \cdot ha^{-1}$) en una parcela no fertilizada (testigo); F= cantidad de nutriente aplicado ($kg \cdot ha^{-1}$); Y= rendimiento del cultivo con agregado de nutriente ($kg \cdot ha^{-1}$); Y_0 = rendimiento del cultivo sin agregado de nutriente ($kg \cdot ha^{-1}$); MS máx= máxima materia seca total.

4. Resultados

4.1. Efecto del Genotipo y la Fertilización Nitrogenada en el Crecimiento y Desarrollo del Cultivo

La emergencia del cultivo se registró entre el 22 y el 27 de octubre, aproximadamente 28 días luego de la plantación. Se observaron diferencias en el momento según el cultivar; Arequita emergió más rápido y presentó un mayor desarrollo inicial. Las parcelas de Red Magic emergieron entre 3 y 5 días más tarde y a su vez, el desarrollo inicial fue más lento.

4.1.1. Crecimiento del Follaje

La cantidad de follaje está dada por el número de tallos y su ramificación, el número de hojas por tallos y el crecimiento de las hojas. El número de tallos fue determinado por los cultivares durante etapas iniciales del ciclo, siendo superior en Arequita, con 2,41 tallos por planta frente a 1,56 en Red Magic. Posterior a esto no se observó efecto de ninguno de los factores analizados, registrando valores alrededor de 2 tallos por planta en ambos cultivares.

El número de ramas fue definido por la dosis de nitrógeno aplicada (Tabla 5). Para ambos cultivares se registró mayor ramificación con las dosis de 140 y 210 kgN.ha⁻¹; la diferencia en ramificación es más marcada alrededor de los 73 días de ciclo. En los demás muestreos solamente se diferenció la dosis de 210 kgN.ha⁻¹.

Tabla 5

Número de ramas en función de la dosis de nitrógeno aplicada como fertilizante

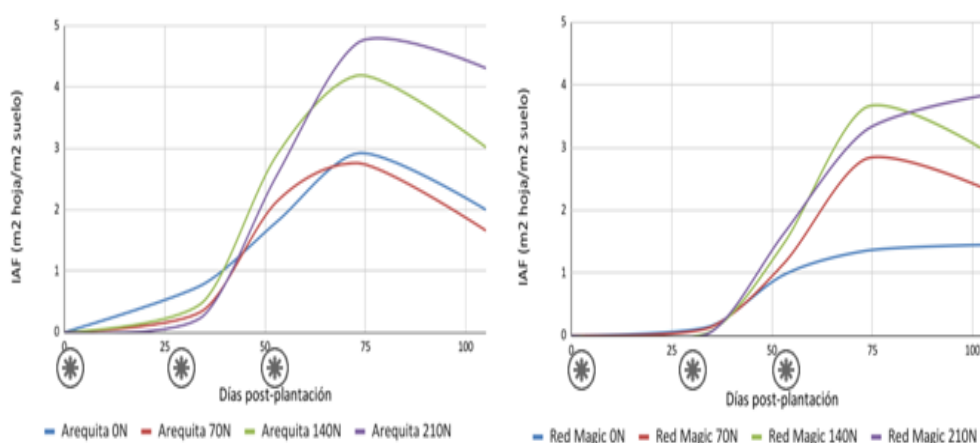
Dosis N (kg/ha)	53 días	73 días	105 días
0	1,76 b	2,00 b	1,15 c
70	1,63 b	2,57 b	2,41 bc
140	3,81 ab	6,13 a	4,21 ab
210	5,71 a	6,78 a	5,70 a

El Índice de Área Foliar (IAF) del cultivo aumentó de forma exponencial luego de la emergencia, para pasar luego por una etapa de incrementos decrecientes hasta alcanzar un máximo, luego del cual se registró un

decremento hacia el final del ciclo (Figura 5). El IAF del cultivo fue afectado tanto por el genotipo como por las distintas dosis de nitrógeno. Al inicio las diferencias entre tratamientos estuvieron dadas exclusivamente por un efecto varietal, siendo Arequita superior a Red Magic. Posterior a esto todas las diferencias se deben al efecto del nutriente.

Figura 5

Curvas de evolución del Índice de Área Foliar (IAF)



Nota. Los asteriscos se corresponden con los momentos en los que se agregó el fertilizante nitrogenado.

Se registró un comportamiento similar al IAF tanto en el peso como en el número de hojas. Solamente difirió para el caso de la materia seca en el último muestreo, puesto que para esta variable vuelve a ser significativo únicamente el genotipo, por lo que no se aprecia el efecto de la aplicación diferencial de nitrógeno al final del ciclo.

Se dio una interacción significativa entre las dosis de nitrógeno y las fechas, lo que muestra un cambio en el efecto relativo de las distintas dosis del nutriente a lo largo del ciclo. El IAF en el tratamiento de Red Magic sin agregado de nitrógeno no aumentó luego de los 35 días. En los demás tratamientos se registró el máximo IAF luego de los 70 días post plantación (Tabla 6).

A partir del momento en el que se alcanzó el máximo IAF, el nitrógeno pasó a ser el único factor significativo. Los tratamientos con alta fertilización nitrogenada presentaron un desarrollo de su área foliar superior que las dosis bajas. Esta diferenciación entre los tratamientos de fertilización contrastantes se

da desde el día 73 en Red Magic, mientras que en Arequita solo se registró en el muestreo final (Tabla 6).

Se observa una distancia considerable entre el tratamiento de Red Magic sin fertilizante nitrogenado y todos los demás, sin embargo, este cultivar dejó de mostrar una respuesta clara luego de los 70-140 kgN.ha⁻¹. Arequita fue capaz de responder en aumento de su IAF al agregado incremental de nitrógeno hasta los 210 kgN.ha⁻¹ (Tabla 6).

Tabla 6

Índice de Área Foliar (IAF) por tratamiento en las distintas fechas de muestreo

Variedades	Dosis N (kg/ha)	0	70	140	210
Red Magic	35 DPP	0,16 a A	0,14 c A	0,07 c A	0,06 c A
	53 DPP	0,97 a A	1,15 bc A	1,47 bc A	1,63 b A
	73 DPP	1,35 a B	2,81 a AB	3,63 a A	3,26 a A
	105 DPP	1,45 a B	2,29 ab B	2,88 ab AB	3,86 a A
Arequita	35 DPP	0,80 b A	0,38 b A	0,52 b A	0,23 c A
	53 DPP	1,81 ab A	2,14 ab A	2,90 a A	2,57 b A
	73 DPP	2,92 a A	2,76 a A	4,19 a A	4,72 a A
	105 DPP	2,00 ab B	1,66 ab AB	3,02 a AB	4,32 ab A

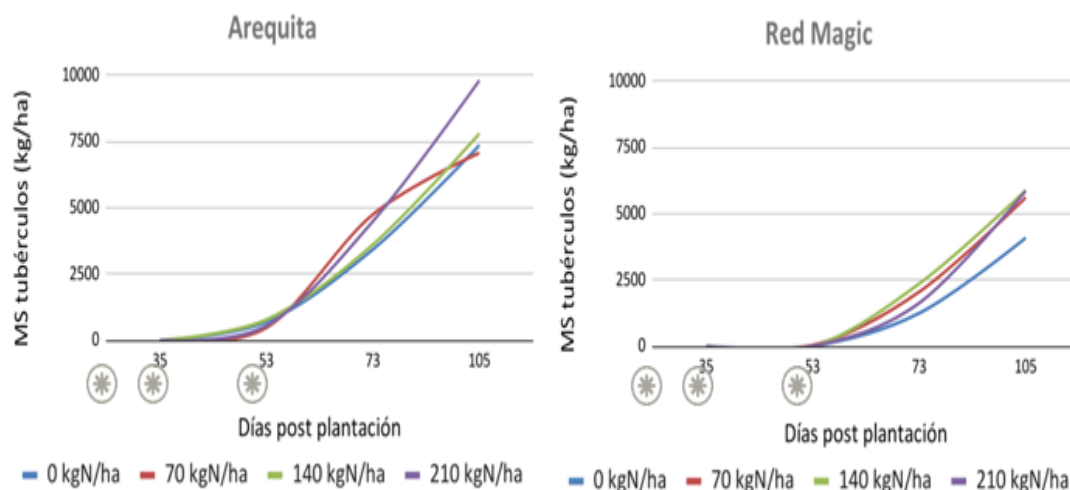
Nota. Letras minúsculas para comparación vertical dentro de cultivares y mayúsculas para comparación horizontal; DPP= Días post-plantación.

4.1.2. Crecimiento y Desarrollo de los Tubérculos

El crecimiento de los tubérculos estuvo determinado por los cultivares. Se registró tuberización a partir de los 50 días post plantación; en Arequita el proceso se dio de forma más temprana y este cultivar se mantuvo con mayor crecimiento de tubérculos durante todo el ciclo (Figura 6). El número de tubérculos por planta fue determinado al inicio por el cultivar, presentando Arequita más tubérculos. Posterior a esto ninguno de los factores analizados tuvo efecto sobre este parámetro.

Figura 6

Curvas de crecimiento de la materia seca de tubérculos



Nota. Los asteriscos se corresponden con los momentos en los que se agregó el fertilizante nitrogenado.

4.1.3. Tasa de Crecimiento

La tasa de crecimiento del cultivo fue definida por el cultivar. Para todas las fechas de muestreo Arequita estuvo por encima de Red Magic. Se registró una interacción significativa entre los cultivares y las distintas fechas, lo que sugiere diferencias en la dinámica del crecimiento durante el ciclo de los distintos materiales. Las máximas tasas de crecimiento totales se registraron durante etapas avanzadas, luego de los 70 días post plantación, durante la etapa de llenado de los tubérculos; las mismas estuvieron alrededor de 220 y 320 $\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ diarios en Red Magic y Arequita respectivamente (Tabla 7).

La máxima tasa de crecimiento de los tubérculos coincide con el momento en el que el cultivo alcanza su máxima área foliar en ambos cultivares. Arequita logra un crecimiento superior a los 170 $\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ diarios, luego disminuye de forma considerable hacia el final del ciclo. Red Magic se mantiene en niveles altos hasta el final del ciclo, alcanzando previo a la cosecha valores alrededor de 110 $\text{kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ diarios (Tabla 7).

Tabla 7

Tasa de crecimiento diario, de tubérculos y del resto de la planta durante el ciclo

Cultivar	DPP	Tasa de crecimiento (kgMS/ha/día)		
		Tubérculos	Resto de la planta	Total
Arequita	35	0,000 d	9,289 c	9,289 c
	53	34,66 c	67,08 bc	101,6 b
	73	172,0 a	92,80 b	264,8 a
	105	123,0 b	202,7 a	325,7 a
Red Magic	35	0,000 b	4,089 b	4,089 b
	53	0,902 b	53,84 ab	54,67 b
	73	90,38 a	92,63 a	183,0 a
	105	110,45 a	112,3 a	222,7 a

Nota. Comparación de medias dentro de cultivares en sentido vertical.

4.1.4. Partición de Materia Seca en la Planta

La partición de la materia seca estuvo determinada por los cultivares. En el caso de Arequita a los 50 días, la partición hacia tubérculos fue de 30% en promedio, resultado de una tuberización temprana. La partición hacia tubérculos aumenta hasta los 73 días y posteriormente, presenta una notoria disminución hacia el final del ciclo. En Red Magic se observa menos de un 2% de materia seca de tubérculos a los 50 días; luego de esto, el incremento de la acumulación es continuo, alcanzando el máximo previo a la cosecha (Tabla 8).

Hasta el día 50 el total de la materia seca de la planta se encontraba distribuida en hojas, raíces y tallos aéreos. Una vez que comienza la tuberización se da un notorio cambio en la partición. En el momento de máximo crecimiento del área foliar, se observó una mayor acumulación de materia seca en tubérculos en los tratamientos con menor aporte de nitrógeno. Al final del ciclo todos los tratamientos vuelven a presentar una partición similar (Tabla 8).

Independientemente de los factores analizados, al final del ciclo se observa una acumulación promedio de materia seca cercana al 45 % en tubérculos en todos los tratamientos. En ninguno de los casos este parámetro superó el 50%, valor muy por debajo de lo esperado para este cultivo.

Tabla 8*Distribución relativa de la materia seca en la planta*

Genotipo	Dosis N (kg/ha)	35 DPP		53 DPP		73 DPP		105 DPP	
		% MS p. aér.	% MS tub	% MS p. aér.	% MS tub	% MS p. aér.	% MS tub	% MS p. aér.	% MS tub
Arequita	0	100	0	66,0	34,0	41,0	59,0	52,1	47,9
	70	100	0	73,3	26,7	35,3	64,7	62,2	37,8
	140	100	0	72,1	27,9	53,2	46,8	54,4	45,6
	210	100	0	72,9	27,1	50,1	49,9	52,0	48,0
	<i>Promedio</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>71,1</i>	<i>28,9</i>	<i>44,9</i>	<i>55,1</i>	<i>55,2</i>	<i>44,8</i>
Red Magic	0	100	0	98,2	1,8	58,7	41,3	55,8	44,2
	70	100	0	95,8	4,2	53,6	46,4	53,8	46,2
	140	100	0	100,0	0,0	59,2	40,8	56,5	43,5
	210	100	0	99,6	0,4	72,5	27,5	54,1	45,9
	<i>Promedio</i>	<i>100</i>	<i>0</i>	<i>98,4</i>	<i>1,6</i>	<i>61,0</i>	<i>39,0</i>	<i>55,0</i>	<i>45,0</i>

Nota. DPP= Días post-plantación.

4.2. Absorción de Nitrógeno

La absorción de nitrógeno total estuvo determinada por la fertilización nitrogenada. A partir de los 73 días, los mayores contenidos de nitrógeno en planta se dieron en el tratamiento con una aplicación de 210 kgN.ha⁻¹, aunque no se diferenciaron significativamente de las demás dosis (Tabla 9). En el caso de los tubérculos, durante las primeras etapas del ciclo, solamente se ven diferencias relacionadas a los efectos varietales; luego de esto el nitrógeno pasa a ser el factor determinante.

Los tratamientos control, sin agregado de fertilizante, fueron capaces de absorber 130 y 190 kilos de nitrógeno en Red Magic y Arequita respectivamente. Esto demuestra un muy alto aporte de nitrógeno por parte del suelo. El tratamiento con la máxima fertilización en Arequita fue capaz de absorber alrededor de 340 kgN.ha⁻¹, mientras que Red Magic alcanzó 210 kgN.ha⁻¹. Si bien no fue detectado en el experimento un efecto genotípico, esto podría sugerir una habilidad diferencial de los cultivares para extraer y almacenar nitrógeno (Tabla 9).

Tabla 9

Absorción total de nitrógeno según dosis de nitrógeno aplicada

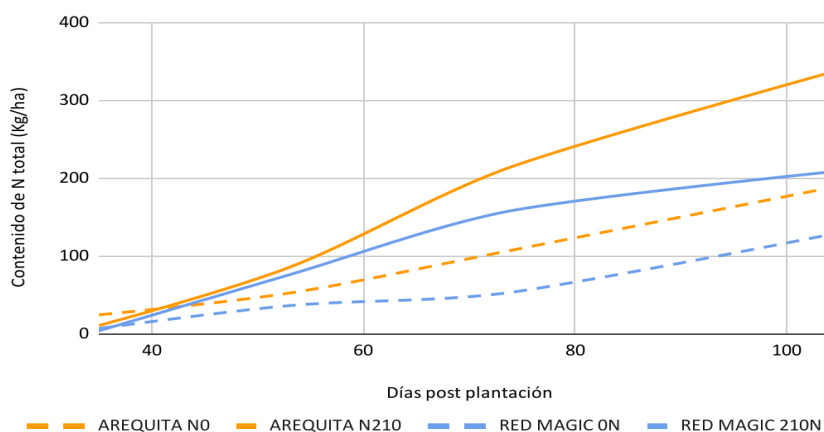
Cultivar	Dosis N (kg/ha)	KgN/ha			
		35 DPP	53 DPP	73 DPP	105 DPP
Arequita	0	24,28 a	52,82 ab	105,19 ab	190,52 ab
	70	12,81 ab	61,77 ab	129,61 ab	216,98 ab
	140	16,75 ab	105,34 a	144,75 ab	228,85 ab
	210	11,13 ab	85,87 ab	210,18 a	339,47 a
Red Magic	0	7,19 b	36,69 b	52,11 b	130,38 b
	70	6,43 b	40,24 b	88,67 ab	143,14 b
	140	4,88 b	63,51 ab	135,39 ab	171,28 ab
	210	4,28 b	76,31 ab	156,10 ab	209,67 ab

Nota. DPP= Días post plantación.

Los tratamientos con la máxima fertilización presentaron un mayor contenido total de nitrógeno que los controles en ambos cultivares. Sin embargo, en el caso de Arequita con 210 kgN.ha⁻¹, se aprecia un aumento pronunciado en el contenido del nutriente durante todo el ciclo, mientras que, el tratamiento de igual dosis en Red Magic muestra un incremento más lento en la absorción entre los 73 y 105 días. Los tratamientos sin agregado de nitrógeno muestran un comportamiento similar en ambos cultivares, aunque Arequita es superior a Red Magic durante todo el periodo (Figura 7).

Figura 7

Contenido de nitrógeno total en muestras en tratamientos de fertilización contrastantes de cada cultivar



Se observaron acumulaciones diferenciales del nutriente en función de la etapa de desarrollo (Tabla 10). Red Magic presentó una mayor absorción que Arequita durante la primera fase, mientras que en la segunda mostraron valores similares, con la excepción del tratamiento con la dosis máxima, en el que no se registró el pico máximo de área foliar en Red Magic.

En todos los tratamientos, la mayor absorción de nitrógeno se registró posterior al máximo desarrollo del área foliar. Sí bien los tratamientos con mayores dosis de fertilización nitrogenada absorbieron más nitrógeno, la proporción del total absorbida en cada fase no se vio modificada (Tabla 10).

Tabla 10

Nitrógeno absorbido por tratamiento en las distintas fases según la partición de asimilados del cultivo

Tratamientos		Fase 1		Fase 2		Fase 3	
Cultivar	Fertilización (kgN/ha)	N absorbido total (kg/ha)	% total	N absorbido total (kg/ha)	% total	N absorbido total (kg/ha)	% total
Arequita	0	38,84	16	79,63	33	124,88	51
	70	37,29	13	84,97	30	156,49	56
	140	61,05	18	92,03	28	181,11	54
	210	44,76	12	127,29	34	204,03	54
Red Magic	0	36,69	22	16,96	10	113,42	68
	70	40,24	22	43,89	24	99,05	54
	140	63,52	27	65,24	28	106,04	45
	210	72,71	25	213,27	75	-	-

4.3. Concentración de Nitrógeno en la Planta

La concentración de nitrógeno en etapas tempranas del ciclo estuvo determinada tanto por las dosis de nitrógeno como por los cultivares. Se observa interacción entre los factores. Arequita logra una concentración inicial del nutriente en la planta un 20% mayor que Red Magic en el tratamiento testigo, alcanzando valores de 48 gN.kgMS⁻¹. No se aprecia una diferencia en la concentración máxima alcanzada con las demás dosis de fertilización, aunque se

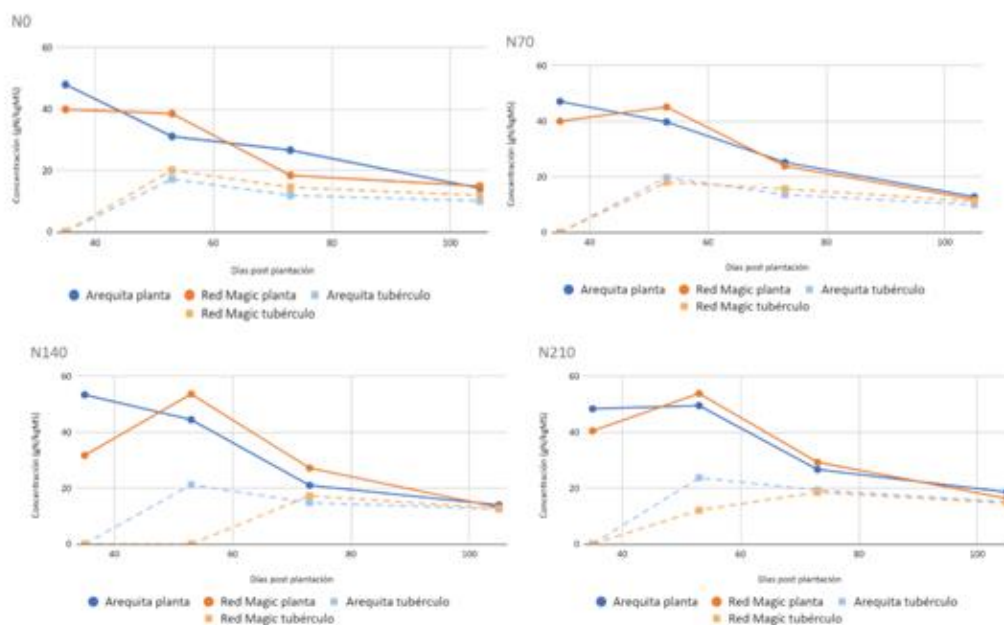
ve un desfase de alrededor de 20 días en cuánto al momento en el que se registra este máximo, siendo Red Magic más tardía (Figura 8).

Posteriormente, la concentración de nitrógeno en la materia seca de la planta presentó una caída brusca asociada a las etapas iniciales de crecimiento de los tubérculos. En fases avanzadas del ciclo, este parámetro continúa disminuyendo de forma menos pronunciada. El comportamiento durante estas etapas fue similar en todos los tratamientos (Figura 8).

La concentración de nitrógeno en los tubérculos aumentó hasta alcanzar un máximo entre 12 y 15 gN.kgMS⁻¹ en todos los tratamientos. Con las dosis de 140 y 210 kgN.ha⁻¹ se aprecia una diferencia en el momento en el que alcanzan la máxima concentración los cultivares. En Arequita se mantiene estable alrededor de los 55 días, mientras que en Red Magic se aplaza aproximadamente 20 días con las altas fertilizaciones. Al final del ciclo todos los tratamientos alcanzan valores similares entorno a 15 gN.kgMS⁻¹(Figura 8).

Figura 8

Curvas de dilución del nitrógeno en la planta



Nota. Línea entera= Tubérculos, Línea punteada= Resto de la planta.

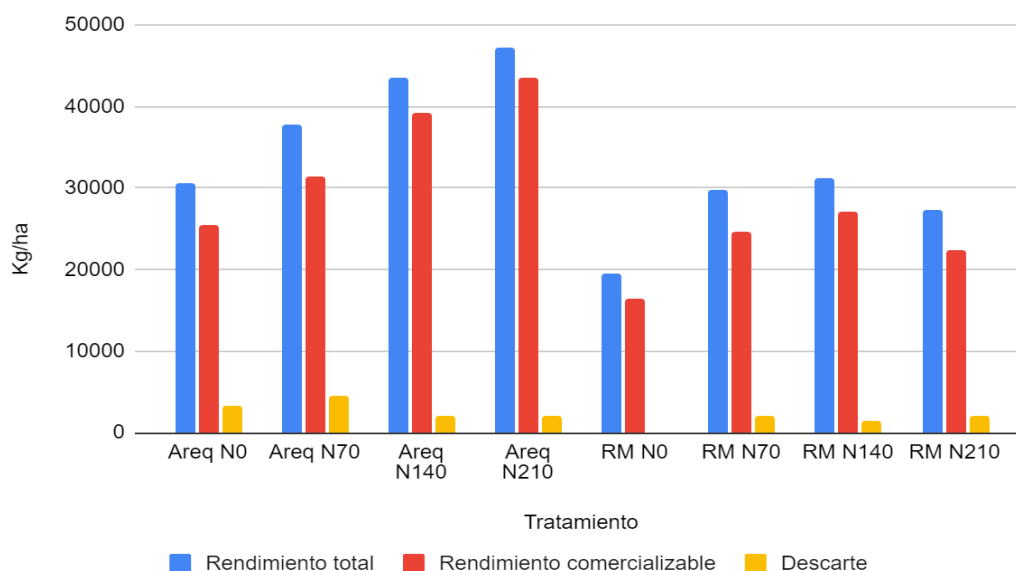
4.4. Rendimiento

El genotipo afectó de forma significativa al rendimiento total del cultivo. Arequita registró los mayores rendimientos totales con las dosis más altas de

fertilización nitrogenada. Red Magic presentó rendimientos muy acotados en el tratamiento con 0 nitrógeno, sin embargo, no mostró respuesta luego de 70 kgN.ha⁻¹, llegando incluso a disminuir la producción con la dosis más alta. El rendimiento comercial mantuvo el mismo comportamiento que el total (Figura 9).

Figura 9

Rendimiento total, comercializable y descartes por tratamiento



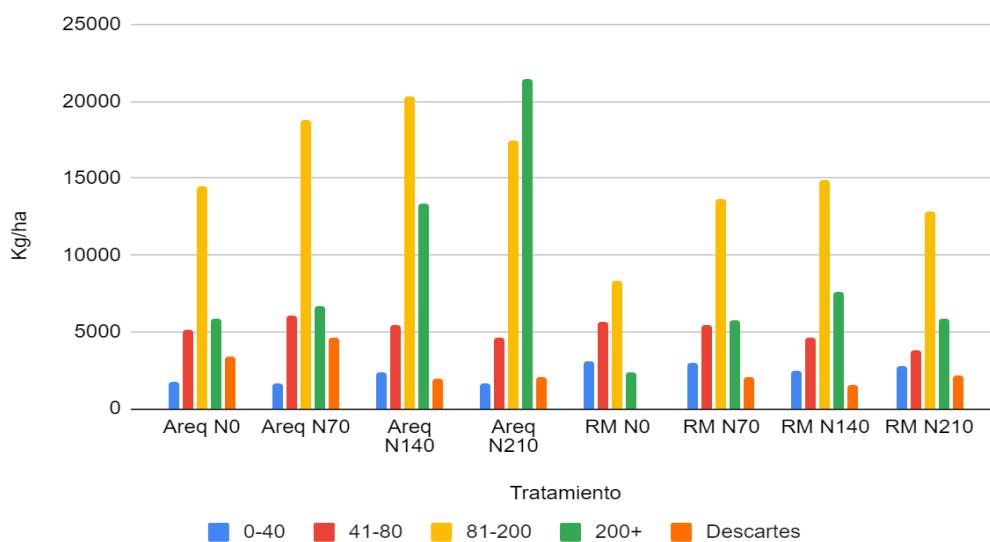
El rendimiento en función de la dosis de nitrógeno, en el caso de Arequita, se ajustó de forma significativa a una relación lineal, en la cual el intercepto estimado fue de 31.410 kg.ha⁻¹ y el parámetro b1 fue de 79,50 kg.ha⁻¹. El comportamiento en Red Magic no se ajustó de forma significativa ni a una regresión lineal ni a una cuadrática.

4.4.1. Tamaño de los Tubérculos

Se ven diferencias en la distribución de tamaños en los tubérculos en función de los cultivares y las dosis de nitrógeno aplicadas (Figura 10). En el caso de Arequita se observa un marcado aumento de la proporción de tubérculos de calibre muy grande, mayores a 200 gramos, como respuesta al aumento de la dosis de nitrógeno, mientras que no se ven diferencias significativas en las demás fracciones. En el caso de Red Magic no se observa un efecto claro de la aplicación de nitrógeno sobre este parámetro.

Figura 10

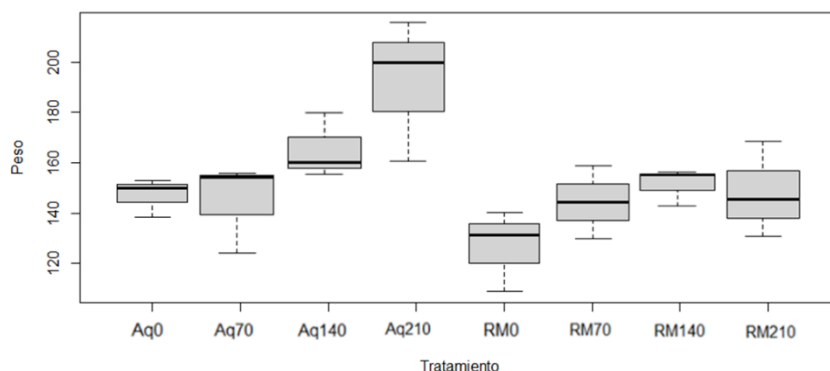
Distribución de los tubérculos según su peso por tratamiento



Se obtuvieron tubérculos con mayor peso promedio en Arequita que en Red Magic. El aumento en la dosis de nitrógeno provocó un incremento en el tamaño medio de los tubérculos en ambos cultivares, aunque el efecto es más marcado en el caso del cultivar nacional, llegando a valores promedios superiores a los 200 gramos con 210 kgN.ha⁻¹. La diferencia entre dosis de nitrógeno en Red Magic fue de menor magnitud y luego de los 140 kgN.ha⁻¹ no se aprecia un efecto sobre la variable (Figura 11).

Figura 11

Boxplot con tamaño promedio de tubérculos comerciales y su variación



Nota. Solamente se utilizaron los tubérculos con un peso mayor a 80 gramos.

4.5. Extracción de Nitrógeno con la Cosecha

La extracción de nitrógeno promedio por parte del cultivo fue de 2,5 kgN por tonelada de tubérculo cosechado (Tabla 11). Ninguno de los factores analizados en el experimento afectó este parámetro. Se observaron diferencias en la extracción total del nutriente por hectárea, pero debidas únicamente a los distintos rendimientos alcanzados por los tratamientos.

Tabla 11

Extracción de nitrógeno por tonelada de tubérculo y por hectárea

Cultivar	Dosis N (kg/ha)	Extracción N (kgN/Mg tubérculo)	Extracción N (kgN/ha)
Arequita	0	2,44 a	73,67 b
	70	1,82 a	67,24 b
	140	2,24 a	96,37 ab
	210	3,13 a	146,90 a
Red Magic	0	2,65 a	52,48 b
	70	2,13 a	63,65 b
	140	2,35 a	71,07 b
	210	3,20 a	87,71 ab

4.6. Indicadores de Eficiencia

El índice de cosecha se mantuvo estable para todos los tratamientos. En todos los casos estuvo por debajo de 0,50. No se registraron diferencias entre los cultivares ni se observó un efecto de la fertilización nitrogenada. La proporción del total de la materia seca cosechada como producto fue muy baja en relación a lo esperado para el cultivo, lo cual denota una gran ineficiencia (Tabla 12).

Para el índice de cosecha de nitrógeno (ICN) se observaron comportamientos diferenciales en función de la dosis de fertilización nitrogenada. En el caso de Arequita el ICN aumentó en la medida que se incrementó la fertilización, alcanzando un máximo con 210 kgN.ha⁻¹ y un mínimo en el tratamiento control. Para el otro cultivar, el máximo ICN se dio con 70 kgN.ha⁻¹ y luego se mantuvo con una variación mínima (Tabla 12).

Tabla 12*Índice de Cosecha (IC) e Índice de Cosecha de Nitrógeno (ICN) por tratamiento*

Genotipo	Dosis N (kg/ha)	IC	ICN
Arequita	0	0,479	0,391
	70	0,378	0,318
	140	0,456	0,426
	210	0,480	0,435
Red Magic	0	0,442	0,397
	70	0,462	0,443
	140	0,435	0,427
	210	0,459	0,418

Se encontró una variación notoria entre los distintos indicadores de eficiencia de la fertilización nitrogenada, determinada por la dosis de nitrógeno aplicada y por los cultivares (Tabla 13). La recuperación aparente fue, en promedio, un 62% mayor en Arequita que en Red Magic, registrando diferencias importantes en los tratamientos de mayor y menor aplicación de fertilizante. Sin embargo, para el caso intermedio, con un agregado de 140 kgN.ha⁻¹, Red Magic estuvo levemente por encima que Arequita.

La recuperación aparente del nutriente aumentó de forma conjunta con la fertilización; en el caso de Arequita, el tratamiento con 210 kgN.ha⁻¹ fue un 87% superior respecto a la dosis de 70 kgN.ha⁻¹. En Red Magic se registró un valor del indicador 100% mayor para la máxima fertilización respecto a la mínima (Tabla 13).

La eficiencia fisiológica del nutriente aplicado promedio disminuyó al aumentar la dosis de fertilización; se registraron diferencias en el comportamiento del indicador en función del cultivar. En el caso de Arequita, la máxima eficiencia se obtuvo en el tratamiento con 140 kgN.ha⁻¹ y solamente se aprecia una diferencia importante en el caso del tratamiento con 210 kgN.ha⁻¹ por ser inferior a los demás. En cambio, Red Magic presentó la máxima eficiencia fisiológica con la dosis más baja de fertilización, 70 kgN.ha⁻¹. Con aplicaciones más altas este parámetro disminuyó notablemente (Tabla 13).

La eficiencia de utilización interna fue el indicador con menos variación entre los analizados. No se registraron diferencias de cuantía entre cultivares,

solamente difieren para el tratamiento con la dosis de 70 kgN.ha⁻¹, siendo Red Magic ligeramente superior a Arequita. El efecto de la dosis de nitrógeno es más tenue, no se observan diferencias claras entre las dosis de 70 y la de 140 kgN.ha⁻¹, sin embargo, se ve una disminución en la eficiencia con la dosis de 210 kgN.ha⁻¹ (Tabla 13).

La eficiencia agronómica estuvo fuertemente afectada por la dosis de nitrógeno; este parámetro disminuyó en la medida en que se realizaron aplicaciones de mayor magnitud. La máxima eficiencia, para ambas variedades, se obtuvo con 70 kgN.ha⁻¹, el tratamiento con la fertilización más baja. En el caso de Red Magic, se ve una mayor eficiencia agronómica con menor fertilización que en el caso de Arequita, apreciándose también una disminución más pronunciada al aumentar la dosis en este cultivar (Tabla 13).

La productividad parcial del factor disminuyó al aumentar la fertilización nitrogenada en ambos cultivares. En el caso de Arequita se obtiene siempre una mayor productividad parcial que en Red Magic para todas las dosis de fertilizante; para este cultivar el parámetro se redujo un 141% en el tratamiento con 210 kgN.ha⁻¹ respecto al de 70 kgN.ha⁻¹. Para la segunda variedad la diferencia entre las dosis contrastantes es de un 226% (Tabla 13).

Tabla 13*Indicadores de eficiencia de la fertilización por tratamiento*

Indicador	Dosis N (kg/ha)	Arequita	Red Magic
RA (kg de aumento absorción N por kg/N aplicado)	70	0,38	0,18
	140	0,27	0,29
	210	0,71	0,38
EF (kg de aumento rend/ kg aumento absorción N apl.)	70	277,91	795,25
	140	337,75	282,95
	210	112,02	98,92
EUI (kg rend/ kg absorción N)	70	174,51	207,48
	140	189,90	181,72
	210	139,03	130,66
EA (aumento rend/ kg N aplicado)	70	105,03	144,94
	140	92,47	82,66
	210	79,45	37,35
PPF (kg producto cosechado/ kg N aplicado)	70	540,92	424,26
	140	310,42	222,32
	210	224,75	130,46

Nota. RA= Recuperación aparente; EF= Eficiencia fisiológica; EUI= Eficiencia de utilización interna; EA= Eficiencia agronómica; PPF= Productividad parcial del factor.

Tanto el rendimiento total del cultivo como la materia seca de tubérculos a cosecha respondieron al agregado de nitrógeno como fertilizante (Figura 12). En el caso del rendimiento se observa un primer tramo de la gráfica en que la respuesta es prácticamente lineal. Posterior a esto, se denota una clara diferencia entre los cultivares; Arequita continúa con un crecimiento lineal hasta agregados entre 100 y 150 kgN.ha⁻¹, para luego pasar a presentar incrementos decrecientes hasta los 210 kgN.ha⁻¹ aplicados como fertilizante.

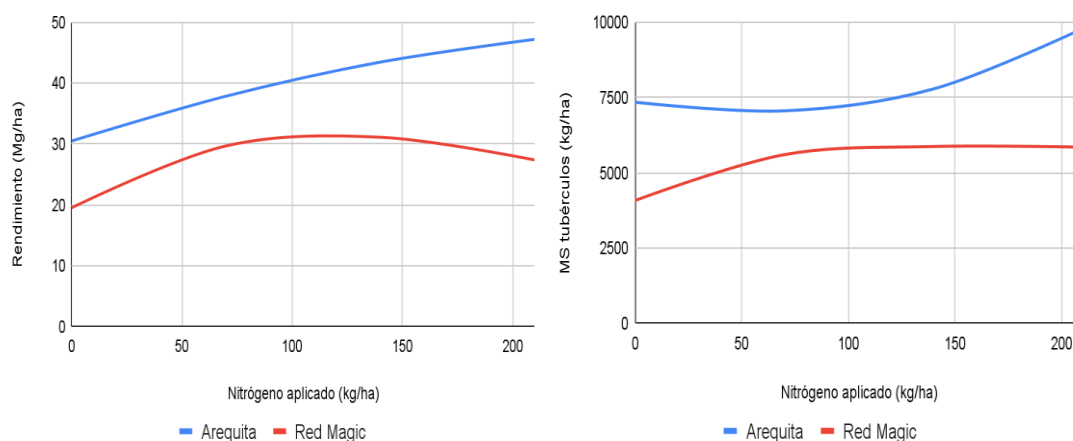
Red Magic presenta, luego del incremento lineal, una etapa de incrementos decrecientes y un rendimiento máximo alrededor de los 100 kg.ha⁻¹ de agregado de nitrógeno como fertilizante. Pasada esta dosis presenta una caída en el rendimiento total. El comportamiento de este cultivar respecto a la materia seca de los tubérculos es muy similar, con la diferencia de que no

presenta una caída, sino que después del máximo se mantiene de forma asintótica.

La respuesta en materia seca total en tubérculos al agregado de nitrógeno en Arequita difiere de las demás situaciones. Al inicio presenta un leve decremento para, luego de los 80 kgN.ha⁻¹, mostrar un crecimiento sostenido hasta la dosis máxima de nitrógeno, 210 kgN.ha⁻¹.

Figura 12

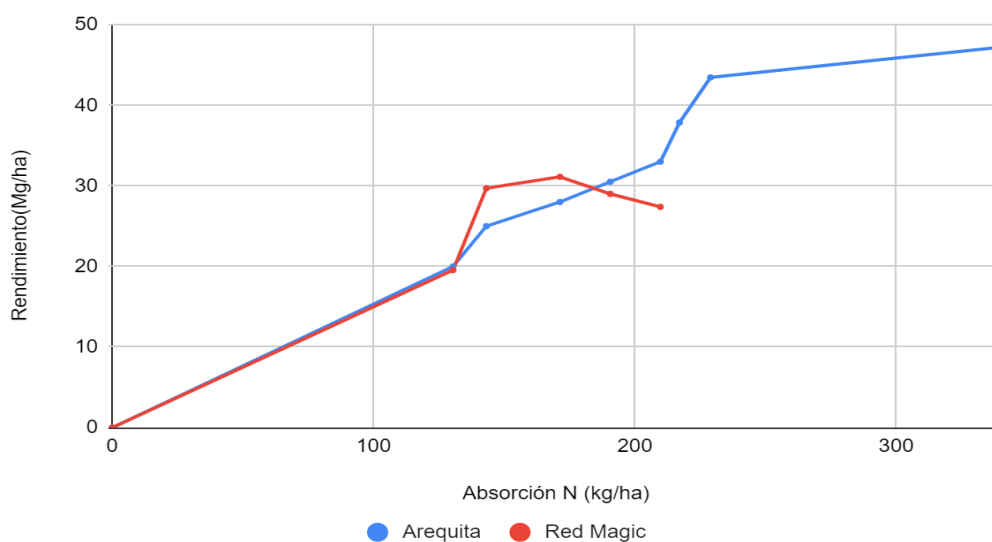
Rendimiento y materia seca de tubérculos en función del nitrógeno aplicado como fertilizante por cultivar



El rendimiento total se incrementa en la medida en la que aumenta la absorción de nitrógeno en ambos cultivares (Figura 13). Al inicio la relación entre las variables es lineal; pasados los 140 kgN.ha⁻¹ hay un leve salto en el rendimiento y luego una estabilización. Posterior a este punto se aprecian claras diferencias entre los cultivares. Red Magic no aumenta el rendimiento luego de los 150 kgN.ha⁻¹ y no se registran absorciones superiores a los 207 kgN.ha⁻¹. Arequita continúa con una respuesta importante hasta una absorción de 220 kgN.ha⁻¹, luego de la cual el rendimiento sigue aumentando, pero a una tasa más baja hasta los 340 kgN.ha⁻¹.

Figura 13

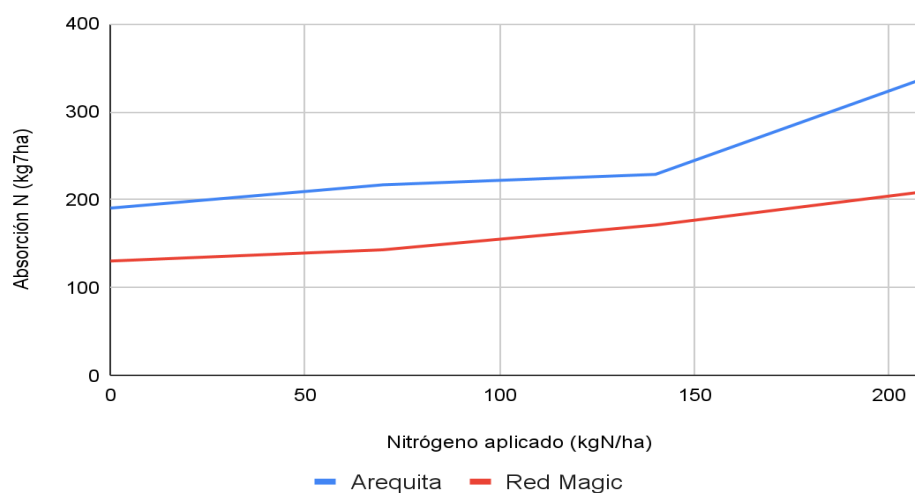
Rendimiento total en función del nitrógeno absorbido



La absorción de nitrógeno aumentó con la fertilización nitrogenada (Figura 14). Arequita estuvo por encima de Red Magic durante todo el ciclo. Se registraron comportamientos similares en ambos cultivares; se observa un aumento poco pronunciado en la absorción hasta un aporte de 150 kgN.ha^{-1} , luego de este punto se aprecia un incremento en la absorción en Arequita, mientras que Red Magic continúa aumentando con una tasa similar a la anterior.

Figura 14

Absorción de nitrógeno en función del nitrógeno aplicado como fertilizante en ambos cultivares



5. Discusión

5.1. Efecto del Genotipo y el Nitrógeno Sobre el Crecimiento y Desarrollo del Cultivo

Las diferencias entre los cultivares en el momento de la brotación pueden estar dada por factores varietales, asociados a la dormición de los tubérculos (Hu et al., 2023; Mouzo et al., 2022). De igual forma que en estudios previos realizados por Gül y Sefaoğlu (2022) y Oliveira et al. (2017), el número de tallos por planta respondió únicamente a factores genéticos, asociados con el grado de dominancia apical y el largo del periodo de dormición de los tubérculos para cada cultivar.

El área foliar del cultivo depende del grado de ramificación. Al igual que lo reportado por Biemond et al. (1995) y Ospina et al. (2014), la mayor disponibilidad de nitrógeno estimuló la brotación de yemas axilares y la formación de ramas en ambos cultivares. A pesar de esto, coincidiendo con Shetty et al. (2023) y Tantawy et al. (2021), se observó un efecto genético sobre este parámetro, presentando Red Magic una mayor ramificación.

Se observan mayores IAF en Arequita con dosis altas de nitrógeno. El efecto varietal es aún más marcado en el tratamiento control; al agregar nitrógeno como fertilizante se reducen las diferencias entre los cultivares. La mayor respuesta de Red Magic frente al agregado inicial de nitrógeno podría reflejar que el contenido del suelo era insuficiente para el normal desarrollo de este cultivar. Gilletto et al. (2011) encontraron necesidades de nitrógeno superiores a los 200 kg por hectárea para lograr un óptimo desarrollo en cultivares de papa de orígenes similares a Red Magic.

El momento de inicio de la tuberización solamente fue afectado por los cultivares. A pesar de que el proceso puede ser retrasado o incluso inhibido por altas dosis de nitrógeno (Alonso, 1996; Krauss, 1985; Vecchio et al., 2004), el crecimiento inicial de los tubérculos no se vio afectado por la fertilización nitrogenada.

5.1.1. Ciclo del Cultivo

El largo del ciclo de crecimiento de una variedad de papa está determinado por características genéticas y por las condiciones ambientales

(Alonso, 1996; Horton, 1987; Montaldo, 1984). Arequita presentó un desarrollo más rápido que Red Magic, comenzó antes la tuberización y alcanzó más tempranamente su pico de área foliar. Esta mayor precocidad en su ciclo seguramente responde a los objetivos principales de su selección y a su adaptación a las condiciones de Uruguay (González & Giménez, 2017).

En el experimento se registró un leve alargamiento en el periodo de crecimiento de hojas, dado por el aporte incremental de nitrógeno. Esto coincide con lo reportado por Biemond et al. (1995), Kooman (1995) y Ospina et al. (2014). Este efecto fue más marcado en Red Magic. Los máximos valores de IAF fueron alcanzados en torno a los 70 días. Alrededor de este momento, ambos cultivares logran sus máximas tasas de crecimiento.

El área foliar en Red Magic crece hasta etapas avanzadas de la estación de crecimiento potencial en nuestras condiciones, lo que, según lo reportado por Kooman (1995), disminuye la partición de asimilados hacia los tubérculos. Al final del ciclo todos los tratamientos presentaron un valor cercano al 45%. A diferencia de lo reportado por Mazetti et al. (2010), no se observó variación entre los materiales genéticos. La fertilización nitrogenada tampoco influyó sobre este parámetro, resultado similar al encontrado por Biemond y Vos (1992).

Esto sugiere que existen otros factores, además del efecto de los cultivares y el nitrógeno, determinando la proporción de materia seca acumulada en los tubérculos y, por lo tanto, el índice de cosecha. Algunos autores han reportado la influencia de parámetros como la edad fisiológica del tubérculo semilla (Alonso, 1996; Ellissèche, 1999) y la densidad de tallos del cultivo (Liu et al., 2020).

Las diferencias en el crecimiento entre cultivares se redujeron considerablemente hacia el final del ciclo. Esto puede estar debido a que, mientras el follaje de Arequita estaba decayendo, por encontrarse en la fase final del ciclo, Red Magic se encontraba aun con un gran desarrollo de su área foliar.

Arequita muestra una producción precoz, con tasas de crecimiento elevadas al inicio de su ciclo y alcanza un importante desarrollo de su área foliar de forma temprana. Aun así, en ambos materiales el resultado productivo estuvo fuertemente condicionado por el largo de la estación de crecimiento. Debido al acotado periodo con condiciones adecuadas para el cultivo en nuestro país, los

ciclos tardíos y semitardíos podrían ver limitada su capacidad de traducir la mayor área foliar alcanzada en rendimiento.

5.2. Absorción de Nitrógeno

El suelo sobre el que se realizó el ensayo fue un Vertisol con un alto contenido de materia orgánica y un muy buen estado de conservación. El aporte teórico estimado del mismo es de 51 kg de nitrógeno por hectárea, lo que, según Ciampitti y García (2007), representa alrededor de un 25% de la absorción total estimada del cultivo para un rendimiento de 40 toneladas por hectárea.

Al final del ciclo, la absorción total máxima alcanzada por el tratamiento control en Arequita fue de más de 190 kgN.ha⁻¹, aporte superior a lo reportado por Baethgen (1996) y por Berriel y Perdomo (2023) para suelos del litoral y del sur de Uruguay respectivamente. El monto total proporcionado por el suelo estuvo muy por encima del valor esperado en base a los supuestos de mineralización considerados para el cálculo.

Esta enorme diferencia entre el aporte esperado y el real puede deberse a las condiciones climáticas particulares en las que se enmarca el experimento. Los meses anteriores a la instalación del ensayo presentaron en el suelo un balance hídrico negativo, mientras que durante el periodo del cultivo en el campo se registró un único evento de precipitación importante (Figura 3). Este déficit mantenido en el tiempo puede haber favorecido una concentración de los nitratos en las capas superiores del perfil. Además de esto, puede existir un aporte de nitrógeno desde capas intermedias del suelo que no fueron consideradas en el análisis (Monsalve et al., 2017; Rabuffetti, 2017).

En experimentos a campo, Bartholomew (1971), como se cita en Mengel y Kirkby (2000), encontró que la recuperación de fertilizantes presentó una fuerte correlación negativa con la cantidad total de precipitaciones durante el experimento. En períodos secos, el nitrato se acumula en las capas superiores del suelo, sin embargo, su disponibilidad disminuye considerablemente en suelos con baja humedad. En el caso del experimento el cultivo estuvo bajo riego durante todo el ciclo, por lo que, potencialmente, fue capaz de utilizar el nitrógeno disponible.

Además de esto, es necesario considerar los factores que afectan a la mineralización, entre los que se destacan la textura del suelo y las condiciones

climáticas. El suelo en el que se realizó el ensayo se caracteriza por ser de textura muy pesada; el alto contenido de arcillas favorece la retención de humedad, lo que puede haber promovido la mineralización. A esto se le debe sumar el efecto promotor sobre la actividad biológica dado por las altas temperaturas registradas durante el periodo del cultivo en el campo (Figura 3) (Cabrera, 2007; Delin & Lindén, 2002; Monsalve et al., 2017).

El importante aporte dado por el suelo llevó a que, en todos los casos, la absorción total fuera muy superior al nitrógeno aportado. En las condiciones del ensayo, Arequita absorbió más del doble del nitrógeno que se aplicó como fertilizante; Red Magic fue capaz de absorber 1/3 del monto total desde el suelo. Estos resultados coinciden con lo reportado por Trehan (2009) para otros cultivos.

La alta absorción del tratamiento sin agregado de nitrógeno podría sugerir que, bajo condiciones nutricionales limitantes, las plantas fueron capaces de mejorar la exploración del suelo. El hecho de que el tratamiento control en Arequita haya absorbido un total de nitrógeno similar a la máxima absorción lograda por Red Magic, en conjunto con la mayor concentración del nutriente que alcanza en los tratamientos sin fertilización, sugiere una mayor capacidad de absorción del nutriente desde el suelo, posiblemente asociada a una mayor masa radicular.

No se observaron diferencias en ninguno de los tratamientos en cuanto a la concentración de nitrógeno en tubérculos y en el resto de la planta al final del ciclo. Seguramente la finalización del cultivo, determinada por las muy altas temperaturas registradas a fines de diciembre y los primeros días de enero, con una temperatura promedio diaria superior a 23°C y máximas encima de los 37°C (Figura 3), provocó que no se pudiera completar la removilización de los componentes celulares de los demás órganos de la planta hacia los tubérculos.

Un aspecto a destacar es que, si bien la disponibilidad de nitrógeno en todos los casos fue muy alta por el importante aporte desde el suelo, las plantas fueron capaces de responder al agregado del nutriente como fertilizante hasta dosis elevadas. A su vez, los cultivos respondieron de forma diferencial, presentando Arequita un mejor resultado productivo como respuesta al incremento del nutriente.

5.3. Rendimiento

Los rendimientos estuvieron determinados por el cultivar y la fertilización nitrogenada. El efecto del nitrógeno varía en función del material genético. Se registraron rendimientos promedio cercanos a las 40 toneladas por hectárea en Arequita, muy por encima del promedio para el cultivo según la encuesta de papa de otoño 2023 (DIEA, 2023). Red Magic estuvo por encima de las 25 toneladas, valores ligeramente superiores al promedio para los ciclos primaverales en el país.

Al igual que lo reportado por Nouri et al. (2023), se observaron diferencias entre tratamientos con aportes moderados de nitrógeno y controles sin aplicación del nutriente. Con la máxima dosis de fertilización nitrogenada Arequita fue capaz de superar las 47 toneladas por hectárea, valor muy por encima de los registrados en los demás tratamientos.

Red Magic tardó más tiempo que Arequita para iniciar la tuberización, lo que limita el tiempo para el crecimiento de tubérculos, uno de los principales determinantes del rendimiento final (Alonso, 1996; Huarte & Capezio, 2013). Según Ospina et al. (2014), los tubérculos pueden ser beneficiados por el aumento de la biomasa aérea debida a mayores aportes de nitrógeno. El nutriente tiene un impacto decisivo en el número de hojas emergidas y la tasa de expansión foliar; Koch et al. (2019) proponen que esto resulta en una mejora en la eficiencia fotosintética y en la intercepción de radiación.

La respuesta a la aplicación de nitrógeno varió dependiendo del cultivar y la dosis de fertilización. Arequita aumentó su rendimiento linealmente con el incremento del aporte, demostrando que, en las condiciones del experimento, fue capaz de absorber y utilizar nitrógeno hasta dosis muy altas de fertilización. Sin embargo, Red Magic presentó un rendimiento máximo con dosis medias de fertilización nitrogenada; con dosis muy altas la producción decayó.

Esta caída puede deberse a que el cultivo se terminó a los 105 días, siendo un ciclo considerablemente más corto que el potencial para estos tratamientos. Luego de la dosis de 140 kgN.ha^{-1} no se observó respuesta en ninguna de las variables de crecimiento evaluadas, lo que sugiere que el óptimo para Red Magic se encuentra entre 70 y 140 kgN.ha^{-1} .

En Arequita el incremento en el rendimiento comercial estuvo explicado principalmente por el aumento del peso de los tubérculos y, por lo tanto, de su tamaño. Estos resultados coinciden con lo reportado por Nouri et al. (2023), quienes encontraron un efecto del cultivar y la fertilización nitrogenada sobre este parámetro.

A pesar del calibre excesivo, es viable la comercialización en Uruguay, puesto que no existen estándares específicos de calidad que impidan su venta (Observatorio Granjero, 2022). Aun así, es de esperar que el precio de los mismos sea muy inferior al de los calibres de tubérculos medios, principalmente en épocas con buena disponibilidad de papa en el mercado.

Un posible ajuste en el manejo para disminuir el calibre de los tubérculos de Arequita, en suelos con alta fertilidad, podría ser aumentar la densidad de tallos del cultivo. Según Rodríguez et al. (2004) y Méndez (2009), el número de tallos se correlaciona de manera positiva con el número de tubérculos, en detrimento del tamaño individual de los mismos. Aspectos de manejo tendientes a esto podrían aumentar el número de fosas en la planta, generando una mayor competencia que resulte en una mejora, tanto del rendimiento total como de la calidad comercial del producto.

Independientemente del rendimiento obtenido, en todos los casos el índice de cosecha logrado estuvo alrededor de 0,45, por debajo de lo reportado por Seminario et al. (2017) y Suja et al. (2021) para ciclos de más de 120 días en Perú e India respectivamente, y semejantes a lo encontrado, para cultivares con baja eficiencia, por Mora et al. (2006) en ciclos de 85 días en México. En estos estudios, los valores promedio del indicador para cultivares con alta eficiencia estuvieron entre 0,75 y 0,85. En concordancia con los resultados de Alva et al. (2002), no se observó un efecto del nitrógeno sobre el IC.

Este bajo IC demuestra una muy baja eficiencia, puesto que el alto nivel de biomasa producida por el cultivo no se tradujo en rendimiento al final del ciclo. Cantos de Ruíz et al. (1989) proponen que el bajo número de tubérculos formados en la planta, determinado por factores que inciden sobre el ciclo del cultivo, provocan un descenso en la fuerza de fosa y disminuyen la acumulación de materia seca.

Las plantas, al haber sido instaladas tarde y con semilla fisiológicamente joven, requieren un ciclo de mayor duración, el cual se truncó a los 105 días, lo

que no permitió la etapa final de acumulación de materia seca en los tubérculos y la removilización desde otras partes de la planta.

En el experimento se observó un aumento en la extracción de nitrógeno con la cosecha al aumentar la dosis de fertilización nitrogenada. A pesar de esto, el ICN no mostró el mismo comportamiento en el caso de Red Magic. En este cultivar se observó el máximo ICN con la dosis más baja de fertilización, posterior a la cual, si bien la planta absorbió más nitrógeno, se redujo la proporción del mismo particionada hacia los tubérculos. El nutriente se acumuló en hojas y tallos; la planta desarrolló más su follaje, pero luego el periodo de crecimiento no fue lo suficientemente largo como para que se diera una removilización del nutriente hacia los tubérculos.

5.4. Eficiencia de la Fertilización

Los riesgos medioambientales asociados al movimiento del nitrógeno fuera del sistema productivo han llevado al desarrollo, a través del mejoramiento genético, de materiales con capacidad de utilizar el nutriente de forma más eficiente (Ospina, 2016; Rabuffetti, 2017). El mejoramiento en la eficiencia de uso de los nutrientes permite aumentar la productividad al mismo tiempo que disminuye los riesgos de pérdidas (Hailu et al., 2017).

Distintas especies y variedades de plantas difieren en cuanto a su habilidad de crecer en suelos con restricciones nutricionales. El uso de cultivares eficientes en el aprovechamiento de nutrientes, en conjunto con prácticas agronómicas adecuadas, es de importancia para lograr una óptima producción (Trehan, 2009).

Las diferencias en la eficiencia en el uso de nutrientes por parte de los vegetales, están explicadas principalmente por dos mecanismos. En primer lugar, puede existir variación en la eficiencia metabólica con la que es utilizado. El segundo mecanismo está asociado a una mayor eficiencia en la absorción del nutriente desde el suelo, esta última relacionada a las características del sistema radicular (García Lamothe, 2014; Trehan, 2009).

Al igual que lo reportado por Hailu et al. (2017) y Nouri et al. (2023), la eficiencia de utilización interna no se modificó de forma importante con ninguno de los factores analizados. Trehan (2009) encontró que las mayores diferencias en la eficiencia de uso del nitrógeno han sido explicadas por una mayor tasa de

absorción del nutriente desde el suelo. Tanto cuando la cantidad de nitrógeno disponible en el suelo es más baja como cuando es muy alta, Arequita demostró una mayor capacidad de absorberlo.

Solamente el cultivar nacional fue capaz de responder en generación de biomasa con muy altas aplicaciones de fertilizante en las condiciones del experimento; Red Magic no pudo absorber altas dosis de fertilizante en un ciclo primaveral del cultivo, sobre un suelo pesado con muy alta fertilidad, e incluso disminuye su rendimiento con dosis muy altas. Esto puede, en situaciones con excesos de fertilización, volver al nutriente más susceptible a pérdidas.

Las eficiencias fisiológica y agronómica se redujeron en la medida que se aumentó la dosis, resultado similar al encontrado por Ierna y Mauromicale (2019). Red Magic presenta la mayor eficiencia con la dosis más baja de fertilización, esto seguramente porque el contenido inicial en el suelo era insuficiente para el normal desarrollo en este cultivar, lo que lleva a que con el agregado de 70 kgN.ha^{-1} , el aumento en rendimiento sea muy importante. Luego de esta dosis la planta ya no es capaz de seguir utilizando el nitrógeno extra, por lo que la eficiencia de conversión disminuye considerablemente.

La eficiencia con la que las plantas utilizaron cada unidad adicional de nutriente con dosis bajas de fertilización fue notoriamente mayor en Red Magic, posiblemente porque el contenido en el suelo ya era suficiente para una buena producción en Arequita.

En síntesis, los resultados sugieren que Arequita tiene una capacidad muy alta de traducir la absorción de nitrógeno en rendimiento, en un amplio rango de condiciones de fertilización, aunque aportes muy elevados pueden afectar la calidad comercial del producto cosechado. En cambio, en Red Magic el control del nutriente debe ser mucho más ajustado debido a que presenta una menor capacidad de absorber el nutriente desde el suelo, pero, a su vez, no es capaz de utilizar el nitrógeno aportado por encima de dosis medias de fertilización.

6. Conclusiones

En este trabajo se comprobó que tanto el nitrógeno como los materiales genéticos afectan el desarrollo del cultivo. El impacto de la fertilización nitrogenada sobre el largo del ciclo varió en función del cultivar; mientras que en Arequita no se registraron diferencias entre las dosis, Red Magic fue afectada por los altos aportes, observándose un claro alargamiento de la fase de crecimiento del follaje, lo que provoca desajustes respecto al ciclo potencial del cultivo en las condiciones productivas de Uruguay.

La absorción de nitrógeno por parte de las plantas aumentó de forma conjunta con la fertilización. De igual forma, se observaron claras diferencias entre los cultivares. Arequita presentó mayor absorción en los tratamientos sin agregado de nitrógeno y con las dosis máximas del nutriente, lo que sugiere que es capaz de adaptarse a una amplia gama de condiciones nutricionales. Red Magic demostró una mayor dependencia del aporte de nitrógeno para expresar un buen comportamiento.

La respuesta en rendimiento al agregado de nitrógeno fue mayor en Arequita; este cultivar presentó una relación lineal con el aporte del nutriente. En Red Magic los máximos rendimientos se observaron con dosis medias. Las eficiencias con las que los cultivares convirtieron el nutriente en el producto se redujeron al aumentar las dosis. Arequita fue más eficiente en los tratamientos sin aporte de nitrógeno, lo que demuestra una mayor capacidad de absorción desde el suelo, probablemente, debido a una mayor masa radicular.

Si bien el manejo del nitrógeno en el experimento afectó el crecimiento, se comprobó que existen otras variables que están determinando una pérdida de eficiencia enorme, resultando en un muy bajo índice de cosecha. Gran parte del follaje que logra producir el cultivo no se traduce en rendimiento en tubérculos, por lo que es necesario identificar otros factores que están determinando este desajuste.

A la hora de planificar la fertilización, se debe tener en cuenta el contenido nutricional del suelo. En el experimento se comprobó que el aporte de nitrógeno por parte del mismo puede ser ampliamente superior a lo estimado en algunas condiciones, por lo que surge la necesidad de ajustar los coeficientes utilizados para su cálculo. De esta forma, se podrían evitar los riesgos ambientales asociados a posibles pérdidas del nutriente en el ambiente

Cabe recalcar que para el estudio se utilizó un solo ciclo primaveral del cultivo y se realizó sobre un suelo pesado, con una muy alta fertilidad natural, condiciones que limitan la extrapolación de los resultados a otras situaciones productivas. Además de esto, el ensayo se vio afectado por una condición climática atípica, caracterizada por un importante déficit hídrico y muy altas temperaturas, provocando cambios en la dinámica del nitrógeno en el suelo y en su absorción por parte de la planta.

Debido al gran número de factores involucrados en la determinación del comportamiento del cultivo, es necesario explorar el efecto del factor genético y la fertilización nitrogenada en diferentes condiciones, tanto en distintos suelos como en otras estaciones de crecimiento. En base a esta información, es posible ajustar de mejor manera el aporte de nitrógeno a los requerimientos del cultivo, logrando una producción más eficiente y evitando posibles pérdidas del nutriente en el ambiente.

7. Referencias Bibliográficas

- Aldabe, L., & Aldabe, R. (1976). *El cultivo de la papa en el Uruguay*. Diafi.
- Alonso, F. (1996). *El cultivo de la patata*. Mundi-Prensa.
- Alva, A. K., Hodges, T., Boydston, R. A., & Collins, H. P. (2002). Dry matter and nitrogen accumulations and partitioning in two potato cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 25(8), 1621-1630. <https://doi.org/10.1081/PLN-120006047>
- Baethgen, W. (1996). El nitrógeno en los sistemas agrícola ganaderos. En A. Morón, D. Martino, & J. Sawchik (Eds.), *Manejo y fertilidad de suelos* (pp. 9-22). INIA.
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8451/1/111219240807135249-Baethgen-p.9-22.pdf>
- Berriel, V., & Perdomo, C. (2023). Cajanuscajan: A promissory high-nitrogen fixing cover crop for Uruguay. *Frontiers in Agronomy*, 5, Artículo e1214811. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1214811>
- Bertsch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Biemond, H. (1995). Effects of nitrogen on development and growth of the leaves of vegetables: Appearance, expansion growth and life span of leaves of leek plants. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 43(2), 233-246. <https://doi.org/10.18174/njas.v43i2.579>
- Biemond, H., & Vos, J. (1992). Effects of Nitrogen on the Development and Growth of the Potato Plant: The Partitioning of Dry Matter, Nitrogen and Nitrate. *Annals of Botany*, 70(1), 37-45. <https://www.jstor.org/stable/42764457>
- Biemond, H., Vos, J., & Struik, P. C. (1995). Effects of nitrogen on accumulation and partitioning of dry matter and nitrogen of vegetables: Brussels sprouts. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 43(4), 419-433. <https://doi.org/10.18174/njas.v43i4.564>
- Bruulsema, T., Fixen, P., & Snyder, C. S. (2004). Fertilizer nutrient recovery in sustainable cropping systems. *Better Crops with Plant Food*, 88(4), 15-17. https://www.researchgate.net/publication/292753439_Fertilizer_nutrient_recovery_in_sustainable_cropping_systems

- Cabrera, M. (2007). Mineralización y nitrificación: Procesos claves en el ciclo del nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, (34), 1-9.
<http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/77FA8167A21708978525799500785679/%24FILE/Cabrera-IA34.pdf>
- Cantos de Ruíz, S., Mendiburu, A., & Andrade, F. (1989). Rendimiento potencial del cultivo de papa en Balcarce, causas que limitan la productividad real. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 2(1), 29-45.
<https://doi.org/10.37066/ralap.v2i1.20>
- Centro Internacional de la Papa. (2023, 29 de noviembre). *Datos y Cifras de la Papa*. <https://cipotato.org/es/potato/>
- Ciampitti, I., & García, F. (2007). Requerimientos nutricionales: Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios: I. Cereales, Oleaginosos e Industriales. *Informaciones Agronómicas*, 11, 13-16.
[http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/1C1039297E6D798603257967004A2A8C/\\$FILE/AA%2011.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/1C1039297E6D798603257967004A2A8C/$FILE/AA%2011.pdf)
- Delin, S., & Lindén, B. (2002). Relations Between Net Nitrogen Mineralization and Soil Characteristics Within an Arable Field. *Soil & Plant Science*, 52(2), 78-85. <https://doi.org/10.1080/090647102321089819>
- Dogliotti, S., Colnago, P., Galván, G., & Aldabe, L. (2011). *Bases Fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas: Tomate (Lycopersicum esculentum), Papa (Solanum tuberosum) y Cebolla (Allium cepa)*. Universidad de la República.
- Duguma, H., & Chewaka, M. (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>
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay* [Mapa]. MAP.
<http://bibliotecadigital.bibna.gub.uy:8080/jspui/handle/123456789/5486>
- Dwelle, R. (1990). Source/sink relationships during tuber growth. *American Potato Journal*, 67, 829-833. <https://doi.org/10.1007/BF03044295>

- Ellissèche, D. (1999). Aspectos fisiológicos del crecimiento y del desarrollo. En P. Rousselle, Y. Robert, & J. C. Crosnier (Eds.), *La Patata: Producción, Mejora, Plagas y Enfermedades, Utilización* (pp. 75-129). Mundi-Prensa.
- Ewing, E. (1985). Cuttings as simplified models of the potato plant. En H. P. Li (Ed.), *Potato Physiology* (pp. 153-207). Academic Press.
- Fabiani, L. (1967). *La patata*. Aedos.
- Fassana, N., Gambetta, G., Guimaraes, N., Mazzilli, S., & Dogliotti, S. (2022). *Producción limitada por nutrientes: Eficiencia de uso de los nutrientes, indicadores asociados, balance de nutrientes e impacto ambiental*. Universidad de la República.
- García Lamothe, A. (2014). Selección por eficiencia de uso de nitrógeno (N) y fósforo (P). En S. Germán, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional 1914-2014: Un Siglo de Mejoramiento de Trigo en la Estanzuela* (pp. 87-98). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12217/1/st-241-2018.p.87-98-Garcia-Lamothe.pdf>
- Gianquinto, G., Muñoz, P., Pardossi, A., Ramazzotti, S., & Savvas, D. (2013). Soil fertility and plant nutrition: Principles for Mediterranean climate areas. En Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; International Society for Horticultural Science; & National Center for Agricultural Research and Extension (Eds.), *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops* (pp. 205-270). <https://www.fao.org/3/i3284e/i3284e.pdf>
- Gillete, C., Rattín, J., Echeverría, H., & Caldiz, D. (2011). Requerimiento de nitrógeno para alcanzar máximo rendimiento y calidad en variedades industriales de papa. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 43(1), 85-95. <https://bdigital.uncu.edu.ar/3876>
- González, M., & Giménez, G. (2017). *Catálogo de Cultivares Hortícolas* (2ª ed.). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7053/1/bd-113-Catalogo-Horticola-2a.ed.2017.pdf>
- Government of Canada. (2023, 29 de noviembre). *Red Magic*. <https://inspection.canada.ca/english/plaveg/pbrpov/cropreport/pot/app00007216e.shtml>

- Gül, V., & Sefaoğlu, F. (2022). Determining the Yield and Yield Components of Some Local Potato Genotypes Grown in the North Eastern Anatolia Region. *Journal of Agricultural Production*, 3(2), 124-130.
<https://doi.org/10.56430/japro.1210278>
- Hailu, G., Nigussie, D., Ali, M., & Derbew, B. (2017). Nitrogen and Phosphorus Use Efficiency in Improved Potato (*Solanum tuberosum* L.) Cultivars in Southern Ethiopia. *American Journal of Potato Research*, 94, 617-631.
<https://doi.org/10.1007/s12230-017-9600-6>
- Horton, D. (1987). *Potatoes: Production, marketing and programs for developing countries*. Westview.
- Hu, Q., Tang, C., Zhou, X., Yang, X., Luo, Z., Wang, L., Yang, M., Li, D., & Li, L. (2023). Potatoes dormancy release and sprouting commencement: A review on current and future prospects. *Food Frontiers*, 4(3), 1001-1018.
<https://doi.org/10.1002/fft2.228>
- Huarte, M., & Capezio, S. (2013). Cultivo de papa. En M. Cauhépé & F. Gutheim (Coords.), *Agricultura y ganadería pampeanas* (pp. 172-202). EUDEM.
https://www.researchgate.net/publication/256195293_Cultivo_de_papa
- Ierna, A., & Mauromicale, G. (2019). Sustainable and Profitable Nitrogen Fertilization Management of Potato. *Agronomy*, 9(10), Artículo e582.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9100582>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2023, 10 de julio). *Banco datos agroclimático*. <http://inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Nacional de Semillas. (2018). *Jornada de papa: Resultados de la evaluación nacional de cultivares de papa*.
<https://v.calameo.com/?bkcode=00299318374f8bd5b6a40>
- Irisarri, P. (2009). *Emisiones de metano y óxido nitroso: Principales gases de efecto invernadero producidos por el sector agropecuario en Uruguay*. Universidad de la República.
- Isterra. (2023, 21 de diciembre). *Red Magic: Seedpotato - GERMICOPA*.
<https://isterra-seeds.com/en/red-magic-burgonya-vetogumo>

- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., & Thiel, H. (2019). The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Research*, 63, 97-119.
<https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Kooman, P. L. (1995). *Yielding ability of potato crops as influenced by temperature and daylength* [Disertación Doctoral]. Wageningen University.
- Kooman, P. L., Fahem, M., Tegera, P., & Haverkort, A. J. (1996). Effects of climate on different potato genotypes 1: Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*, 5(3-4), 193-205. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(96\)02031-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02031-X)
- Kooman, P. L., & Haverkort, A. J. (1995). Modeling Development and Growth of the Potato Crop Influenced by Temperature and Daylength. En A. J. Haverkort & D. K. MacKerron (Eds.), *Potato Ecology and Modeling of Crop under Conditions Limiting Growth* (pp. 41-59), Kluwer Academic Publishers. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-011-0051-9>
- Krauss, A. (1985). Interaction of nitrogen nutrition, phytohormones, and tuberization. En H. P. Li (Ed.), *Potato Physiology* (pp. 209-224). Academic Press.
- Liu, Y., Guo, X., Zhang, X., Ma, M., & Wang, H. (2020). Effects of planting density and fertilization on dry matter accumulation, yield and water-fertilizer utilization of dryland potato. *Acta Agronómica Sinica*, 47(2), 320-331.
<https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2021.04100>
- Lutaladio, N., Ortiz, O., Haverkort, A., & Caldiz, D. (2009). *Sustainable potato production: Guidelines for developing countries*. FAO.
<https://www.fao.org/3/i1127e/i1127e.pdf>
- Lynch, D. R., Kozub, G. C., Kawchuk, & L. M. (2001). The relationship between yield, mainstem number, and tuber number in five maincrop and two early-maturing cultivars. *American Journal of Potato Research*, 78, 83-90.
<https://doi.org/10.1007/BF02874763>

- Mazetti, A., Peres, R., Silva, B., & de Souza-Schlick, G. (2010). Crescimento, acúmulo e distribuição de matéria seca em cultivares de batata nasafrá de inverno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(8), 826-835.
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000800008>
- Méndez, P. (2009). Plantación de papa y efecto de tallos en la producción. *Boletín INIA*, (193), 77-101.
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/7275/NR36480.pdf?sequence#:~:text=Cuando%20aumenta%20la%20densi%2D%20dad,tu b%C3%A9rculos%20por%20unidad%20de%20%C3%A1rea>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de nutrición vegetal*. Kluwer Academic Publishers.
- Monsalve, O., Gutiérrez, J., & Cardona, W. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo: Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209.
<https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663>
- Montaldo, A. (1984). *Cultivo y mejoramiento de la papa*. IICA.
- Mora, R., Ortiz, J., Rivera, A., Mendoza, M. C., Colinas, M., & Lozoya, H. (2006). Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 85-94.
<https://www.redalyc.org/pdf/609/60912113.pdf>
- Mouzo, D., Rodríguez, R., Barrio, C., García, L., & Zapata, C. (2022). Comparative Proteomics of Potato Cultivars with a Variable Dormancy Period. *Molecules*, 27(19), Artículo e6621.
<https://doi.org/10.3390/molecules27196621>
- Nouri, M., Jahan, M., Khazaei, H. R., Nassiri-Mahallati, M., & Shojaei, K. (2023). Evaluation of the Effect of Nitrogen Consumption and Use Efficiency on Yield and Yield Components of Two Potato Cultivars under Quchan Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(2), 143-157.
https://jcesc.um.ac.ir/article_41399.html?lang=en
- Observatorio Granjero. (2022). *Frutas y Hortalizas en el Uruguay: Manual para la Calidad, Conservación y Comercialización*. MGAP.

- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2021). *Encuesta de Papa "Otoño 2021"*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2021-05/PublicacionPapaOto%C3%B1o2021_final.pdf
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Resultados de la Encuesta de Papa "Otoño 2023"*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/prensapapaoto%C3%B1o2023v02.pdf>
- Oliveira, J., Brown, H., Gash, A., & Moot, D.J. (2017). Yield and weight distribution of two potato cultivars grown from seed potatoes of different physiological ages. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 45(2), 91-118. <http://dx.doi.org/10.1080/01140671.2016.1256902>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023, 21 de diciembre). *FAOSTAT: Datos sobre alimentación y agricultura*. <https://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Ospina, A. (2016). *Nitrogen use efficiency in potato: An integrated agronomic, physiological and genetic approach* [Disertación doctoral]. Wageningen University.
- Ospina, C. A., Lammerts, E., Allefs, J., Engel, B., van der Putten, P., van der Lindén, C., & Struik, P.C. (2014). Diversity of crop development traits and nitrogen use efficiency among potato cultivars grown under contrasting nitrogen regimes. *Euphytica*, 199, 13-29. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1203-4>
- Peterson, L., Barker, G., & Howarth, M. (1985). Development and Structure of Tubers. En H. P. Li (Ed.), *Potato Physiology* (pp. 124-148). Academic Press.
- Price, C., & Munns, R. (2018). Growth analysis: A quantitative approach. En R. Munns, S. Schmidt, C. Beveridge, & U. Mathesius (Eds.), *Plants in Action*. Australian Society of Plant Scientists. <https://www.asps.org.au/wp-content/uploads/Chapter-6-growth-analysis-for-PDF.pdf>
- Rabuffetti, A. (2017). *La fertilidad de suelos y su manejo*. Hemisferio Sur.

- Rodríguez, L., Corchuelo, G., & Ñustes, C. (2004). Densidad de población y su efecto sobre el rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L. cv. *Parda pastusa*). *Agronomía Colombiana*, 22(1), 23-31.
<https://www.redalyc.org/pdf/1803/180317823004.pdf>
- Seminario, J., Seminario, A., Domínguez, A., & Escalante, B. (2017). Rendimiento de cosecha de diecisiete cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) del grupo Phureja. *Scientia Agropecuaria*, 8(3), 181-191.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.03.01>
- Shetty, S., Krishnaprasad, B. T., Amarananjundeswara, H., & Shyamamma, S. (2023). Genetic Variability Studies in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Genotypes for Growth, Yield and Processing Quality Traits. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, 57(1), 344-350.
<https://rawe2020.in/2023/07/24/mysore-journal-of-agricultural-sciences-vol-57-no-2/>
- Sifuentes, E., Ojeda, W., Mendoza, C., Macías, J., Ruelas, J., & Inzunza, M. (2013). Nutrición del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) considerando variabilidad climática en el “Valle del Fuerte” Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(4), 585-597.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263127562008>
- Suja, G., Sreekumar, J., Byju, G., Veena, S., Sunitha, S.A., Ramesh, V., Lintu, C., & Raj, K. (2021). Organic management of Chinese potato: growth, yield, quality, soil health, and economics. *International Journal of Vegetable Science*, 27(6), 585-603.
<https://doi.org/10.1080/19315260.2021.1907829>
- Tantawy, I., Abd El Rasheed, K., EL-Korde, S., & Hassan, H. (2021). Response of Potato Cultivars to Different Potassium Sources. *Journal of Plant Production*, 12(6), 657-664. <https://dx.doi.org/10.21608/jpp.2021.182702>
- Trehan, S. P. (2009). Improving nutrient use efficiency by exploiting genetic diversity of potato. En A. Rakshit, H. Bahadur, & A. Sen, *Nutrient Use Efficiency: From Basics to Advances* (pp. 209-220). Springer.
http://dx.doi.org/10.1007/978-81-322-2169-2_14

- Van Ittersum, M. K., & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input–output combinations. *Field Crops*, 52(3), 197-208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Vecchio, V., Ghiselli, L., Andrenelli, L., & Benedettelli, S. (2004). Effect of nitrogen interruption on in vitro tuberization and potato microtuber storage. *Advances in Horticultural Science*, 18(2), 63-67. https://www.researchgate.net/publication/288600120_Effect_of_nitrogen_interruption_on_in_vitro_tuberization_and_potato_microtuber_storage
- Zabaleta, B., Aubriot, L., Olano, H., & Achkar, M. (2023). Satellite assessment of eutrophication hot spots and algal blooms in small and medium-sized productive reservoirs in Uruguay's main drinking water basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43604-43618. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25334-9>