



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Respuesta de la variedad Criolla
Colombia (Grupo Phureja) a
diferentes dosis de fertilizante NPK
recubierto con hidrogel a base de
carragenina**

**Response of Criolla Colombia variety
(Phureja Group) to different doses of
NPK coated with carrageenan based
hydrogel**

Nicolás Puentes Montealegre

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá, Colombia
2020

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

Response of Criolla Colombia variety (Phureja Group) to different doses of NPK coated with carrageenan based hydrogel

Nicolás Puentes Montealegre

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias Agrarias

Director:

Dr. Carlos Eduardo Núñez López
Universidad Nacional de Colombia

Codirectora:

Dra. Johanna Santamaría Vanegas
Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano

Línea de Investigación:

Fisiología de Cultivos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias
Bogotá, Colombia

2020

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por COLCIENCIAS dentro del proyecto "*Estrategias de optimización en el uso de fertilizantes para el aumento de la productividad y la disminución del impacto ambiental*" de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano en convenio con la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá.

Resumen

Esta investigación se desarrolló con el objetivo de evaluar la respuesta de variables fisiológicas y el rendimiento de tubérculo en la variedad Criolla Colombia, al igual que los lixiviados de NH_4^+ y K^+ en suelo, por el efecto del uso de un fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina. Se establecieron dos experimentos en el municipio de Sibaté, Cundinamarca, en un diseño experimental de bloques completos al azar con arreglo factorial 2×2 ; el primer factor consistió en la dosis de fertilizante NPK (15-15-15) granulado (15 y 25 g/planta) y el segundo factor la presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel a base de carragenina, la unidad experimental consistió en parcelas de 15 m². En el primer experimento se realizaron muestreos destructivos cada dos semanas con el fin de determinar área foliar (AF) y masa seca (MS) de los diferentes tejidos, para la evaluación del crecimiento. A la cosecha se determinó el rendimiento de tubérculo, la gravedad específica y el índice de cosecha. En el segundo experimento se estableció un diseño experimental similar bajo los mismos tratamientos, en el cual se colectaron los lixiviados en suelo a partir de los 7 días después de siembra (dds), cada 7 días hasta los 42 dds y un último a los 56 dds utilizando lisímetros de succión, y se realizó en cada muestra el análisis de NH_4^+ y K^+ en laboratorio. El factor dosis de fertilizante no afectó el contenido relativo de clorofila, la acumulación y distribución de masa seca, el factor Hidrogel modificó la acumulación de masa seca en hojas, tallos, tubérculos y total al inicio y al final del ciclo de cultivo. Sin recubrimiento la respuesta fue superior. No se presentaron cambios en el rendimiento y gravedad específica de los tubérculos de papa variedad Criolla Colombia. En el segundo experimento la lixiviación de NH_4^+ , cuando se usó el recubrimiento de hidrogel, a los 7 dds con una dosis de 25 g/planta se redujo en 0,247 mg L⁻¹ frente al fertilizante sin hidrogel, y en 1,36 mg L⁻¹ con la dosis de 15 g/planta de NPK sin diferencias significativas para la variable. El potasio (K^+) lixiviado tampoco presentó diferencias. El estudio evidencia el potencial que tiene el uso del hidrogel a base de carragenina, su utilización no generó cambios significativos en variables fisiológicas del cultivo de papa criolla y no afecta su productividad.

Palabras clave: Papa diploide, índices de crecimiento, lixiviación, rendimiento, nitrógeno amoniacal, potasio.

Abstract

This research was carried out to evaluate the effect of a carrageenan-based hydrogel used as a coating of an NPK fertilizer in different doses, on physiological variables, yield in the Criolla Colombia variety (Phureja Group) and the evaluation of leachates from NH_4^+ and K^+ . Destructive sampling was carried out every two weeks in one location in order to determine leaf area (AF) and dry mass (DM) of the different tissues, for the evaluation of growth. At harvest, yield, specific gravity and crop index were determined. The fertilizer dose factor did not affect the relative chlorophyll content, the accumulation and distribution of dry mass, the Hydrogel factor modified the accumulation of dry mass in leaves, stems, tubers and total at the beginning and at the end of the crop cycle. Without coating hydrogel, the response was higher. There were no changes in yield and specific gravity of potato tubers variety Criolla Colombia. In a second location, soil leachate from both NH_4^+ and K^+ showed no significant differences, however, at 7 days after sowing (das) the leaching of NH_4^+ with a dose of 25 g/plant was reduced in 0.247 mg L^{-1} compared to the fertilizer without hydrogel, and a reduction of 1.36 mg L^{-1} with the dose of 15 g/plant of NPK without significant differences for the variable. On the other hand, no differences presented in the amount of potassium (K^+) leached. The study shows the potential of the carrageenan-based hydrogel, its use does not lead to significant changes in the crop physiology and therefore does not affect productivity.

Keywords: Diploid potato, plant growth index, leaching, yield, ammonium nitrate, potassium.

Contenido

Pág.

Resumen	vii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas	1
Introducción	2
1. Marco teórico.....	5
1.1 Nutrición mineral en plantas.....	5
1.2 Fertilizantes recubiertos en la agricultura.....	7
Bibliografía	10
2. Crecimiento y desarrollo de la variedad Criolla Colombia fertilizada con NPK con y sin recubrimiento de hidrogel	13
2.1 Resumen	13
2.2 Introducción	13
2.3 Materiales y métodos.....	15
2.3.1 Localización	15
2.3.2 Contenido relativo de clorofila	17
2.3.3 Análisis de crecimiento.....	17
2.3.4 Análisis estadístico.....	18
2.4 Resultados y discusión	18
2.4.1 Contenido relativo de clorofila	18
2.4.2 Área foliar.....	20
2.4.3 Acumulación de masa seca por órgano y total	22
2.4.4 Índices de crecimiento.....	32
2.5 Conclusiones	40
Bibliografía	41
3. Rendimiento de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) fertilizada con NPK con y sin recubrimiento de hidrogel.....	44
3.1 Resumen	44
3.2 Introducción	44
3.3 Materiales y métodos.....	46
3.3.1 Localización	46
3.3.2 Análisis de rendimiento	47
3.3.3 Índice de cosecha	47
3.3.4 Gravedad específica	47
3.3.5 Análisis estadístico.....	48

3.4	Resultados y discusión	48
3.4.1	Rendimiento de tubérculo	48
3.4.2	Índice de cosecha	51
3.4.3	Gravedad específica de tubérculos	53
3.5	Conclusiones	54
	Bibliografía	56
4.	Lixiviados de N y K en suelo cultivado con papa variedad Criolla Colombia y fertilizado con NPK, con y sin recubrimiento	58
4.1	Resumen	58
4.2	Introducción	58
4.3	Materiales y métodos.....	60
4.3.1	Localización	60
4.3.2	Análisis de lixiviados	61
4.3.3	Análisis estadístico.....	62
4.4	Resultados y discusión	62
4.4.1	Lixiviado de nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺)	62
4.4.2	Potasio lixiviado	66
4.5	Conclusiones	69
	Bibliografía	69
5.	Recomendaciones.....	73
	Anexo A: Variables climáticas.....	74
	Anexo B: Análisis estadístico	¡Error! Marcador no definido.

Lista de figuras

Pág.

Figura 2.1 Fertilización en la variedad Criolla Colombia con hidrogel (A) y sin (B) hidrogel a base de carragenina.....	17
Figura 2.2 Contenido relativo de clorofila en unidades SPAD para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	20
Figura 2.3 Área foliar para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	22
Figura 2.4 Acumulación de masa seca en hojas para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	23
Figura 2.5 Acumulación de masa seca en tallos para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	25
Figura 2.6 Acumulación de masa seca en tubérculos para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	27
Figura 2.7 Acumulación de masa seca en flores para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	28
Figura 2.8 Acumulación de masa seca total para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	30
Figura 2.9 Distribución porcentual de masa seca para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	32
Figura 2.10 Curvas de crecimiento bajo el modelo Richards para la variable Peso Seco Total en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	34
Figura 2.11 Curvas de crecimiento bajo el modelo Richards para la variable Área Foliar en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	35
Figura 2.12 Índice de área foliar (IAF) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	37
Figura 2.13 Tasa relativa de crecimiento (TRC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	38
Figura 2.14 Tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	39
Figura 2.15 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	40
Figura 3.1 Rendimiento promedio para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael (Sibaté)	51

Figura 3.2 Índice de cosecha promedio para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael.....	53
Figura 3.3 Gravedad específica promedio de tubérculos para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael.....	54
Figura 4.1 Instalación de lisímetros de succión.....	62
Figura 4.2 Nitrógeno amoniacal (NH_4^+) lixiviado en un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda El Peñón (Sibaté).....	64
Figura 4.3 Nitrógeno amoniacal (NH_4^+) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la combinación de dos niveles de fertilizante y la ausencia o presencia de recubrimiento con hidrogel en la vereda El Peñón (Sibaté)	66
Figura 4.4 Potasio (K^+) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la combinación de dos niveles de fertilizante y la ausencia o presencia de recubrimiento con hidrogel en la vereda El Peñón (Sibaté)	68

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2.1. Valores de variables químicas y físicas de los suelos en la vereda San Rafael	16
Tabla 2.2. Fórmulas y unidades para Índices de Crecimiento.	17
Tabla 2.3 Cuadrados medios para la variable contenido relativo de clorofila (SPAD) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).	19
Tabla 2.4 Cuadrados medios para la variable Área Foliar (AF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	21
Tabla 2.5 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Hojas (MSH) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	23
Tabla 2.6 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Tallos (MST) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	24
Tabla 2.7 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Tubérculos (MSTU) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).	26
Tabla 2.8 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Flores (MSF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	27
Tabla 2.9 Cuadrados medios para la variable Masa Seca Total (MSTO) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	29
Tabla 2.10 Parametros calculados del modelo de crecimiento para la variable peso seco total para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté)	33
Tabla 2.11 Parametros calculados del modelo de crecimiento para la variable área foliar para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). ...	34
Tabla 2.12 Cuadrados medios para la Índice de Área Foliar (IAF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	36
Tabla 4.1 Valores de variables químicas y físicas de los suelos en la vereda El Peñón. 61	
Tabla 4.2 Cuadrados medios para nitrógeno amoniacal (NH ₄ ⁺) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).	65
Tabla 4.3 Cuadrados medios para Potasio (K ⁺) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté).....	68

Introducción

Los fertilizantes son compuestos químicos, naturales o sintéticos, los cuales se aplican en forma directa o indirecta para incorporarse al suelo o son suministrados directamente a las plantas con el fin de favorecer la productividad y/o mejorar la calidad de la producción agrícola. Deben contener nutrientes fundamentales requeridos para el crecimiento del cultivo, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. El suministro de estos fertilizantes al suelo se realiza debido a que, en muchas ocasiones, éste no presenta los niveles requeridos por las plantas para garantizar un rendimiento óptimo.

El cambio climático es considerado desde varios años atrás como uno de los principales problemas ambientales que necesitan mitigarse con urgencia. El cambio climático incide sobre el normal desarrollo de los procesos biológicos, por lo tanto, afecta directamente actividades como la agricultura. La agricultura en donde se realizan malas prácticas como la sobredosificación de los fertilizantes, aumenta la probabilidad de incidir negativamente sobre el ambiente. Es decir, la agricultura no sólo se ve afectada por el cambio climático, sino que también contribuye a este. El cambio climático tiene consecuencias como la modificación de las características de las zonas cultivables, alteraciones en el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos debido a los cambios en la distribución de las lluvias, el incremento de la radiación y de los cambios en la composición atmosférica.

En Colombia, la papa es un cultivo importante que se produce en distintas zonas; además, el país es el principal productor de papa criolla (diploide). En los diferentes sistemas de producción de papa criolla en Colombia, los rangos de dosis de aplicación de fertilizantes varían considerablemente debido al desconocimiento sobre la demanda de nutrientes, generando por lo general sobredosificación de fertilizantes y, por lo tanto, no todos los nutrientes aplicados al suelo son asimilados por las plantas, lo que implica que, por el riego o la lluvia, los nutrientes pueden perderse por escorrentía o lixiviación. Esto aumenta los problemas de contaminación de fuentes hídricas por procesos de eutroficación que se producen en cuerpos de agua como lagos, embalses o estanques que terminan en la proliferación de algas que suprimen otras plantas y animales.

Como respuesta a la baja eficiencia del uso de los nutrientes contenidos en los fertilizantes por parte de las plantas y a su incidencia sobre el medio ambiente, se han desarrollado fertilizantes de liberación lenta los cuales se caracterizan por el suministro pausado de los nutrientes al suelo, que disminuye su pérdida y garantiza una fuente nutricional continua para las plantas. Dentro de los fertilizantes de liberación lenta se encuentran los fertilizantes recubiertos, los cuales están envueltos en una capa de un material de baja solubilidad en agua en condiciones ambientales normales. El recubrimiento disminuye la velocidad a la cual los nutrientes migran hacia el medio y entran en contacto con la solución del suelo, en comparación con los fertilizantes que no poseen recubrimientos.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta de variables fisiológicas y el rendimiento de tubérculo en la variedad Criolla Colombia, al igual que los lixiviados de NH_4^+ y K^+ en suelo, por el efecto del uso de un fertilizante NPK con y sin recubrimiento de hidrogel a base de carragenina.

Este documento se encuentra estructurado en capítulos: en el primero se muestra el contexto y teoría de la investigación desarrollada mediante la revisión de conceptos relacionados con la problemática del estudio. En el segundo capítulo se presentan los resultados de acumulación de masa seca, así como las curvas de crecimiento del cultivo y el contenido relativo de clorofila. En el tercer capítulo se presentan los resultados de rendimiento y gravedad específica como parámetro de calidad en tubérculos y en el cuarto capítulo se detallan los resultados correspondientes a la lixiviación, de N como ión NH_4^+ , así como también el K^+ . Finalmente, se exponen las conclusiones y se formulan algunas recomendaciones y proyecciones basadas en los resultados obtenidos.

1. Marco teórico

1.1 Nutrición mineral en plantas

El nitrógeno (N) es uno de los elementos minerales definido como esencial en las plantas ya que su ausencia no les permite completar su ciclo de vida debido a su rol en los procesos fisiológicos (Taiz y Zeiger, 2010). El N es un elemento requerido en grandes cantidades; entre el 1 y el 5% de la masa seca de las plantas está constituida por nitrógeno siendo parte integral de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, co-enzimas, fitohormonas y metabolitos secundarios (Marschner, 2011).

El nitrógeno se encuentra en grandes cantidades en la atmósfera como N_2 , sin embargo, este nitrógeno no es asimilable por las plantas a menos que exista una simbiosis con bacterias del suelo fijadoras de N_2 (Hart *et al.*, 1994). Es por esto que las mayores fuentes de N para las plantas son el nitrato (NO_3^-) y el amonio (NH_4^+) los cuales pueden ser absorbidos por la raíz de las plantas para su posterior asimilación. El nitrato, sin embargo, presenta mejor movilidad en el suelo y se encuentra más disponible para las plantas, mientras que el amonio es el intermediario principal en su metabolismo. Independientemente del órgano donde se fije el amonio, las enzimas principales encargadas de este proceso son la glutamina sintetasa (GS) y la glutamato sintasa (GOGAT) (Nigro *et al.*, 2013).

La urea es utilizada en la agricultura como fertilizante y es hidrolizada a amonio en el suelo por medio de la enzima ureasa la cual es producida por microorganismos; sin embargo, las plantas también pueden tomar urea directamente y son capaces de hidrolizarla ya que presentan genes que codifican para la expresión de ureasa (Pinton *et al.*, 2016).

A diferencia del nitrato y el sulfato, el fosfato no se reduce en plantas, por el contrario, permanece en su forma oxidada más alta y aunque el óxido de fósforo (fosfito) a veces se vende como fertilizante, es dañino cuando se administra a plantas con deficiencia de fosfato, ya que es un análogo que inhibe su absorción. La fosforilación es mediada por el P y se da por medio de proteínas kinasas las cuales activan o inactivan otras proteínas, mientras que la desfosforilación requiere de fosfatasa para catalizar la hidrólisis (Siedow y Day, 2000). La proteína PEP carboxilasa es una de las enzimas clave en la regulación de la fosforilación, por lo tanto, interviene en plantas C3, C4 y CAM; en las dos últimas toma mayor relevancia ya que la actividad de la enzima aumenta (Marschner, 2011).

La acumulación de P también puede presentarse en plantas. Los fitatos, por ejemplo, son una forma típica de almacenamiento de P, especialmente en granos y otras semillas. Estos fitatos son la sal del ácido fítico y presentan una gran afinidad por algunos minerales como el Zn y el Fe, aunque también son los principales sitios de almacenamiento de K, Mg y Ca (Mengel y Kirkby, 2001). Se cree que estos fitatos están involucrados en la regulación de la síntesis de almidón durante el llenado de granos y tubérculos, ya que el nivel de P inorgánico decrece en esta fase de los cultivos. Una parte del P está asociada con el almidón, en cereales es sólo una pequeña proporción. En los tubérculos de papa se puede incorporar hasta el 40% del P total en el almidón, además, éste actúa como una fuente para la exportación de azúcar durante la brotación de los tubérculos (White y Hammond, 2008).

El potasio (K) se caracteriza por su alta movilidad en planta tanto entre células individuales como entre tejidos, así como también en el transporte a larga distancia vía xilema y floema. La toma y el transporte de K por parte de la planta es mediado por proteínas integrales de la membrana las cuales hacen posible el movimiento a través de la membrana plasmática (Taiz y Zeiger, 2010). El potasio es el catión más abundante en el citosol y, por lo tanto, contribuye en el potencial osmótico de las células y tejidos de las plantas. El potasio no es metabolizado por las plantas y no forma complejos fuertes, por lo que es un catión de rápido intercambio. Adicionalmente, debido a su alta concentración en el citosol y en cloroplastos, actúa como regulador facilitando así la estabilización del pH, transcendental para las reacciones enzimáticas (Marschner, 2011).

Una gran cantidad de enzimas son completamente dependientes o están estimuladas por el K (Mengel *et al.*, 2001). En general, el K induce estos cambios estructurales aumentando la velocidad de las reacciones catalíticas y, en algunas ocasiones, la afinidad por el sustrato. Por ejemplo, la actividad de la enzima almidón sintasa es altamente dependiente de cationes univalentes dentro de los cuales el K es el más eficiente (Hawker *et al.*, 1979). Otra función importante es la activación de ATPasas la cual no sólo facilita el transporte de K sino que, además, hace que el K sea el regulador osmótico más importante en toda la célula (MacRobbie, 1977). En la fotosíntesis, la deficiencia de K inicialmente afecta la funcionalidad de los estomas y, por lo tanto, la regulación del CO₂ (Marschner, 2011).

En la mayoría de las plantas el K está asociado a los aniones y desempeña un papel importante en los cambios de turgencia en las células-guarda durante el movimiento de los estomas. El mecanismo para el movimiento estomático consiste en un incremento en la concentración de K en las células-guarda que incrementa la presión osmótica; esto resulta en la toma de agua de las células adyacentes y permite aumentar la turgencia en las células-guarda lo cual hace que los estomas se abran (Taiz y Zeiger, 2010). El potasio tiene una gran relevancia en el transporte a través de floema, la función principal consiste en cargar la sacarosa y, además, controlar la velocidad de transporte de solutos

en los tubos cribosos del floema. El K contribuye a la carga del floema actuando como regulador del pH, además, ayuda a regular el potencial osmótico en los tubos cribosos permitiendo el transporte de los fotoasimilados desde la fuente hacia el vertedero (Schobert *et al.*, 1998).

1.2 Fertilizantes recubiertos en la agricultura

El uso de fertilizantes en la agricultura y el efecto de adicionar elementos minerales al suelo para aumentar el crecimiento de las plantas se conoce desde hace más de 2,000 años. Sin embargo, sólo hasta hace 150 años, aproximadamente, se empezó a estudiar la esencialidad de los nutrientes, su importancia, y la relación e interacción suelo-planta. Estos hallazgos condujeron rápidamente a un incremento en el uso de fertilizantes minerales (Marschner, 2011). Entre 1977 y 1984 el consumo de fertilizantes aumentó en los países en desarrollo hasta superar a las economías industrializadas, mientras que, al mismo tiempo, China superó a Estados Unidos para convertirse en el principal consumidor mundial de fertilizantes. Para el año 2001 los países en desarrollo consumieron el 64% de los fertilizantes producidos y los países industrializados el 31% (Heisey y Nort, 2007). En 2019 el suministro mundial de fertilizantes nitrogenados en su forma amoniacal fue de 161,5 millones de toneladas, el de ácido fosfórico fue de 49,5 millones de toneladas y el de potasio de 51,3 millones de toneladas para una producción total de más de 262 millones de toneladas de NPK (FAO, 2019).

China ha logrado alimentar cerca del 22% de la población mundial con sólo el 7% del área total cultivable y únicamente el 5-7% de los recursos de agua dulce renovables (Piao *et al.*, 2010). Sin embargo, estos alcances han sido motivo de controversia en temas de sustentabilidad debido a las altas tasas de aplicación de fertilizantes (Chen *et al.*, 2011). Para satisfacer la progresiva demanda de alimentos, es imprescindible para el sector agrícola emplear enormes cantidades de fertilizantes, muchos de los cuales, hasta el momento, han demostrado impactos ambientales adversos. Es por esto que, desde hace un tiempo, ha cobrado relevancia el desarrollo de sistemas que aumenten la producción y alivien los problemas ambientales (Chien *et al.*, 2009). Los fertilizantes de liberación controlada (FLC) se presentan como una alternativa importante, ya que se cree que mejoran el rendimiento de los cultivos al tiempo que reducen la contaminación ambiental causada por las emisiones peligrosas (Ej: NH_3 , N_2O) asociadas a la aplicación de los fertilizantes convencionales (Shaviv, 2005).

Los FLC están diseñados con el propósito de suministrar los nutrientes contenidos en ellos de manera retrasada y en sincronía con las necesidades nutricionales de las plantas por lo que proporcionan una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes y, a su vez, aumentan los rendimientos (Shaviv, 2005). Un FLC ideal está recubierto con un material, ya sea natural o seminatural, amigable con el medio ambiente en la mayoría de los casos, que retarda la liberación de fertilizante a una tasa tan lenta que una sola aplicación al suelo puede satisfacer los requerimientos de nutrientes para el crecimiento de cultivos modelo (Blouin, 1967). Dentro de las diferentes clasificaciones que se han

desarrollado, Azeem *et al.*, (2014) clasifican los FLC en tres categorías principalmente; un primer grupo donde se encuentran los compuestos orgánicos que a su vez están divididos en compuestos orgánicos naturales (derivados de animales, lodos, entre otros) y compuestos orgánicos sintéticos de baja solubilidad los cuales contienen nitrógeno. Estos se encuentran subdivididos en compuestos de descomposición biológica, urea formaldehído (UF) y compuestos de descomposición química como isobutiledeno-diurea (IBDU) o urea acetaldehído / ciclo diurea (CDU). Un segundo grupo incluye aquellos fertilizantes solubles en agua con barreras físicas que controlan la liberación de nutrientes. Estos fertilizantes se presentan como gránulos recubiertos por un polímero hidrofóbico o como una matriz de nutrientes dispersos a través de un material hidrofóbico que dificulta la solubilidad del fertilizante. Este grupo está subcategorizado en aquellos recubrimientos de polímeros orgánicos como por ejemplo resinas y recubrimientos de diferentes materiales hidrofóbicos (ej. goma, poliolefina, etc) o en forma de hidrogeles los cuales poseen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua. El tercer grupo abarca aquellos fertilizantes recubiertos por materiales inorgánicos de baja solubilidad que incluye metales de fosfatos de amonio como por ejemplo KNH_4PO_4 y MgNH_4PO_4 y roca de fosfato parcialmente acidulada. La clasificación de los FLC también puede basarse en su mecanismo de liberación de nutrientes que incluye difusión, erosión, reacción química u osmosis. Otros autores, sin embargo, reconocen sólo dos grupos; los recubrimientos con compuestos de baja solubilidad y los recubrimientos a base de materiales solubles en agua (Blaylock *et al.*, 2005).

El mecanismo de liberación de nutrientes es un aspecto a tener en cuenta en razón de que permite medir directamente la efectividad del FLC. Generalmente, este mecanismo se hace difícil de determinar debido a que depende de múltiples factores, entre ellos, la naturaleza del material utilizado, las condiciones agronómicas del cultivo y del ambiente, entre otros. En la literatura se encuentran descritos diferentes mecanismos de liberación de los FLC que se encuentran en discusión. Liu (2008) y Shaviv (2005) propusieron un mecanismo de liberación para los fertilizantes recubiertos denominados modelo de difusión multietapa. De acuerdo con este modelo, luego de aplicar el fertilizante recubierto, el agua de riego penetra en el recubrimiento y se condensa en el núcleo de fertilizante sólido para que, posteriormente, ocurra una disolución parcial de nutrientes. A continuación, a medida que la presión osmótica se acumula, el gránulo se hincha y deriva en dos procesos. En el primero, cuando la presión osmótica supera la resistencia de la membrana, el recubrimiento estalla y todo el núcleo se libera espontáneamente. Esto se conoce como el "mecanismo de falla" o "liberación catastrófica". En el segundo, si la membrana resiste la presión, se cree que el fertilizante se libera lentamente a través de la membrana por difusión, este mecanismo se denomina "mecanismo de difusión". El mecanismo de falla generalmente se observa en recubrimientos frágiles (por ejemplo, azufre o azufre modificado), mientras que en los recubrimientos de polímeros (por ejemplo, poliolefina) se espera que ocurra el mecanismo de liberación por difusión.

Los FLC se presentan como una tecnología que genera un ahorro en la cantidad de fertilizante aplicado, además de disminuir las labores de aplicación de fertilizantes en cuanto se disminuye el número de aplicaciones por ciclo productivo. También se afirma que permiten disminuir las pérdidas de nutrientes, toxicidad sobre algunas semillas, quemaduras en follaje, irritación dérmica y problemas de inhalación durante la aplicación. No obstante, algunos de los materiales empleados en la fabricación de FLC no son biodegradables e incluso, en algunas ocasiones, son tóxicos para el suelo. Las condiciones de almacenamiento también pueden ser una desventaja debido a la absorción de humedad del ambiente o por fisuras en el empaque que lo contiene (Rose, 2002).

Existen varias limitaciones para la adopción generalizada de los FLC, entre ellas se pueden mencionar: la falta de información sobre la cinética luego de la aplicación de FLC en diferentes tipos de suelo. Los FLC son susceptibles a cambios en la temperatura, humedad relativa, tipo de suelo y su actividad microbiana. Cambios en estas variables hacen que sea imprescindible conocer la tasa de liberación de nutrientes ya que esta afectará la eficiencia de la liberación del fertilizante, especialmente si ésta se ha establecido para un cultivo específico. Asimismo, los FLC no responden directamente a la demanda de nutrientes de la planta y su liberación de nutrientes es independiente. (Azeem *et al.*, 2014).

La urea es el fertilizante más utilizado a nivel mundial para el desarrollo de FLC recubiertos con ésta (URLC) debido a su alto contenido de nitrógeno (46%), bajo costo y fácil aplicación (Liang *et al.*, 2007). Al ser aplicada al suelo, la urea sufre una serie de transformaciones físicas, químicas y biológicas dentro del ciclo del nitrógeno para poder estar disponible para las plantas. En el suelo van a ocurrir procesos mediados por enzimas como la ureasa, por microorganismos como nitrosomonas/nitrosococcus, Nitrobacter y procesos de amonificación y nitrificación (Trenkel, 2010).

En el campo han sido varios los estudios realizados sobre FLC fabricados de diferentes materiales y en diferentes sistemas de cultivo. Geng *et al.*, (2016) evaluaron el efecto de la fertilización con urea y azufre recubiertos con polímeros sobre el rendimiento, el uso eficiente de nitrógeno y la senescencia en hojas en el cultivo de algodón. Los resultados indicaron, por una parte, que la tasa de liberación de N de la urea recubierta se ajustó a los requerimientos nutricionales de N del algodón, aumentando significativamente los niveles de NO_3 y NH_4 en el suelo durante las etapas de floración y apertura de cápsulas, mientras que el contenido de azufre (S) aumentó significativamente en la etapa de llenado de las cápsulas. El rendimiento de fibra aumentó, así como la eficiencia de uso de recuperación aparente de N (RUE) y la eficiencia de uso agronómico (AUE); también mejoraron los parámetros de calidad como la longitud y resistencia de las fibras.

En cultivos de trigo y maíz Zheng *et al.*, (2016) reportaron aumento en el rendimiento de grano de hasta 10.3% en trigo y 21% para maíz, además, el uso eficiente del N incrementó en 56.4% y 48.5%, respectivamente, mejorando las ganancias del sistema productivo en hasta 11.1%. También reportaron reducción significativa en las tasas de

lixiviación de NO_3^+ y NH_4^+ , concluyendo la obtención de importantes beneficios por el uso de esta tecnología.

En papa Li *et al.*, (2015) evaluaron en la variedad Favorita (sub.sp *tuberosum*) el efecto sobre el rendimiento, la calidad y el uso eficiente de N de la tecnología de liberación controlada de N por medio de un recubrimiento de polímero y, adicionalmente, el recubrimiento con azufre. Las tasas de liberación de N estuvieron acordes con los requerimientos de N en diferentes etapas, se reportó que el tratamiento logró aumentar hasta 26.46% el rendimiento total y mejorar significativamente características de calidad como la concentración de vitamina C, la proteína soluble y el contenido de almidón.

A pesar de sus ventajas, el uso de recubrimientos a base de azufre presenta varios inconvenientes. El azufre es un material sólido débil y cristalino que, en muchos casos, forma un recubrimiento muy delgado, no uniforme, y no continuo sobre el fertilizante granulado. Por esta razón, es necesario aplicar un recubrimiento secundario o sellador sobre la superficie recubierta, que en su mayoría son una mezcla de hidrocarburos poliméricos convencionales, ceras con contenido de petróleo y una combinación de aceite parafínico polimérico altamente viscoso y polietileno. En algunos casos, cuando el material es expuesto a la luz solar o colocado en cuartos de almacenamiento con temperatura controlada, sufre una contracción térmica que deja grietas en la superficie de los gránulos recubiertos, las cuales debilitan la barrera física del recubrimiento, acelerando en campo la liberación de nutrientes. Además de los inconvenientes mencionados, los materiales utilizados para la fabricación de los selladores son compuestos hidrocarburos que conllevan a efectos negativos sobre el medio ambiente. (Naz y Sulaiman, 2016).

Bibliografía

- Azeem , B., KuShaari, K., Man, Z., Basit, A., & Thanh, T. 2014. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J. Controlled Release*, 181, 11-21.
- Blaylock, A., Kaufmann, J., & Dowbenko, R. 2005. Nitrogen fertilizer technologies. *Adv Agric.* 6, 8-13.
- Blouin, G. M. 1967. Patente nº US3295950A. Estados Unidos.
- Bremner, J. 1995. Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer. *Fertil. Res.* 42, 321-329.
- Chen, X.P., Cui, Z.L., Vitousek, P.M., Cassman, K.G., Matson, P.A., Bai, J.S., Meng, Q.F., Hou, P., Yue, S.C., & Römheld, V. 2011. Integrated soil-crop system management for food security. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 108, 6399– 6404.

-
- Chien, S., Prochnow, L., & Cantarella, H. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Adv. Agron.* 102, 267-322.
- FAO. 2019. World fertilizer trends and outlook to 2022. Rome.
- Geng, J., Ma, Q., Chen, J., Zhang, M., Li, C., Yang, Y., Yang, X., Zhang, W., & Liu, Z. 2016. Effects of polymer coated urea and sulfur fertilization on yield, nitrogen use efficiency and leaf senescence of cotton. *Field Crops R.* 187, 87-95.
- Hart, S., Stark, J., Davidson, E., & Fireste, M. 1994. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification. *Micriobiological and Biochemical Properties*, 42, 985-1018. Madisson.
- Hawker, J. S., Marschner, H., & Krauss, A. 1979. Starch synthesis in developing potato tubers. *Physiol. Plant.* 46(1), 25-30.
- Heisey, P. W., & Nort, G. W. 2007. Fertilizers and the other farm chemicals. En R. Evenson, *Agricultural Development: farmers, farm production and farma markets.* 2741-2777.
- Li, X., Li, Q., Xu, X., Su, Y., Yue, Q., & Gao, B. 2015. Charazterization, swelling and slow-release properties of a new controlled release fertilizer based on wheat straw cellulose hydrogel. *J. Taiwan Inst. Chem. E.* 60, 564-572.
- Liang, R., Liu, M., & Wu, L. 2007. Controlled release NPK compound fertilizer with the function pf water retention. *React. Funct. Polym.* 72(2), 769-779.
- Liu, L., Kost, J., Marsall, L., Hicks, F., & Hicks, K. 2008. A review: Controlled Release Systems for Agricultural Food Applications. En A. S. Series, *New Delivery Systems for Controlled Drug Release from Naturally Occurring Materials.* 992, 265-281.
- MacRobbie, E. A. 1977. Functionsof ion transport in plant cells and tissues. *Int. J. Biochem. Cell B.* 13, 211-247.
- Marschner, P. 2011. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.* 3rd edition. Edited by P. Marschner. Amsterdam, Netherlands: Elsevier/Academic Press, 684.
- Mengel, K., Kirby, E. A., Kosegarten, H., & Appel, T. 2001. *Principles of Plant Nutrition.* 5th Edition. Kluwer Academic Publishers, 481-511.
- Naz, M., & Sulaiman, S. 2016. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *J. Controlled Release*, 225, 109-120.
- Nigro, D., Huo, N., Marcotuli, I., Blanco, A., Gadaleta, A., & Anderson, O. 2013. Structural analysis of the wheat genes encoding NADH-dependent glutamine-2-oxoglutarate amidotransferases and correlation with grain protein content. *PLoS One*, 8(9).
- Piao, S. L., Ciais, P., & Huang, Y. 2010. Tha impacts of climate change on water resources and agricultrure un China. *Nature*, 467, 43-51.
- Pinton, R., Tomasi, N., & Zanin, L. 2016. Molecular and physiological interactions of urea and nitrate uptake in plants. *Plant Signal Behav.* 11:e1076603.

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

- Rose, R. 2002. Slow-release fertilizers 101. En R. Dumroese, L. Riley, & T. Landis, National proceedings: forest and conservation nursery associations-1999, 2000, and 2001. 304-308.
- Schobert, C., Baker, L., Komor, E., Hayashi, H., Chino, M., & Lucas, W. J. 1998. Identification of immunologically related proteins in sieve-tube exudate collected from monocotyledonous and dicotyledonous plants. *Planta*, 206, 245-252.
- Shaviv, A. 2005. Controlled release fertilizers. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. Frankfurt.
- Siedow, J., & Day, D. A. 2000. Respiration and photorespiration. En B. Buchanan, W. Gruissem, & R. Jones, *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. 676-728. Rockville: ASPP.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. *Plant Physiology*. 5th Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Trenkel, M. E. 2010. Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. *Adv. Chem. Engineer. Sci.* 6(4).
- White, P., & Hammond, J. 2008. Phosphorus in the global environment. *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus interactions*. 1, 1-7.
- Zheng, W., Zhang, M., Liu, Z., Zhou, H., Lu, H., Zhang, W., Yang, Y., Li, C., & Chen, B. 2016. Combining controlled-release urea normal urea to improve nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops R.* 197, 52-62.

2. Crecimiento de la variedad Criolla Colombia fertilizada con NPK con y sin recubrimiento de hidrogel

2.1 Resumen

Algunos elementos minerales que no son tomados por las plantas pueden llegar a aguas subterráneas causando contaminación ambiental. Con el fin de reducir dicha contaminación y la pérdida de nutrientes, se han desarrollado recubrimientos de fertilizantes que permiten la liberación lenta de los elementos al suelo, sin comprometer la producción de los cultivos. En este trabajo se reporta el crecimiento de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja), en la vereda San Rafael del municipio de Sibaté, bajo dos dosis de fertilizante NPK en presencia y ausencia de un recubrimiento de hidrogel a base de carragenina. El trabajo se realizó bajo el diseño experimental de bloques completamente al azar, con arreglo factorial 2x2, donde el primer factor es dosis de NPK y, el segundo, presencia y ausencia de recubrimiento del fertilizante. Los resultados obtenidos mostraron que el factor dosis de fertilizante no afectó el contenido relativo de clorofila, la acumulación y distribución de masa seca, el factor Hidrogel en la variedad Criolla Colombia modificó la acumulación de masa seca en hojas, tallos, tubérculos y total al inicio y al final del ciclo de cultivo. Sin recubrimiento la respuesta fue superior. Los índices de crecimiento como el índice de área foliar (IAF), la tasa relativa de crecimiento (TRC), la tasa absoluta de crecimiento (TAC) y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) no se alteraron. Estos resultados sugieren que el crecimiento la variedad Criolla Colombia no fue afectado por el uso de hidrogel a base de carragenina como recubrimiento en el fertilizante aplicado.

Palabras clave: masa seca, índices de crecimiento, papa diploide, fertilizante recubierto.

2.2 Introducción

El cultivo de papa es muy importante en la cadena alimenticia global, ya que, luego del trigo, arroz y maíz, es el alimento más importante en el mundo (Murillo *et al.*, 2016). En Colombia, la papa es un cultivo de gran importancia con 132,161 ha sembradas: es uno de los productos agrícolas de mayor demanda de fertilizantes, los que representan entre el 20 y el 25% de los costos directos de producción (Fedepapa y FNFP, 2017); además, es una de las especies de mayor demanda nutricional por kg de biomasa seca producida (Kumar *et al.*, 2013).

La productividad de un cultivo, en términos biológicos, se define desde el inicio del ciclo de producción y es afectada por diferentes factores como características intrínsecas del genotipo, el ambiente, y el manejo agronómico (Körner, 2015). Estos factores tienen

efecto sobre los cambios en la diferenciación y expansión de órganos, en la captación de recursos por parte de éstos, y en la partición de esos recursos entre los distintos órganos de la planta. Estos procesos de diferenciación y expansión se denominan crecimiento y desarrollo. El crecimiento se refiere a un aumento irreversible de masa seca o volumen, cambios en tamaño, masa, forma y/o número, en función del genotipo y el complejo ambiental (Krug, 1997) que dan como resultado un aumento cuantitativo del tamaño y peso de la planta. El desarrollo es cualitativo y se entiende a partir de los cambios morfológicos y fisiológicos que ocurren durante el ciclo biológico de una planta (Meza *et al.*, 2015). Para evaluar la influencia de las variaciones en el genotipo, por efecto del ambiente y el manejo, se han desarrollado técnicas matemáticas de análisis de crecimiento vegetal. A partir de mediciones sencillas (área foliar y peso de los diferentes órganos) se han derivado parámetros que permiten estimar con precisión componentes fundamentales de la productividad, como la tasa de fijación de carbono y la partición de fotoasimilados entre los diferentes órganos de un vegetal (Di Benedetto y Tognetti, 2016). El análisis de desarrollo se basa en escalas que describen una serie de eventos sucesivos; por ejemplo, emergencia, aparición de botones florales, etapa vegetativa, etapa reproductiva, entre otros, para los diferentes cultivos.

La nutrición es determinante en el crecimiento y desarrollo de la papa; el nitrógeno y el potasio son elementos importantes, no obstante, altas concentraciones de nitrógeno en el suelo alargan el ciclo de cultivo y retrasan el inicio de la tuberización; además, disminuyen el rendimiento de tubérculos y su calidad. Por otro lado, concentraciones bajas tienen el efecto contrario (Giletto *et al.*, 2003). El nitrógeno (N) es componente estructural de ácidos nucleídos, aminoácidos y proteínas (Taiz y Zeiger, 2010). Por su parte, el fósforo conforma lipoides y fosfolípidos y es esencial en la respiración y fotosíntesis (fosforilación), en el almacenamiento y transferencia de energía (NAD, NADP y ATP) y en la división y crecimiento celular. El P se acumula en partes de la planta en activo crecimiento y en semillas; es muy importante para el desarrollo de raíces y tejidos meristemáticos (Bernal y Espinosa, 2003). El K es activador de enzimas esenciales en la fotosíntesis y la respiración, activa enzimas necesarias para la formación de almidón y proteínas (Mohr *et al.*, 2012) y, en papa, es importante en el desarrollo y llenado de tubérculos (Nava *et al.*, 2007).

La aplicación de tecnologías de liberación lenta o controlada en los fertilizantes se basa en la liberación gradual de nutrientes para satisfacer la demanda de las plantas, reducir las pérdidas y disminuir el impacto en el medio ambiente (Bley *et al.*, 2017). Las tasas de liberación de nutrientes repercuten directamente sobre la disponibilidad y, por tanto, sobre la toma de nutrientes por parte de las plantas, por lo que el crecimiento y desarrollo podrían verse modificados. Oosterhuis y Howard (2008) evaluaron fertilizantes nitrogenados y potásicos recubiertos con resina de poliolefina en el cultivo de algodón. Los resultados mostraron que el uso de una fuente de N revestida no redujo el

rendimiento. Los resultados fueron similares para los tratamientos con K recubierto bajo un sistema de manejo de riego; sin embargo, los resultados fueron contradictorios en sistema de labranza. El estudio no mostró diferencias entre los productos y se concluyó que el uso de la tecnología para K no fue tan efectiva como para N en la producción de fibra de algodón. Blaylock (2007), reportó en investigación realizada en maíz, que el fertilizante de N recubierto mostró reducción en pérdidas de N y causó una mayor eficiencia en su uso. La reducción de un 10% en la aplicación de N no disminuyó el rendimiento. Ambos autores sugieren una evaluación previa de la viabilidad económica de la adopción de esta tecnología.

En Colombia, Rozo y Rozo (2006) sintetizaron un gel superabsorbente por copolimerización de poliacrilamida y k-carragenina aislada del alga roja (*Hypnea musciformis*) el cual mostró buena fuerza de gel y alta capacidad de absorción, es decir, pueden absorben hasta diez mil veces su peso en agua, sin disolverse ni perder su integridad, lo que permite proponerlo como un gel hidroretenedor para uso en diferentes tipos de suelos. La carragenina pertenece a una familia de polisacáridos sulfatados presentes en la pared y la matriz de las algas rojas en la clase Rhodophyceae. Estos polisacáridos son aniónicos; con alto peso molecular; un contenido de 15-40% de éster-sulfato; y una estructura química de d-galactosa y 3,6-anhidrogalactosa (3,6 AG), que se unen a través de α -1,3- y β -1,4-glucosídico (Rhim & Wang, 2013). En el año 2017, se propuso una nueva formulación para el hidrogel a base de carragenina, sin poliacrilamida, cuyas características fisicoquímicas y resultados de evaluación en laboratorio sugieren que este hidrogel puede ser un buen candidato para ser utilizado como recubrimiento de fertilizantes NPK con el objetivo de disminuir la pérdida de nutrientes por lixiviación (Santamaría *et al.*, 2019). En este sentido, es importante considerar la aplicación de fertilizantes recubiertos con hidrogel a base de carragenina en cultivos de papa, por cuanto en Colombia éste es un cultivo con sistemas productivos basados en la aplicación de compuestos con altas dosis de elementos minerales. El objetivo de este trabajo fue evaluar el crecimiento y desarrollo de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la aplicación de diferentes dosis de fertilizante NPK con y sin recubrimiento de hidrogel a base de carragenina.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Localización y diseño experimental

El ensayo se estableció en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca, en la vereda San Rafael a una altitud de 2720 msnm (N 04°28'37,2'' W 74°17'17,5'') entre abril y agosto de 2018. Se utilizó semilla seleccionada de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) obtenida de los agricultores de la región. El experimento estuvo conformado por 4 tratamientos, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones y unidades experimentales de 15 m². Cada unidad experimental consistió de dos surcos distanciados por 1 m y 25 sitios de siembra por surco, distanciadas 0.3 m. La

precipitación se midió diariamente empleando un pluviómetro convencional, registrando 214,5 mm en el ciclo de cultivo. La temperatura promedio fue de 13,8 °C de acuerdo con el programa de simulación Marksim de CIAT para el modelo de simulación GISS y RCP 6.0. No se realizó riego suplementario. Se presentó un suelo andisol con textura franco-arenosa, pH de 5.59, ligeramente ácido; una saturación de bases alta y alto contenido de materia orgánica. Las características físico-químicas del suelo se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de variables químicas y físicas de los suelos en la vereda San Rafael.

pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Na
pH	%	mg·kg ⁻¹		cmol(+)·kg ⁻¹			
5.59	22.52	33.13	21.59	0.19	12.22	3.47	0.18
CICE	Mn	Zn	Fe	Cu	B	Textura	
cmol(+) kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹						
16.07	2.92	16.73	99.47	3.98	0.67	Franco Arenoso	

MO: Materia orgánica. CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico. Métodos de análisis: pH (VC_R_004 versión 2 de 18-09-2015), fósforo disponible Bray II (NTC5350:2005), cationes cambiabiles en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (NTC5349:2008), micronutrientes en suelo por Olsen modificado (NTC 5526:2007). Laboratorio de Química de Suelos; Agrosavia.

Se realizó un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial 2x2; el primer factor fue fertilizante N-P-K (15-15-15), el segundo factor fue hidrogel (ausencia o presencia). Los niveles de fertilizante fueron, 25 g/planta (833,3 kg·ha⁻¹) y 15 g/planta (500 kg·ha⁻¹), teniendo en cuenta una densidad de 33,333 plantas/ha. Se realizó una sola fertilización al momento de la siembra. La fuente utilizada para la aplicación de los elementos fue abono granulado del distribuidor VECOL 15-15-15-11 (N total 15%, P₂O₅ 15%, K₂O 15%, 11% S), el cual contiene N amoniacal en su totalidad, P como fosfato monoamónico (MAP), K como KCl y azufre (S) como sulfato diamónico. Los tratamientos se establecieron así; Tratamiento 1; 25 g/planta en ausencia de hidrogel, Tratamiento 2; 25 g/planta en presencia de hidrogel, Tratamiento 3; 15 g/planta en ausencia de hidrogel y Tratamiento 4; 15 g/planta en presencia de hidrogel. En la figura 2.1 se ilustra la fertilización con y sin recubrimiento.



Figura 2.1 Fertilización en la variedad Criolla Colombia con hidrogel (A) y sin (B) hidrogel a base de carragenina.

*La fertilización con las cápsulas de hidrogel se realizó alrededor del tubérculo semilla, cada hidrogel recubre $2 \pm 0,2$ g de fertilizante NPK granulado.

2.3.2 Contenido relativo de clorofila

El contenido relativo de clorofila se determinó con un medidor portátil de clorofila (Konica Minolta SPAD-502 plus, Japón), sobre el foliolo terminal de una hoja del tercio superior en tres plantas por unidad experimental. Se realizaron tres mediciones por muestreo promediando el resultado de las mediciones.

2.3.3 Análisis de crecimiento

Las evaluaciones se realizaron cada dos semanas a partir de los 14 días después de emergencia y hasta días previos a la cosecha. Se realizó muestreo destructivo, tomando dos plantas de cada unidad experimental en cada muestreo para evaluar la masa seca por órgano (hojas, tallos, tubérculos, flores y frutos) y medir el área foliar. Los órganos de las plantas se secaron a una temperatura de 70 °C hasta alcanzar peso constante para luego tomar su peso seco. Para la determinación del área foliar se usó la metodología propuesta por Campillo *et al.*, 2008 empleando una cámara digital convencional (Canon EOS Rebel T3) para posteriormente, realizar un análisis de contorno mediante el software Image J.

Con la información de masa seca por órgano y total, el área foliar, se determinaron los índices de crecimiento para cada tratamiento de acuerdo con las fórmulas descritas en la tabla 2.2. El área del suelo ocupada por cada planta se tomó como el marco de plantación, correspondiente a 1 x 0.3 m, equivalente a 3000 cm²/planta.

Tabla 2.2. Fórmulas y unidades para Índices de Crecimiento. Fuente: Plant Growth Analysis (Hunt, 1978).

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

Índices de crecimiento	Nombre	Fórmulas instantáneo	valor	Fórmulas para medio	valor	Unidades
Tasa relativa de crecimiento	TRC	$\frac{d(LN W)}{dt}$		$\frac{LNW_2 - LNW_1}{T_2 - T_1}$		Peso*Peso ⁻¹ *Tiempo ⁻¹
Índice de área foliar	IAF	$\frac{AF}{As}$		$\frac{AF_2 - AF_1}{As}$		Adimensional
Tasa absoluta de crecimiento	TAC	$\frac{dW}{dt}$		$\frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$		Peso*Tiempo ⁻¹
Tasa de crecimiento del cultivo	TCC	$\frac{1}{As} * \frac{dW}{dt}$		$\frac{1}{As} * \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1}$		Peso*Área ⁻¹ *Tiempo ⁻¹

Convenciones: W=Peso seco total, T=tiempo, AF=Área foliar, As=Área de suelo, WF=Peso seco foliar, LN=Logaritmo Natural.

Se utilizó el modelo de crecimiento de ajuste logístico de Verhulst de la siguiente manera:

$$y = \frac{\alpha}{1 + e^{-k(t-\gamma)}}$$

Donde α es el máximo tamaño de la variable, t es el tiempo en el que se logra la máxima tasa de crecimiento o punto de inflexión y k es un parámetro de escala sobre el tiempo (t) que influencia la tasa de crecimiento (γ) (Ulloa *et al.*, 2010).

2.3.4 Análisis estadístico

Los datos se analizaron de acuerdo con un diseño experimental de bloques completos al azar, y arreglo factorial 2x2; el primer factor corresponde a las dosis del fertilizante compuesto N-P-K y el segundo a la presencia o ausencia del hidrogel encapsulante a base de carragenina. Se realizó verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Se realizó un ANOVA y luego una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 por cada punto de muestreo. El análisis de los datos se realizó con el software estadístico R STUDIO.

2.4 Resultados y discusión

2.4.1 Contenido relativo de clorofila

En esta variable no se presentaron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) para los factores presencia o ausencia del hidrogel, dosis de fertilizante aplicado), ni para la interacción

entre los factores intra evaluaciones (muestreos) (Tab. 2.3 y Fig. 2.2). Esto significa que el recubrimiento de hidrogel, la dosis de fertilizante y la combinación de estos factores, no afectó la respuesta del contenido relativo de clorofila en las plantas de papa variedad Criolla Colombia. El promedio en el contenido relativo de se mantiene por encima de 45 unidades SPAD entre los 28 y 84 dde con un leve descenso a los 42 dde.

Las clorofilas son pigmentos fotosintéticos esenciales encargados de la interceptación de la luz y la producción de moléculas reductoras como ATP y NADPH en el cloroplasto (Mahmud *et al.*, 2015). En papa tetraploide, trabajos como los realizados por Coelho *et al.*, (2010) indican que, en variedades *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*, los valores críticos para la deficiencia de N se encuentran entre 40,5 y 43,7 SPAD, mientras que un adecuado nivel de N presenta promedios entre 61,3 y 66,7. Los valores de SPAD aquí encontrados son intermedios respecto a este reporte en la subsp *tuberosum*, lo cual se puede explicar en razón del genotipo evaluado que es la variedad diploide Criolla Colombia (Grupo Phureja), la cual tiene condiciones de crecimiento y desarrollo diferentes. En papa variedad Criolla Colombia, Ariza (2017) reportó un contenido relativo de clorofila de 42 SPAD a los 70 días después de siembra bajo condiciones de riego óptimas y fertilización con 20 g de fertilizante 10-20-20, bajo estrés hídrico del 80% el contenido relativo de clorofila aumento hasta 57 SPAD. En el desarrollo del experimento no se presentaron condiciones de estrés hídrico, ni tampoco se observaron deficiencias de nutrientes, factores que pueden afectar el contenido relativo de clorofila como lo afirma Boominathan *et al.*, (2004).

Tabla 2.3 Cuadrados medios para la variable contenido relativo de clorofila (SPAD) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	28,800 ^{n,s}	1,450 ^{n,s}	29,260 ^{n,s}	3,154 ^{n,s}	8,755
28	2,779 ^{n,s}	27,950 ^{n,s}	16,500 ^{n,s}	0,050 ^{n,s}	11,685
42	28,528 ^{n,s}	4,507 ^{n,s}	10,140 ^{n,s}	57,660 ^{n,s}	10,774
56	22,853 ^{n,s}	16,667 ^{n,s}	1,127 ^{n,s}	8,167 ^{n,s}	6,572
70	3,163 ^{n,s}	20,350 ^{n,s}	12,470 ^{n,s}	0,260 ^{n,s}	9,091
84	52,805 ^{n,s}	5,704 ^{n,s}	46,760 ^{n,s}	2,344 ^{n,s}	10,490

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

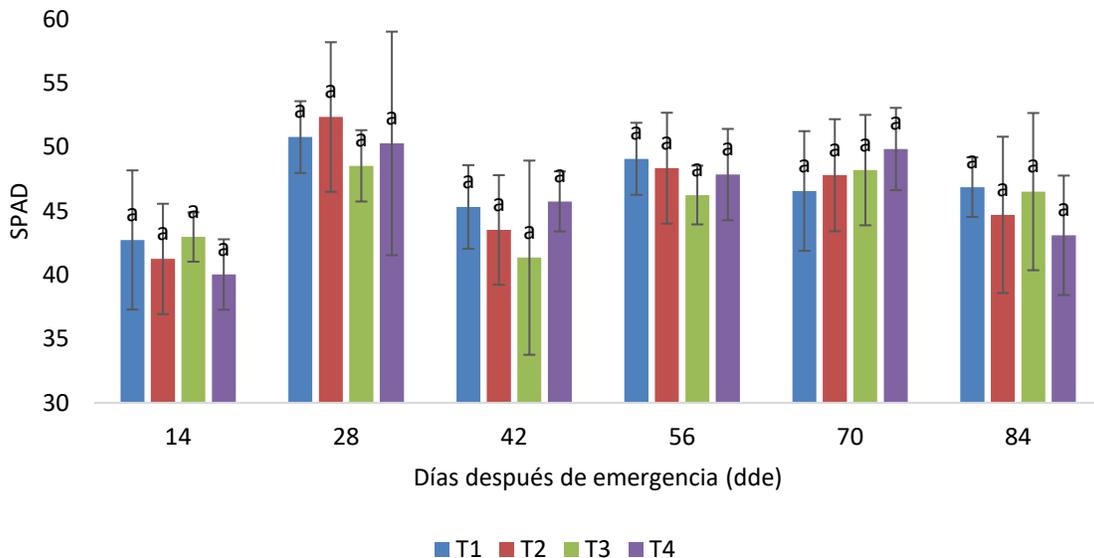


Figura 2.2 Contenido relativo de clorofila en unidades SPAD para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

2.4.2 Área foliar

Esta variable presentó un aumento constante desde el primer muestreo (14 dde) hasta el último (84 dde), como es de esperarse debido al normal crecimiento y desarrollo de las hojas. No se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la variable para el factor dosis de fertilizante (25 y 15 g/planta). La presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel influyó significativamente sobre el área foliar a los 14 dde, resultando en una mayor área foliar cuando no se utilizó el recubrimiento ($7512,77 \text{ cm}^2$) frente a cuando se utilizó ($4635,90 \text{ cm}^2$) (Tab. 2.4). Desde los 28 dde y hasta los 70 dde no se presentaron diferencias significativas para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel. A los 84 dde el área foliar fue significativamente diferente para el factor de hidrogel, resultando similar con lo observado a los 14 dde, en una mayor área foliar cuando no se utilizó el recubrimiento ($4597,47 \text{ cm}^2$) frente a cuando se utilizó ($3009,61 \text{ cm}^2$) (Tab. 2.4). La combinación de factores no presentó diferencias significativas, indicando que no existe una combinación entre dosis de fertilizante y el recubrimiento de hidrogel, que conlleve a cambios en el área foliar de las plantas (Fig. 2.3).

Los resultados encontrados son similares a los reportados por Cabezas (2002) para la variedad Criolla Colombia en la localidad de Bogotá (2560 msnm) con un promedio de $8733,63 \text{ cm}^2$, seguida por Firavitoba (2720 msnm) con $7015,32 \text{ cm}^2$ y la menor fue

Carmen de Carupa (2960 msnm) con 6986,64 cm². Santos (2010) reportó área foliar para la variedad en el municipio de Une (2859 msnm) de 7597,50 cm². Silva *et al.*, (2017) obtuvieron resultados de AF de 6000 cm² bajo un manejo agronómico con una densidad de siembra de 31,250 plantas/ha y 250 kg K₂O ha⁻¹. Los resultados que se obtuvieron y lo reportado en la literatura, indican una respuesta de las plantas de papa a las diferentes condiciones de cultivo, tal y como se evidenció en este trabajo donde hubo efecto en esta variable por el uso del recubrimiento de hidrogel a los 14 y 84 dde, es decir, al inicio y final del ciclo productivo. Esto puede explicarse debido a que, sin recubrimiento, el N está disponible más rápido al inicio del ciclo de cultivo, haciendo que las plantas lo tomen y aumenten el área foliar de manera más acelerada para desplegar la mayor cantidad de área foliar mientras el fertilizante está disponible. Con el recubrimiento de hidrogel, se presenta una menor área foliar hacia el final del ciclo de cultivo (84 dde) posiblemente porque las plantas aumentan el área foliar más lentamente ya que el suministro de N es más regulado.

Tabla 2.4 Cuadrados medios para la variable Área Foliar (AF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	1856,2815 ^{n,s}	256322,470 ^{n,s}	719587,160*	73802,841 ^{n,s}	26,986
28	4040719,948 ^{n,s}	391592,080 ^{n,s}	1260540,420 ^{n,s}	541329,818 ^{n,s}	57,293
42	9833411,030 ^{n,s}	6080176,070 ^{n,s}	1619047,730 ^{n,s}	7555245,180 ^{n,s}	40,041
56	13999597,870 ^{n,s}	5035704,600 ^{n,s}	2729441,150 ^{n,s}	5177051,370 ^{n,s}	50,220
70	6285205,310 ^{n,s}	273507,760 ^{n,s}	3112562,870 ^{n,s}	25364001,380 ^{n,s}	41,237
84	30392647,170 ^{n,s}	1268814,240 ^{n,s}	49658247,560*	8178442,130 ^{n,s}	46,275

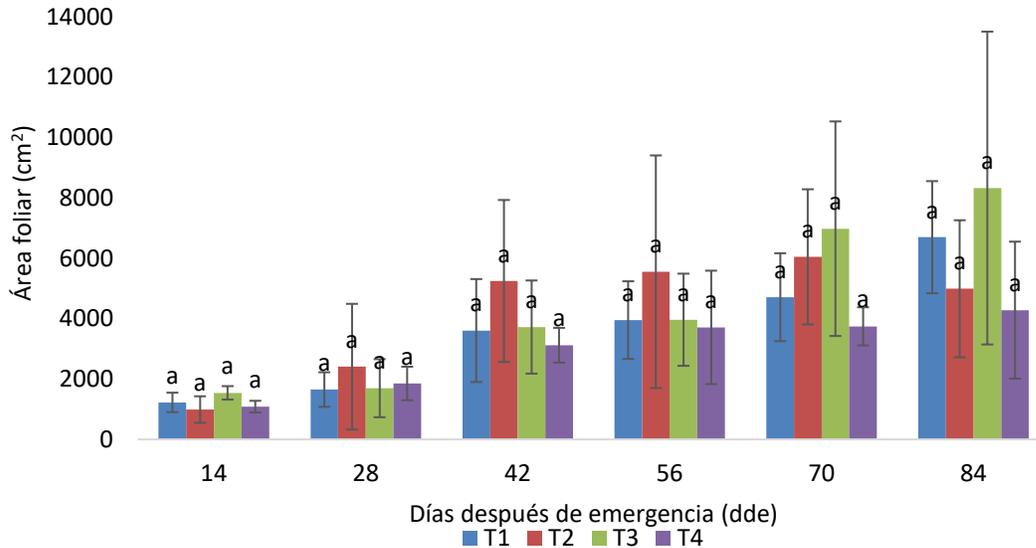


Figura 2.3 Área foliar para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

2.4.3 Acumulación de masa seca por órgano y total

- **Hojas**

La variable de acumulación de masa seca en hojas (MSH) de plantas no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor dosis de fertilizante y tampoco para la interacción entre los factores (Tab. 2.5). Por el contrario, el factor presencia o ausencia del recubrimiento con hidrogel presentó diferencias significativas a los 14 dde cuando en ausencia del hidrogel, se presentó una mayor acumulación de hojas (6,35 g/planta) frente a la presencia del recubrimiento (4,98 g/planta). Posterior a los 14 dde no se presentaron diferencias significativas para el factor presencia o ausencia del recubrimiento con hidrogel. Estos resultados indican que independientemente de la dosis o la presencia del recubrimiento de hidrogel tiene efecto sobre la acumulación de masa seca en hojas en la variedad Criolla Colombia únicamente a los 14 dde para luego ser similar hasta el final del ciclo de cultivo (84 dde).

La interacción entre el factor dosis e hidrogel presentó diferencias significativas cuando se realizó análisis entre muestreos en el tiempo, como era de esperarse debido al normal crecimiento de las plantas. Al evaluar la interacción de los factores en cada muestreo, no se presentaron diferencias significativas. Al finalizar el ensayo (84 dde) la combinación entre 25 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel alcanzó un promedio de

47,34 g/planta, frente a la combinación de 15 g/planta de fertilizante con recubrimiento de hidrogel que presentó un promedio de 29,20 g/planta, sin diferencia estadística entre ellos (Fig. 2.4). Esto indica que no existió una combinación entre la dosis de fertilizante aplicado y la presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel, que conllevara a cambios en la acumulación de masa seca en hojas en la variedad Criolla Colombia.

Tabla 2.5 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Hojas (MSH) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	0,941 ^{n,s.}	5,636 ^{n,s.}	11,266*	2,916 ^{n,s.}	27,067
28	120,156 ^{n,s.}	0,006 ^{n,s.}	43,909 ^{n,s.}	2,905 ^{n,s.}	57,093
42	255,797 ^{n,s.}	57,752 ^{n,s.}	49,452 ^{n,s.}	71,403 ^{n,s.}	35,510
56	44,788 ^{n,s.}	9,417 ^{n,s.}	91,117 ^{n,s.}	13,643 ^{n,s.}	25,234
70	1,698 ^{n,s.}	0,187 ^{n,s.}	89,278 ^{n,s.}	15,258 ^{n,s.}	37,544
84	267,923 ^{n,s.}	30,875 ^{n,s.}	1512,783 ^{n,s.}	1,314 ^{n,s.}	45,187

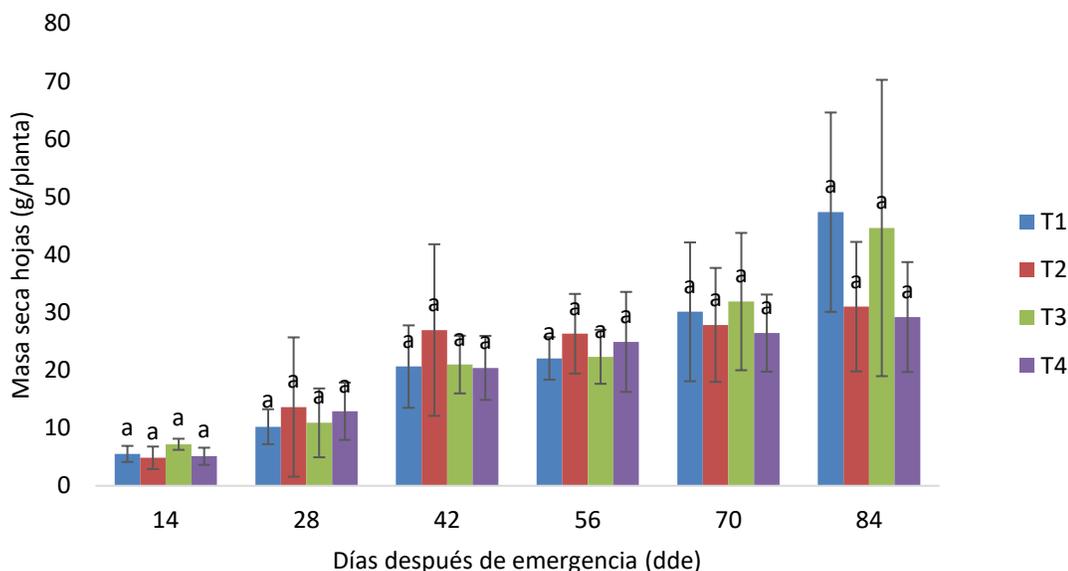


Figura 2.4 Acumulación de masa seca en hojas para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

- **Tallos**

La acumulación de masa seca en tallos de las plantas de papa fue similar al presentado en la acumulación de masa seca en hojas, no se presentan diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor dosis de fertilizante (Tab. 2.6) y tampoco para la interacción entre los factores (Fig. 2.5).

Esta variable presentó diferencias significativas para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel. Los resultados fueron significativamente diferentes únicamente a los 14 y 84 dde, en el primer caso, en ausencia del hidrogel se presentó una mayor acumulación de masa seca en tallos (1,44 g/planta) frente a la presencia del mismo (1,02 g/planta). Este mismo resultado se presentó a los 84 dde, sin hidrogel el promedio fue de 49,89 g/planta y con el hidrogel fue de 26,54 g/planta. Resultados similares en la acumulación de masa seca en tallos reportó Santos (2010) con promedios entre 30 y 40 g/planta entre los 80 y 90 dde para dos localidades de evaluación con fertilizante convencional.

Tabla 2.6 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Tallos (MST) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	0,063 ^{n,s.}	0,590 ^{n,s.}	1,019*	0,590 ^{n,s.}	33,451
28	12,529 ^{n,s.}	0,021 ^{n,s.}	5,811 ^{n,s.}	1,939 ^{n,s.}	70,000
42	88,931 ^{n,s.}	21,952 ^{n,s.}	10,050 ^{n,s.}	44,750 ^{n,s.}	39,714
56	9,150 ^{n,s.}	12,020 ^{n,s.}	77,192 ^{n,s.}	29,208 ^{n,s.}	42,520
70	106,673 ^{n,s.}	91,738 ^{n,s.}	19,316 ^{n,s.}	2,757 ^{n,s.}	45,253
84	34,885 ^{n,s.}	237,911 ^{n,s.}	3271,650*	215,865 ^{n,s.}	64,687

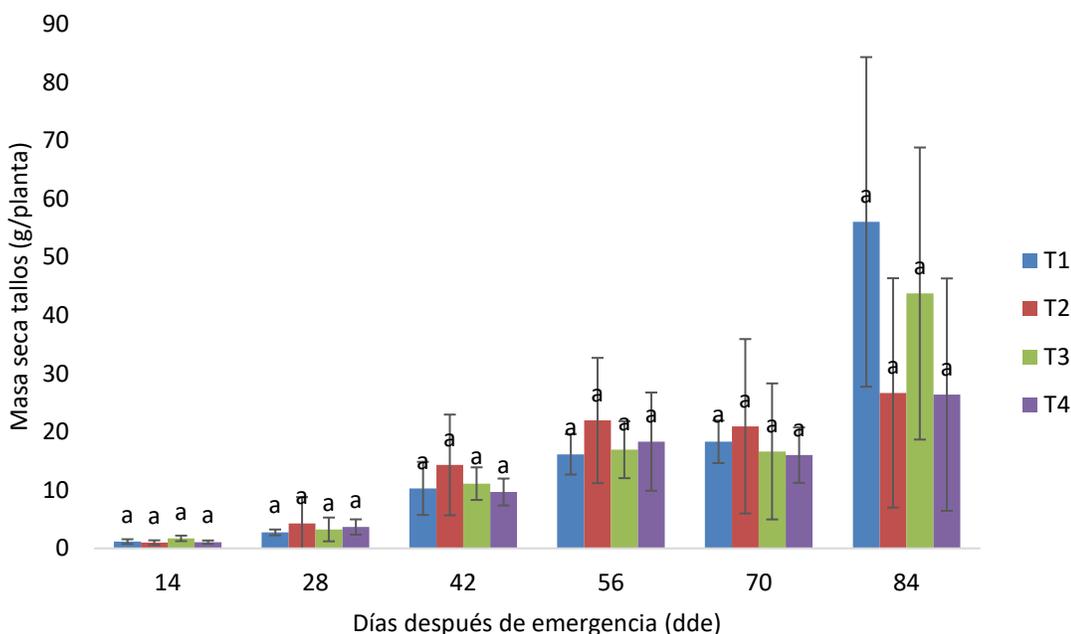


Figura 2.5 Acumulación de masa seca en tallos para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

- **Tubérculos**

El inicio de tuberización se presentó a los 21 dde y la masa seca de tubérculos comenzó a evaluarse a los 28 dds. La variable no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor dosis de fertilizante. Para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel se presentaron diferencias significativas a los 28 dde y a los 84 dde únicamente. En ausencia del recubrimiento de hidrogel el promedio de masa seca en tubérculos fue mayor (0,75 g/planta) frente a la presencia del hidrogel (0,24 g/planta) a los 28 dde. Similar resultado se presenta a los 84 dde cuando sin recubrimiento de hidrogel alcanzó un promedio de 144,88 g/planta frente a 108,79 g/planta en presencia del recubrimiento. Desde los 42 dde y hasta los 70 dde no se presentaron diferencias significativas en esta variable (Tab. 2.7).

Para la interacción de los factores evaluados se presentó diferencia significativa únicamente a los 70 dde. La combinación dosis de 25 g/planta de fertilizante en presencia del hidrogel mostró mayor acumulación de masa seca en tubérculos (73,81 g/planta) frente a la combinación de dosis 15 g/planta de fertilizante también en presencia del recubrimiento (39,26 g/planta). En los restantes puntos de muestreo no se presentó interacción entre estos factores (Fig. 2.6).

La variedad Criolla Colombia presenta promedios de acumulación de materia seca en tubérculos entre 100 g/planta y 140 g/planta a los 80 dde, dependiendo de las condiciones medio ambientales (Santos, 2010). El comienzo y duración de la tuberización

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

están marcados por las zonas con diferencias en variables medioambientales, es decir, variables como la altitud, la temperatura, la radiación solar, entre otras, las cuales son fundamentales para el proceso de desarrollo de tubérculos; por lo tanto, el rendimiento dependerá de la capacidad para aprovechar las condiciones del medio que se proporcione (Gutiérrez-Gutiérrez y Muñoz, 2009). Los resultados de esta variable en el presente estudio se encuentran dentro de los promedios reportados en otros estudios, tanto para los tratamientos con recubrimiento, como sin recubrimiento de hidrogel independiente de la dosis. Esto es importante ya que la acumulación de materia seca en tubérculos va a estar dada más por las condiciones edafoclimáticas que por la presencia o ausencia del hidrogel.

Tabla 2.7 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Tubérculos (MSTU) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
28	0,077 ^{n,s} ,	0,547 ^{n,s} ,	1,523*	0,004 ^{n,s} ,	72,873
42	6,146 ^{n,s} ,	62,048 ^{n,s} ,	13,966 ^{n,s} ,	6,028 ^{n,s} ,	59,474
56	169,451 ^{n,s} ,	40,466 ^{n,s} ,	647,354 ^{n,s} ,	1323,341 ^{n,s} ,	60,811
70	657,655 ^{n,s} ,	263,867 ^{n,s} ,	17,539 ^{n,s} ,	4677,633*	36,114
84	1340,817 ^{n,s} ,	382,497 ^{n,s} ,	7817,238*	1097,391 ^{n,s} ,	31,150

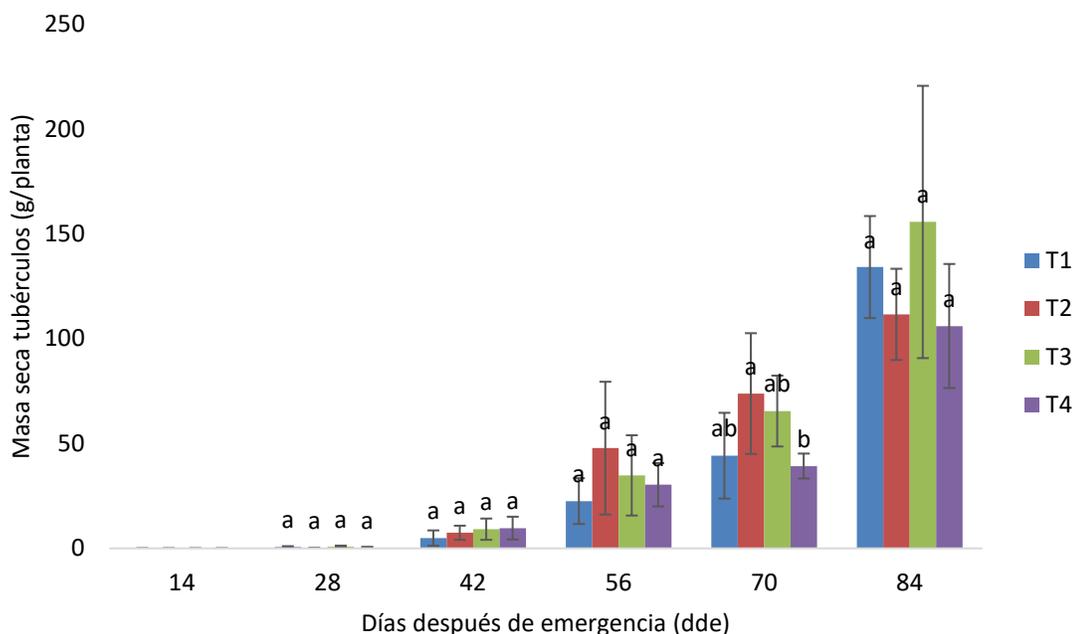


Figura 2.6 Acumulación de masa seca en tubérculos para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

- **Flores**

La masa seca de flores comenzó a evaluarse a los 28 dde y no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) para los factores evaluados en todos los muestreos (Tab. 2.8) y tampoco para la interacción entre estos (Fig. 2.7). Como era de esperarse, se presentaron diferencias significativas en el tiempo, lo cual corresponde a la acumulación de masa seca por el crecimiento.

Santos (2010) reporta que la variedad Criolla Colombia inicia la floración entre los 20 y 30 dde para alcanzar su máxima masa seca entre los 55 y 63 dde con valores promedio de 1,3 g/planta. Los resultados obtenidos aquí son similares a estos reportes cuando la aparición del órgano floral y el promedio de masa seca de flores se presentaron a los 28 dde con promedios entre 0,236 y 0,301 g/planta para posteriormente mantener valores homogéneos desde los 42 hasta los 70 dde llegando a tomar valores máximos de 1,274 g/planta a los 84 dde para la combinación de 25 g/planta de fertilizante en ausencia del recubrimiento de hidrogel.

Tabla 2.8 Cuadrados medios para la variable Masa Seca en Flores (MSF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación	CV%
-----	-------------------------------------	-----

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
28	0,008 ^{n,s}	0,002 ^{n,s}	0,013 ^{n,s}	0,001 ^{n,s}	80,536
42	0,093 ^{n,s}	0,244 ^{n,s}	0,035 ^{n,s}	0,061 ^{n,s}	36,786
56	0,087 ^{n,s}	0,005 ^{n,s}	0,546 ^{n,s}	0,144 ^{n,s}	62,683
70	0,995 ^{n,s}	0,017 ^{n,s}	0,040 ^{n,s}	0,104 ^{n,s}	57,356
84	0,083 ^{n,s}	0,439 ^{n,s}	3,126 ^{n,s}	0,014 ^{n,s}	108,056

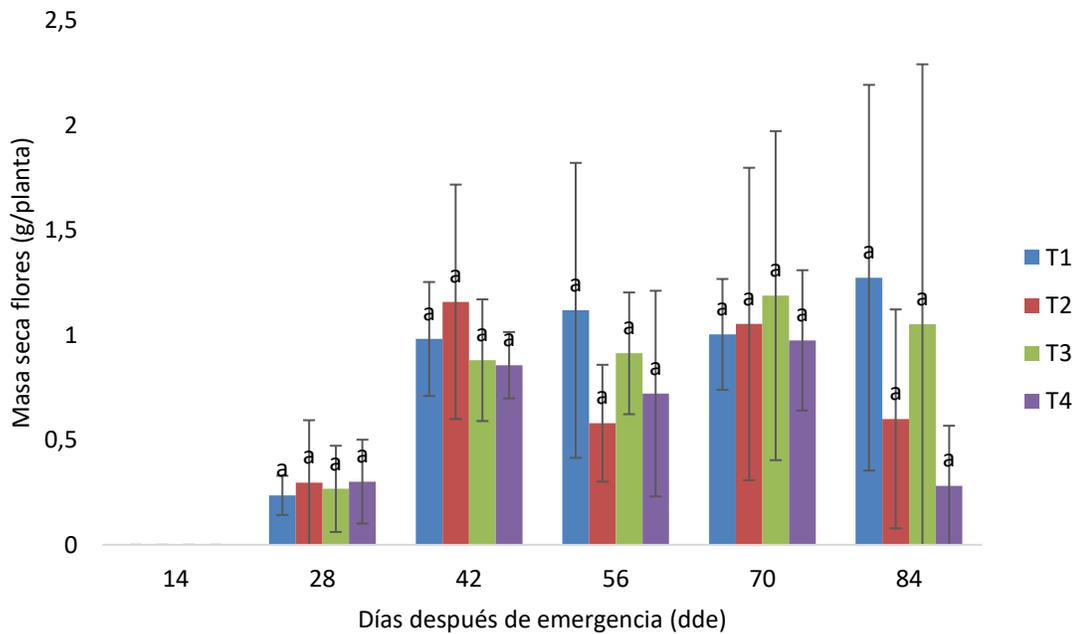


Figura 2.7 Acumulación de masa seca en flores para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

- **Acumulación de masa seca total**

En concordancia con lo presentado para la acumulación de masa seca en los diferentes órganos, la variable acumulación de masa seca total en plantas de papa variedad Criolla Colombia en la vereda San Rafael no presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) tanto para el factor dosis (Tab. 2.9) como para la interacción DxH (Fig. 2.8). El factor presencia o ausencia del hidrogel presentó diferencias significativas a los 14 y 84 dde únicamente. A los 14 dde se presentó un promedio de acumulación de materia seca total de 7,784

g/planta cuando no se recubrió el fertilizante, siendo significativamente mayor frente a el uso del recubrimiento (6,002 g/planta). Desde los 28 hasta los 70 dde el factor presencia o ausencia del hidrogel no presentó diferencias significativas. A los 84 dde se presentaron diferencias significativas similares a las presentadas al inicio del ciclo de cultivo (14 dde) cuando en ausencia del hidrogel mostró un promedio mayor (241,91 g/planta) frente a la presencia del hidrogel (165,86 g/planta).

Los trabajos relacionados con el crecimiento en variedades de papa Grupo Phureja son pocos. Cabezas (2002) reporta para la variedad Criolla Colombia valores promedio que van en un rango desde 171 g/planta hasta 329 g/planta de masa seca total, bajo densidades de siembra entre 27,700 y 41,700 plantas/ha y fertilización de acuerdo con análisis de suelos. Santos (2010) estimó la acumulación de masa seca total para la variedad Criolla Colombia entre 168,0 y 226,1 g/planta para dos localidades del departamento de Cundinamarca. Los resultados obtenidos en esta investigación se encuentran acorde con estos reportes con valores promedios de 239,48 y 245,93 g/planta bajo dosis de fertilizante de 25 g/planta y 15 g/planta respectivamente, sin recubrimiento de hidrogel. Con recubrimiento de hidrogel los promedios obtenidos fueron de 170,23 y 162,88 g/planta de masa seca total bajo 25 y 15 g/planta respectivamente. Estos resultados se ajustan a los reportes existentes, y la masa seca total no se afectó por las dosis de fertilizantes evaluadas y tampoco por el uso del recubrimiento del fertilizante con hidrogel.

Tabla 2.9 Cuadrados medios para la variable Masa Seca Total (MSTO) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	1,487 n.s.	9,875 n.s.	19,060*	5,310 n.s.	6,877
28	219,767 n.s.	0,317 n.s.	62,705 n.s.	9,396 n.s.	57,851
42	537,324 n.s.	24,029 n.s.	199,585 n.s.	318,308 n.s.	36,464
56	371,311 n.s.	0,019 n.s.	973,442 n.s.	1082,591 n.s.	45,220
70	1477,707 n.s.	934,172 n.s.	14,619 n.s.	4882,804 n.s.	28,312
84	3277,069 n.s.	4.351 n.s.	34698,763*	303,006 n.s.	36,714

Respuesta de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) a diferentes dosis de fertilizante NPK recubierto con hidrogel a base de carragenina

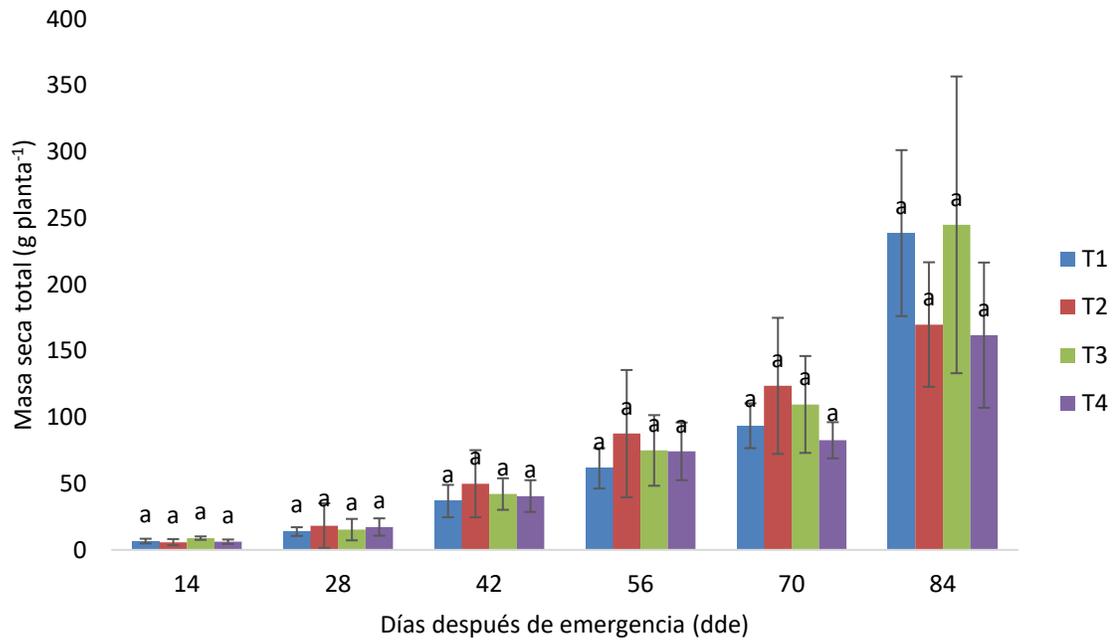


Figura 2.8 Acumulación de masa seca total para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=6$).

- **Distribución de masa seca**

Teniendo en cuenta la acumulación de masa seca por órgano, se calculó la distribución porcentual para las diferentes combinaciones entre factores a partir de los 14 días después de emergencia y hasta los 84 dde.

A los 14 dde el mayor porcentaje de biomasa se encontraba en las hojas, las cuales presentaron promedios que oscilaron entre 81 y 83%. A partir de los 28 dde se empezaron a observar flores e inicio de tuberización, disminuyendo la masa seca de hojas (MSH) a promedios entre 70 y 76%, mientras que la masa seca de tallos (MST) se presentó con promedios entre 20 y 21%. A partir de los 42 dde se observó que la masa seca en tubérculos (MS-tub) se fue incrementando de manera importante, mientras que la distribución de masa seca de hojas se fue disminuyendo al igual que la de masa seca en tallos. En el caso de la MSH, cayó de un promedio de 52,5% a los 42 dde a un promedio de 18,25% a los 84 dde, mientras que la MST cayó de un promedio de 26,75% a 16,75% en el mismo periodo de tiempo (Fig. 2.9).

En el último muestreo realizado a los 84 dde, se observaron promedios de biomasa en hojas entre 18 y 19%, mientras que en tubérculos ocupó el mayor porcentaje con promedios que oscilaron entre 58 y 67%, aumentando entre 7 y 12% respecto con el muestreo a los 70 dde (figura 2.11).

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento que se ajusta a lo reportado por Dwelle (1990) para la distribución de masa seca en plantas de papa. Este autor afirma que cuando el tubérculo aún no se ha formado, las reservas de la planta se encuentran repartidas en el tallo y las hojas, y posteriormente los asimilados son movilizados desde estos órganos para iniciar el engrosamiento del estolón. Kooman y Rabbinge (1996) también señalan que, de manera simultánea a la etapa de formación y llenado de tubérculos, ocurre una disminución en la asignación de fotoasimilados hacia los otros órganos, lo cual se pudo observar en esta investigación entre los 42 y 70 dde. Específicamente en papa variedad Criolla Colombia Soto *et al.*, (2018) reportan que la estabilización y posterior caída de las curvas de crecimiento representan los procesos de cese de acumulación de biomasa y traslocación de nutrientes hacia los órganos vertedero. Saldaña *et al.*, (2015) encontraron que la variedad Criolla Colombia alcanza una acumulación de masa seca máxima en tubérculos de 72,32%, esto al momento de la cosecha. Los resultados obtenidos, si bien son inferiores a estos reportes en cerca de 5% para la distribución de masa seca hacia los tubérculos, presentan el patrón de distribución característico para la variedad sin mostrar diferencias entre las distintas combinaciones de factores.

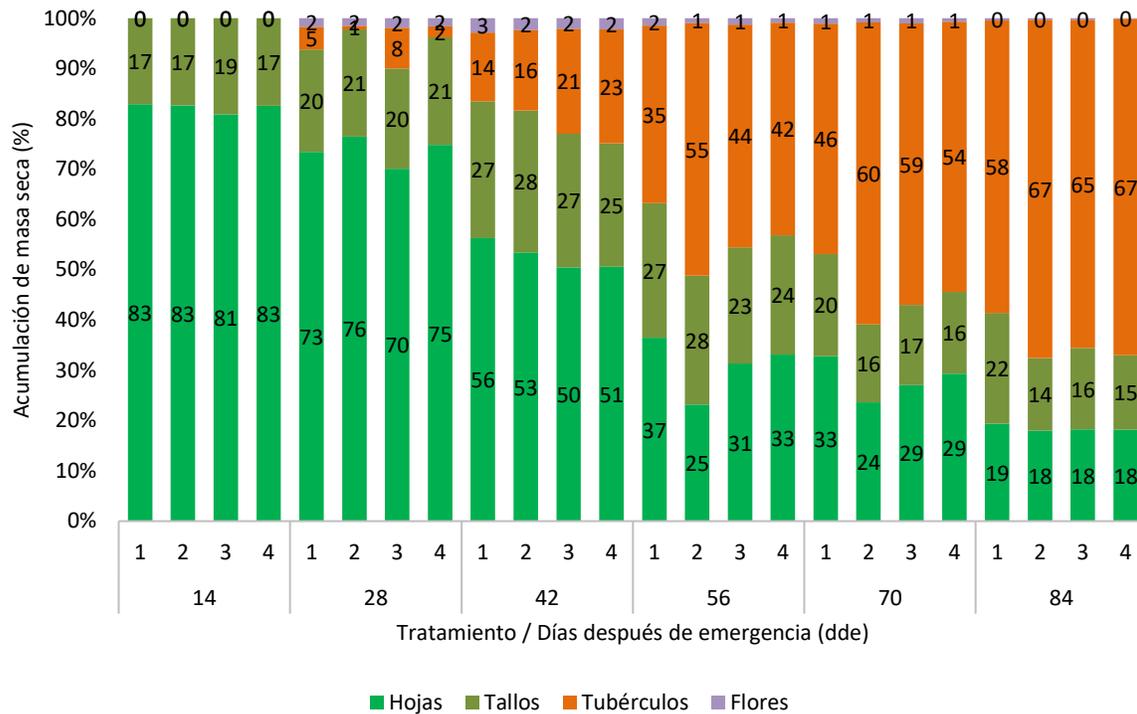


Figura 2.9 Distribución porcentual de masa seca para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel.

2.4.4 Índices de crecimiento

- **Modelo de crecimiento – Peso seco**

De acuerdo con los datos obtenidos de peso seco total en cada una de las combinaciones de factores se calcularon los parámetros para los modelos de crecimiento Logístico, Gompertz y Richards (Tab. 2.10) y se modelaron las curvas que presentaron el mejor ajuste.

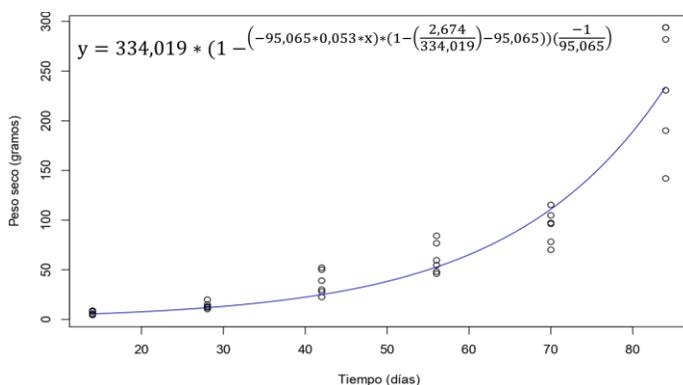
La combinación de dosis de fertilizante 25 g/planta sin recubrimiento de hidrogel presentó el mejor ajuste para el modelo de crecimiento de Richards ($R^2=0,893$). Esta combinación presentó una tasa de crecimiento máxima de $0,053 \text{ g día}^{-1}$ y una acumulación máxima de $334,019 \text{ g}$ (Fig. 2.10-A). En la misma dosis de fertilizante con recubrimiento de hidrogel, se presentó el mejor ajuste para el modelo de crecimiento de Richards ($R^2=0,737$). La tasa de crecimiento máxima alcanzada fue inferior ($0,299 \text{ g día}^{-1}$) frente a la combinación sin recubrimiento de hidrogel, así como también la acumulación máxima ($293,154$) (Fig. 2.10-B).

Los tratamientos correspondientes a dosis de 15 g/planta de fertilizante presentaron el mejor ajuste con el modelo de crecimiento de Richards. Sin recubrimiento de hidrogel la tasa de crecimiento máxima fue mayor ($0,0467 \text{ g día}^{-1}$) que recubrimiento de hidrogel

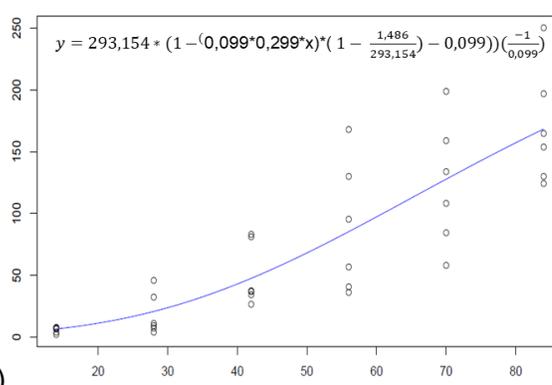
(0,035 g día⁻¹), sin embargo, en la acumulación máxima el resultado fue inverso sin recubrimiento de hidrogel la acumulación fue de 332,689 g y con hidrogel de 344,422 g (Fig. 2.11 C-D). Este resultado puede deberse, entre otras cosas, a que el valor inicial acumulado (y0) en la combinación sin hidrogel fue inferior (4,769 g) con respecto a la combinación con hidrogel (8,209 g). El modelo de Richards es utilizado frecuentemente para describir el crecimiento en plantas ya que presenta crecimiento con rendimientos crecientes en etapas tempranas acompañado de un crecimiento marginalmente decreciente antes de la madurez y hasta negativo en las etapas de senectud (Plata-Pérez *et al.*, 2017) mientras que el modelo de crecimiento de Gompertz es una función sigmoidea que describe el crecimiento más lento al comienzo y al final de un período de tiempo (Zwietering *et al.*, 1990).

Tabla 2.10 Parámetros calculados de modelos de crecimiento para la variable PesoSseco Total en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel.

Modelo	Parámetro	T1	T2	T3	T4
Logístico	y0	0,498	4,304	1,297	5,526
	Máx,	0,085	0,062	0,074	0,046
	K	349,999	213,341	349,999	349,999
	R ²	0,869	0,734	0,743	0,801
	CME	931,362	1210,040	2165,925	640,152
Gompertz	y0	1,0388	1,0808	3,5960	0,9187
	Máx,	0,043	0,0263	0,042	0,0230
	K	350,000	314,075	349,999	349,999
	R ²	0,829	0,737	0,718	0,791
	CME	1205,422	1199,054	2397,534	672,978
Richards	y0	2,674	1,486	4,769	8,209
	Máx,	0,053	0,299	0,047	0,035
	K	334,019	293,154	332,689	344,422
	β	95,065	0,099	96,210	98,683
	R ²	0,893	0,737	0,763	0,806
	CME	736,252	1199,861	1982,051	623,579



A)



B)

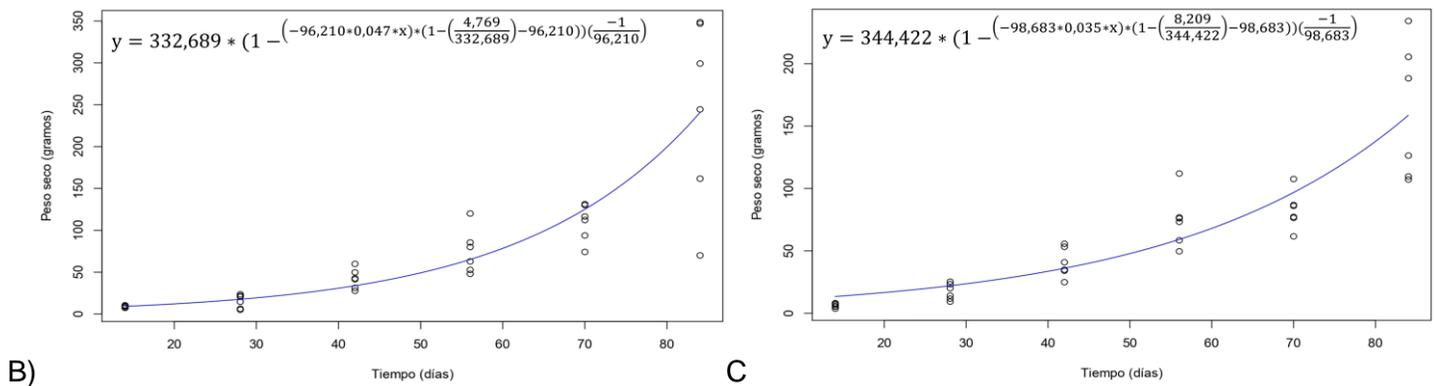


Figura 2.10 Curvas de crecimiento bajo el modelo Richards para la variable Peso Seco Total en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). (A) T1; 25 g/planta sin hidrogel, (B) T2; 25 g/planta con hidrogel, (C) T3; 15 g/planta sin hidrogel, (D) T4; 15 g/planta con hidrogel.

- **Modelo de crecimiento – Área foliar**

Con base en los resultados obtenidos para la variable área foliar, se calcularon los parámetros para los modelos de crecimiento Logístico, Gompertz y Richards (Tab. 2.11) y se modelaron las curvas que presentaron el mejor ajuste para cada una de las combinaciones de factores.

Para el crecimiento de área foliar todas las combinaciones de factores se ajustaron al modelo de crecimiento de Richards (Fig. 2.11), sin embargo, los valores de ajuste fueron bajos. El ajuste más alto lo presentó la combinación 25 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel ($R^2=0,663$), mientras que, bajo la misma dosis con recubrimiento de hidrogel, el ajuste fue el más bajo ($R^2=0,389$). Bajo la dosis de fertilizante de 15 g/planta sin hidrogel se presentó un $R^2=0,485$ y con hidrogel un $R^2=0,493$. La combinación correspondiente a fertilizante 25 g/planta sin hidrogel presentó una tasa de crecimiento máxima de $0,072 \text{ g día}^{-1}$ y una acumulación máxima de $8999,955 \text{ g}$. El tratamiento bajo la misma dosis de fertilizante en presencia del hidrogel presentó una tasa de crecimiento máxima de $0,064 \text{ g día}^{-1}$ y una acumulación máxima de $5530,498 \text{ g}$. Con fertilización de 15 g/planta sin hidrogel la tasa de crecimiento máxima fue de $0,038$ con una acumulación máxima de $8999,990 \text{ g}$, mientras que con hidrogel la tasa de crecimiento máxima aumentó hasta $0,053 \text{ g día}^{-1}$, pero disminuyó la acumulación máxima llegando a $4338,452 \text{ g}$.

Tabla 2.11 Parametros calculados de modelos de crecimiento para la variable PesoSseco Total en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel.

Modelo	Parámetro	T1	T2	T3	T4
	y0	599,999	300,000	462,411	440,648
Logístico	Máx,	0,046	0,105	0,056	0,079
	K	7997,390	5723,441	8999,999	4415,162

	R ²	0,659	0,3763	0,4762	0,4926
	CME	1660272	5314356	6634335	1466892
Gompertz	y0	433,654	300,005	300,000	300,002
	Máx,	0,025	0,055	0,033	0,043
	K	8999,996	6015,936	8999,999	4731,791
	R ²	0,6616	0,3544	0,4544	0,4902
	CME	1646766	5506579	6898383	1474028
Richards	y0	599,999	406,314	600,000	522,887
	Máx,	0,072	0,064	0,038	0,053
	K	8999,955	5530,498	8999,990	4338,452
	β	0,423	8,861	2,858	1,661
	R ²	0,6635	0,3899	0,4853	0,4930
	CME	1637512	5196028	6525593	1465990

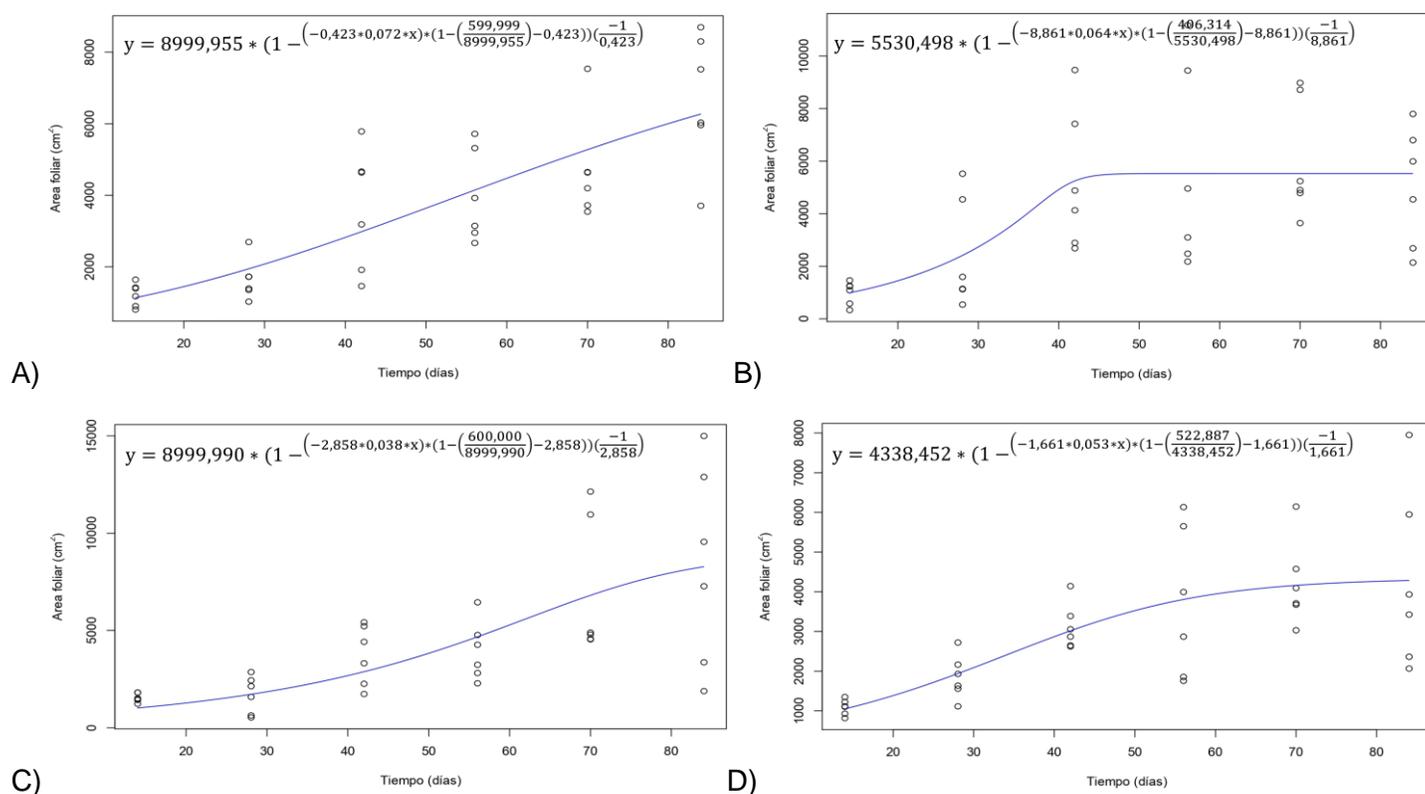


Figura 2.11 Curvas de crecimiento bajo el modelo Richards para la variable Área Foliar en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). (A) T1; 25 g/planta sin hidrogel, (B) T2; 25 g/planta con hidrogel, (C) T3; 15 g/planta sin hidrogel, (D) T4; 15 g/planta con hidrogel.

- **Índice de área foliar - IAF**

Esta variable no presentó diferencias significativas para el factor dosis de fertilizante, así como tampoco para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel y tampoco para la interacción entre los factores (Tab. 2.12). A los 14 dde se obtuvo un IAF el cual estuvo en un rango entre 0,330 y 0,408 para los tratamientos con dosis de

fertilizante 25 g/planta en presencia y ausencia del hidrogel respectivamente. A los 42 y 56 dde la combinación de dosis de fertilizante de 25 g/planta con recubrimiento de hidrogel fue superior a las demás combinaciones de factores, donde presentó un IAF de 1,749 y 1,852 respectivamente, mientras que la combinación de 15 g/planta de fertilizante con recubrimiento de hidrogel presentó el promedio más bajo con 1,040 y 1,237. A los 84 dde la dosis de fertilizante 15 g/planta sin hidrogel presentó el promedio de IAF más alto con 2,775 y con recubrimiento de hidrogel se presentó el menor IAF con 1,427 (Fig. 2.12).

Este índice permite relacionar el área foliar producida por la planta frente al área que la planta ocupa en el suelo. Esto es importante ya que el área foliar y la tasa de crecimiento foliar determinan la cantidad de masa seca cosechable derivada del proceso de fotosíntesis. Además, en la medida que exista un periodo más largo de ramificación, aparición de hojas nuevas y expansión del follaje, se puede alcanzar un IAF más alto y se retrasa el tiempo de la senescencia de follaje (Aldabe y Dogliotti, 2009). Los resultados obtenidos en este trabajo se ajustan a lo observado por González y Romero (2000) quienes reportan valores de IAF para *Solanum phureja* en un rango entre 5 y 6, con densidades de siembra entre 33,000 y 47,000 plantas por hectárea. Por el contrario, con respecto a lo reportado por Cabezas (2002), los resultados obtenidos son mayores ya que este autor reporta que en papa *Solanum phureja* alcanzó valores de IAF en un rango entre 3,3 y 4, a una altitud de 2560 msnm y densidades de siembra entre 27,780 y 83,300 plantas por hectárea. Esta variabilidad en la IAF corresponde a las diferencias de condiciones ambientales, climáticas y de manejo agronómico que inciden sobre la respuesta fisiológica y morfológica de las plantas las cuales expresan su fenotipo de manera diferenciada y por lo tanto modifican factores como la IAF con el fin de aumentar el área foliar y con ello la eficiencia fotosintética (Cabezas, y Corchuelo, 2005).

Tabla 2.12 Cuadrados medios para la Índice de Área Foliar (IAF) en la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dde	Cuadrado medio fuentes de variación				CV%
	Bloque	Dosis (D)	Hidrogel (H)	D x H	
14	0,022 n.s.	0,0672 n.s.	0,299 n.s.	0,112 n.s.	16,087
28	0,173 n.s.	0,001 n.s.	0,051 n.s.	0,024 n.s.	16,887
42	1,358 n.s.	0,364 n.s.	0,431 n.s.	0,213 n.s.	22,315
56	1,596 n.s.	0,405 n.s.	0,168 n.s.	0,213 n.s.	37,023
70	2,450 n.s.	0,028 n.s.	1,030 n.s.	3,154 n.s.	41,436
84	1,226 n.s.	0,784 n.s.	1,124 n.s.	0,738 n.s.	29,866

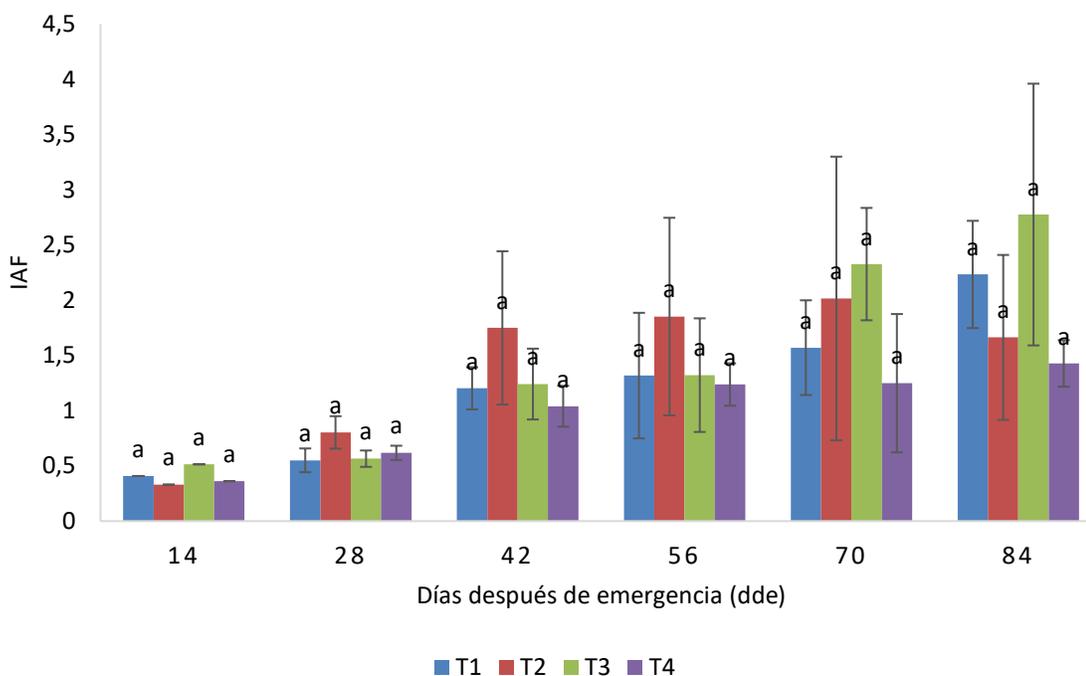


Figura 2.12 Índice de área foliar (IAF) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Las barras indican la desviación estándar (n=6).

- **Tasa relativa de crecimiento - TRC**

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran el descenso progresivo en la TRC: el tratamiento correspondiente a la combinación de 25 g/planta de fertilizante con recubrimiento de hidrogel presentó el promedio más alto entre los 42 ($0,111 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$) y 56 dde ($0,040 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$), disminuyendo a una tasa mayor respecto a las demás combinaciones de factores, hasta llegar a una TRC de $0,023 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ a los 84 dde. De otro lado, el tratamiento correspondiente a la combinación de 25 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel, presentó menor tasa de disminución en la TRC pasando de $0,050 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ a los 28 dde hasta $0,016 \text{ g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ a los 70 dde, promedio que junto con la combinación de 15 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel, presentaron la TRC más alta al finalizar el ensayo (Fig. 2.13). La TRC inicia generalmente con valores altos y progresivamente se presenta una disminución hasta alcanzar valores cercanos a cero (Santos, 2010), ello es debido a que al inicio del ciclo de cultivo hay una rápida acumulación de biomasa en hojas y tallos, para luego pasar a realizar una translocación de nutrientes hacia los órganos de vertedero (Soto *et al.*, 2018).

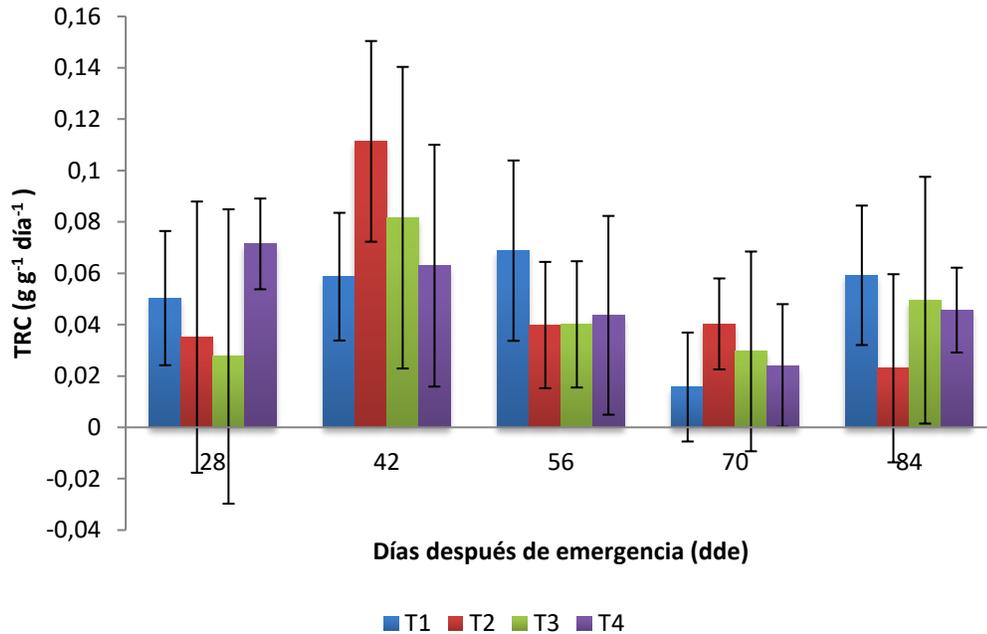


Figura 2.13 Tasa relativa de crecimiento (TRC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Las barras indican la desviación estándar (n=6).

- **Tasa absoluta de crecimiento - TAC**

En esta investigación se observó que los tratamientos sin recubrimiento de hidrogel en sus dos dosis (25 y 15 g/planta de fertilizante), en general, presentaron promedios más altos a través de todo el ciclo del cultivo con respecto a los tratamientos con recubrimiento de hidrogel. El tratamiento correspondiente a 25 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel inició a los 28 dde con una TAC de 0,448 g día⁻¹ para finalizar a los 84 dde con un promedio de 8,452 g día⁻¹, mientras que el tratamiento correspondiente a 15 g/planta de fertilizante, también sin recubrimiento de hidrogel, inició a los 28 dde con una TAC de 0,457 g día⁻¹ y terminó a los 84 dde con un TAC de 9,709 g día⁻¹. Los tratamientos con recubrimiento de hidrogel presentaron promedios menores iniciando con una TAC de 0,201 g día⁻¹ a los 28 dde y finalizando con 3,025 g día⁻¹ a los 84 dde para la dosis 25 g/planta de fertilizante, mientras que con 15 g/planta de fertilizante, la TAC fue de 0,793 g día⁻¹ a los 28 dde y de 5,699 g día⁻¹ a los 84 dde (Fig. 2.14). Los promedios de TAC más altos se presentaron a los 84 dde cuando los tratamientos sin hidrogel lograron una TAC mayor frente a los tratamientos con hidrogel, coincidiendo con el periodo de mayor incremento de masa seca en tubérculos. Contrario a la TRC, la TAC refleja la ganancia acumulada de peso a través del tiempo (Gómez *et al.*, 1999) y permite identificar la fase de crecimiento del cultivo cuando se alcanza la mayor acumulación de masa seca, la cual usualmente está relacionada con las fases de desarrollo de los órganos de interés comercial (Santos, 2010).

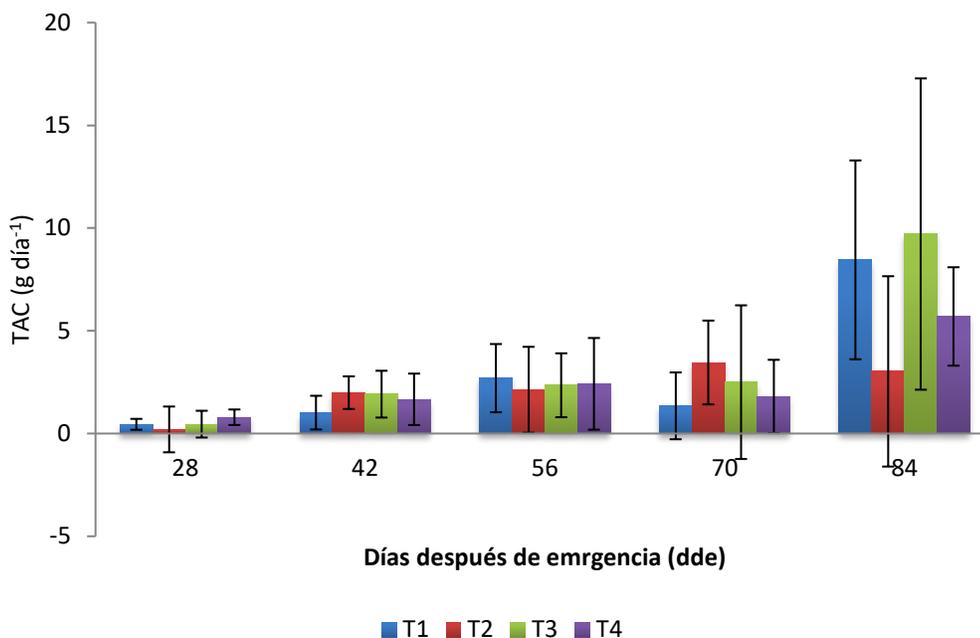


Figura 2.14 Tasa absoluta de crecimiento (TAC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Las barras indican la desviación estándar (n=6).

- **Tasa de crecimiento del cultivo - TCC**

Este índice muestra la ganancia de peso de una comunidad de plantas por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo por lo que es un importante índice que mide la productividad agrícola (Hunt, 1978). Los promedios más altos se observaron en los tratamientos sin recubrimiento de hidrogel a lo largo del ciclo de cultivo respecto a los tratamientos con recubrimiento de hidrogel. El tratamiento que corresponde a la dosis de 25 g/planta de fertilizante con recubrimiento de hidrogel, presentó el promedio más bajo a los 28 dde ($0,00007 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), sin embargo, presentó un aumento más acelerado con respecto a los otros tratamientos por lo que a los 84 dde presentó un promedio similar a los demás tratamientos ($0,00101 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). El tratamiento con 25 g/planta de fertilizante sin recubrimiento de hidrogel presentó la menor tasa de aumento en la TCC, pasando de un promedio de $0,00015 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a los 28 dde a $0,00282 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ a los 84 dde. Los tratamientos correspondientes a la dosis de 15 g/planta de fertilizante con y sin recubrimiento de hidrogel, presentaron un promedio en la TCC de $0,00015$ y $0,00026 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ respectivamente a los 28 dde, para finalizar a los 84 dde con promedios de $0,00324 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ sin recubrimiento de hidrogel y $0,00190 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ con recubrimiento de hidrogel (Fig. 2.15). Los resultados obtenidos en esta investigación son contrarios a los encontrados por Santos (2010), quien reportó un aumento y un valor máximo entre los 40 y 60 dde para luego disminuir progresivamente, mientras que en la vereda San Rafael se observó un aumento continuo, probablemente asociados a la diferencia en las

condiciones ambientales. La TCC usualmente presenta una tendencia similar a la TAC con la diferencia que la TCC indica la ganancia en peso de una comunidad de plantas, por unidad de área de suelo y por unidad de tiempo, indica la productividad agrícola (Hunt, 1978). Es por esto que los resultados obtenidos presentan una tendencia similar a los presentados en la TAC.

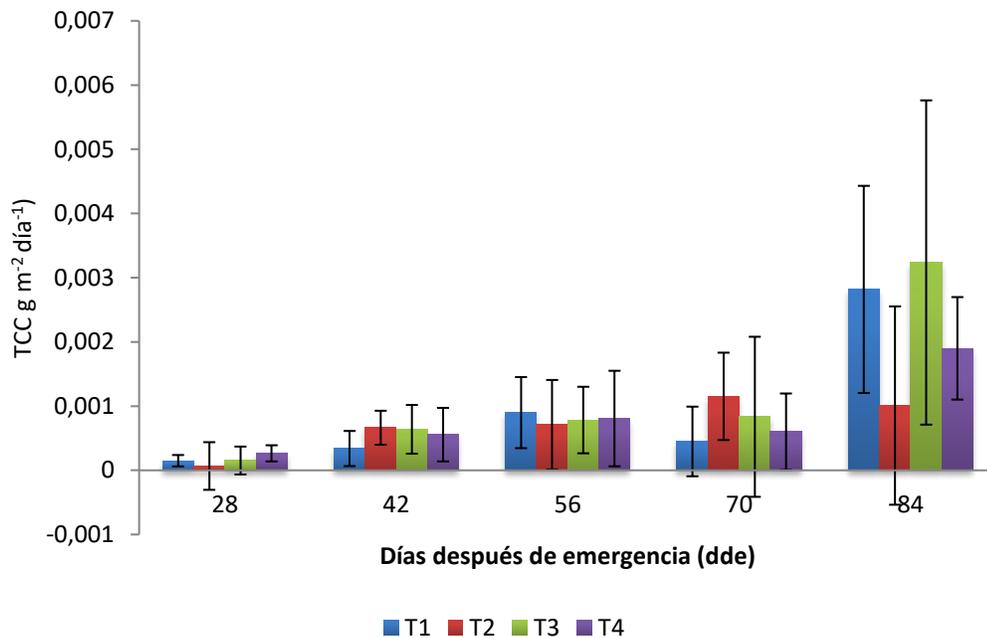


Figura 2.15 Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté). T1; 25 g/planta sin hidrogel, T2; 25 g/planta con hidrogel, T3; 15 g/planta sin hidrogel, T4; 15 g/planta con hidrogel. Las barras indican la desviación estándar (n=6).

2.5 Conclusiones

Las dos dosis de fertilizante evaluadas no afectaron las variables de contenido relativo de clorofila, la acumulación y distribución de masa seca en hojas, tallos, tubérculos y flores y, consecuentemente, no se modificaron los índices de crecimiento IAF, TRC, TAC y TCC, evaluadas en plantas de papa de la variedad Criolla Colombia. Esto es importante ya que una menor dosis no implica una modificación sobre las variables de crecimiento en plantas de papa variedad Criolla Colombia bajo las condiciones evaluadas.

El uso del recubrimiento de hidrogel a base de carragenina en plantas de papa de la variedad Criolla Colombia modificó la acumulación de masa seca en hojas, tallos, tubérculos y total al inicio y al final del ciclo de cultivo.

Bibliografía

- Aldabe, I. y Dogliotti, s. 2009. Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa (*solanum tuberosum* L). en curso de fisiología de cultivos. Ciclo de formación central agronómica. Universidad de la República. Uruguay. 16 p.
- Ariza, W. A. 2017. Respuestas fisiológicas, bioquímicas y rendimiento en tres variedades de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) en déficit hídrico. Tesis Magíster en Ciencia Agrarias Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Bernal, J., & Espinosa, J. 2003. Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos. Instituto de la Potasa y el Fósforo. INPOFOS. Quito, Ecuador.
- Blaylock, A., Kaufmann, J., & Dowbenko, R. 2005. Nitrogen fertilizer technologies. *Adv Agric.* 6, 8-13.
- Bley, H., Gianello, C., Santos, L., & Roldão, L. P. 2017. Nutrient Release, Plant Nutrition, and Potassium Leaching from Polymer-Coated Fertilizer. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 41, e0160142.
- Boominathan, R., Saha-Chaudhury, N.M., Sahajwalla, V., & Doran, P.M. 2004. Production of nickel bioore from hyperaccumulator plant biomass: Applications in phytomining. *Biotechnol. Bioeng.* 86, 243–250.
- Cabezas, M. 2002. Estimación de la interceptación de la radiación solar en papa criolla (*Solanum phureja*, Juz, et Buk.) en tres localidades colombianas. Trabajo de Grado Maestría. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. 122 p.
- Cabezas, M., & Corchuelo, G. 2005. Estimación de la interceptación de la radiación solar en papa criolla (*Solanum phureja* Juz. et Buk.) en tres localidades colombianas. *Agronomía Colombiana*, 23(1), 62-73.
- Campillo, C., Prieto, M. H., Daza, C., Moñino, M. J., & García, M. I. 2008. Using Digital Images to Characterize Canopy Coverage and Light Interception in a Processing Tomato Crop. *HortScience*. 43, 1780-1786.
- Coelho, F.S., Fontes, P.C.R., Puiatti, M., Neves, J.C.L., Silva, M.C.C. 2010. Dose de nitrogênio associada à produtividade de batata e índices do estado de nitrogênio na folha. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 34(4), 1175-1183.
- Di Benedetto, A. & Tognetti, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 42(3), 258-282.
- Dwelle, R. 1990. Source/sink relationships during tuber growth. *Am. Potato J.*, 67(12), 829-833.
- Federación Colombiana de Productores de Papa [Fedepapa] y Fondo Nacional de Fomento de la papa [FNFP]. 2017. Competencias organizacionales, generalidades del sector. *Revista Papa*, 43, 9-12.
- Gómez, C., Buitrago, C., Cante, M., Huertas, B. (1999). Ecofisiología de papa (*Solanum tuberosum*) utilizada para cultivo fresco y para la industria. *Revista Comalfi*. 25, 42–55.

- González, J. y H. Romero. 2000. Incidencia de la época de aporque sobre la papa criolla (*Solanum phureja* Juz. et Buk.), bajo tres densidades de siembra en dos localidades. Trabajo de grado. Institución Universitaria de Ciencias Aplicadas y Ambientales UDCA 114 p.
- Giletto, M., Echeverría, E. y Sandras, V. 2003. Fertilización nitrogenada en cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Sudeste Bonaerense. *Ciencia del Suelo*, 21, 44-51.
- Gutiérrez-Gutiérrez, A., & Muñoz, J. 2009. Interacción genotipo por ambiente de siete variedades de papa en la zona papera de Chiriquí, Panamá. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 15(1), 12-19.
- Hunt, R. 1978. Plant growth analysis. Edward Arnold Publishers, London. 67 p.
- Kooman, P., & Rabbinge, R. 1996. An analysis of the relation between dry matter allocation to the tuber and earlines of a potato crop. *Ann. Bot.* 77, 235-242.
- Körner, C. 2015. Paradigm shift in plant growth control. *Curr. Opin. Plant Biol.* 25,107-114.
- Krug, H. 1997. Environmental influences on development growth and yield. En: H.C. Wien (ed.) The physiology of vegetable crops. CABI Publishing. London, pp. 101 - 180.
- Kumar, C.V., Prakash, S.S., Prashantha, G.M., Mahendra Kumar, M.B., Lohith, S., & Chikkaramappa, T. 2013. Dry matter production and yield of potato as influenced by different sources and time of fertilizer application and soil chemical properties under rained conditions. *Res. J. Agric. Sci.* 4(2), 155-159
- Meza, K. E., Lépiz, R., López, J. de J., & Morales, M. M. 2015. Caracterización morfológica y fenológica de especies silvestres de frijol (*Phaseolus*). *Rev. Fitotec. Mex.* 38(1), 17-28.
- Mohr, R. & Tomasiewicz, D.L. 2012. Effect of rate and timing of potassium chloride application on the yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L. 'Russet Burbank'). *Can. J. Plant Sci.* 92, 783-794. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-195>
- Mahmud, A. Al, Hossain, M., Kadian, M. S., & Hoque, M. A. (2015). Physiological and biochemical changes in potato under water stress condition. *Indian J. Plant Physiol.* 20(4). <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0173-4>
- Murillo, R. L., Cunuhay, K. E., Trávez, R. T., Méndez, C. U., Coronel, A. E., & Albornoz, A. B. 2016. Respuesta de variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) a la aplicación de abonos orgánicos y fertilización química. *Revista Ciencia y Tecnología*, 9(1), 11-16.
- Nava, G., Dechen, A. & Luchi, V. 2007. Produção de tubérculos de batata-semente em função das adubações nitrogenada, fosfatada e potássica. *Hortic. Bras.* 25, 365-370. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000300009>
- Oosterhuis, D.M., & Howard, D.D. 2008. Evaluation of slow-release nitrogen and potassium fertilizers for cotton production. *Afr. J. Agric. Res.* 3, 68-73.
- Plata Pérez, L., González Ramírez, P. I., & Calderón Sánchez, E. 2017. La función de crecimiento de Richard y los modelos de crecimiento neoclásicos. *EconoQuantum*, 14(1), 99-118.

-
- Rhim, J., & Wang, L. 2013. Mechanical and water barrier properties of agar/ κ -carrageenan/konjac glucomannan ternary blend hydrogel films. *Carbohydr. Polym.* 96 (1),71-81.
- Rozo, G., & Rozo, C. 2006. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Obtenido de <https://www.utadeo.edu.co/es/investigacion/departamento-de-ciencias-basicas/5121/sintesis-de-un-gel-superabsorbente-por>
- Saldaña, V., Tatiana, M., Patiño, J. A., & Cotes, J. M. 2015. Biomass distribution and allocation in diploid potato varieties (*Solanum phureja* Juz. et Buk.). *Agronomía Colombiana*, 33(3), 322-329. <https://dx.doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n3.50237>
- Santamría Vanegas, J., Rozo Torres, G., & Barreto Campos, B. J. 2019. Characterization of a κ -Carrageenan Hydrogel and its Evaluation as a Coating Material for Fertilizers. *J. Polym. Environ.* 27, 774–783.
- Santos, M. 2010 Evaluación del crecimiento, desarrollo y componentes de rendimiento de cuatro cultivares de papa criolla en dos localidades del departamento de Cundinamarca. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Silva Parra, A., Albornoz Bucheli, C., & Criollo Escobar, H. 2017. Efecto del potasio y la densidad de siembra en la producción de papa *Solanum tuberosum* Grupo Phureja var. Criolla Guaneña. *Temas Agrarios*, 23(1), 37-46.
- Soto, F., Plana, R., & Hernández, N. 2009. Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas del trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. ativum) y triticale (*Triticum secale* Wittmack) y su relación con el rendimiento. *Cultrop.* 30(3), 32-36.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. Plant Physiology. 5th Edition, Sinauer Associates, Inc., Sunderland.
- Ulloa Ibarra, J. T., & Rodríguez Carrillo, J. A. 2010. El modelo logístico: Una alternativa para el estudio del crecimiento poblacional de organismos. REDVET. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 11(3).
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., van 't Riet, K. 1990. Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Appl. Environ. Microbiol.* 56 (6) 1875-1881.

3. Rendimiento de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) fertilizada con NPK con y sin recubrimiento de hidrogel

3.1 Resumen

La fertilización es de gran importancia para la nutrición de los cultivos y algunos elementos minerales que no son tomados por las plantas pueden llegar a las aguas subterráneas causando contaminación ambiental. Con el fin de reducir la contaminación y pérdida de nutrientes, se han desarrollado recubrimientos de fertilizantes que permiten la liberación lenta de los elementos al suelo. Aquí se reporta el rendimiento, índice de cosecha y gravedad específica en papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja), cultivada en la vereda San Rafael del municipio de Sibaté, bajo dos dosis de fertilizante NPK en presencia y ausencia de un recubrimiento de hidrogel a base de carragenina. Este estudio se realizó bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar con arreglo factorial 2x2 y tres repeticiones. No se encontraron diferencias en el rendimiento de tubérculos bajo las diferentes dosis de fertilizante y tampoco en presencia o ausencia del hidrogel. Tampoco se presentaron diferencias en el índice de cosecha (IC) y en la gravedad específica (GE) de los tubérculos. Estos resultados son favorables ya que el uso de fertilizante recubierto con hidrogel y una menor dosis de fertilizante aplicada, no afecta la productividad y, además, sugieren que existe una sincronización entre la liberación de los nutrientes y el llenado de tubérculos al final del ciclo productivo.

Palabras clave: Producción, gravedad específica, papa diploide, fertilizante recubierto, carragenina.

3.2 Introducción

En Colombia la papa diploide conocida como papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja), representa un 7% de la producción nacional (Fedepapa y FNFP, 2017). En el país el programa de mejoramiento genético de papa de la Universidad Nacional de Colombia ha registrado ocho variedades diploides de fenotipo redondo amarillo, típico de lo que se conoce como papa criolla, dentro de ellas la variedad Criolla Colombia (Ñústez, 2018). La fertilización en el sistema productivo de papa tetraploide representa entre el 20% y el 25% de los costos totales de producción (Fedepapa y FNFP, 2017), ello destaca la importancia que tiene este rubro y, por lo tanto, es fundamental que se haga de manera eficiente, con el fin de reducir pérdidas y aumentar rendimientos y calidad.

La fertilización nitrogenada en papa es crucial ya que el nitrógeno desempeña un rol fundamental en su crecimiento y desarrollo y afecta directamente el rendimiento y calidad

de los tubérculos (Gastal y Lemaire. 2002). Por su parte, el fósforo es esencial para la formación de ATP y, por tanto, incide en la síntesis de almidón (Pumisacho y Sherwood, 2002). El potasio es el nutriente mineral con las mayores demandas en papa; su manejo es importante para asegurar un alto rendimiento y calidad de tubérculos (Zorb *et al.*, 2014).

Con el fin de aumentar los rendimientos y disminuir el impacto ambiental y los costos de producción sin afectar la calidad de los tubérculos, se han desarrollado tecnologías de liberación controlada de fertilizantes. Ke *et al.*, (2018) evaluaron la aplicación al voleo y a una profundidad de 5 cm de urea recubierta con azufre (SCU), urea recubierta de polímero (PCU) y una combinación de estos dos (BBF) en un cultivo de arroz en la China. Estos autores concluyen que el BBF presentó los mayores rendimientos en comparación con el control de fertilización convencional además de las menores tasas de lixiviación de nitrógeno (N), esto, independientemente del modo de aplicación, lo que resulta en una alternativa promisorio para mejorar la eficiencia de la fertilización. En papa variedad Favorita (*Solanum tuberosum* L.), Gao *et al.*, (2015) evaluaron el rendimiento y calidad de tubérculos usando para la fertilización urea recubierta con polímero (PCU) y un recubrimiento polimérico sobre urea recubierta de azufre (PSCU). El rendimiento en los tratamientos donde se utilizaron los recubrimientos aumentó entre un 8.77% y 26.46%. Asimismo, el porcentaje de tubérculos de calidad comercial aumentó significativamente, tanto para los tratamientos con PCU como para los tratamientos con PSCU. En forma negativa reportaron que la fertilización nitrogenada afectó el contenido de almidón en los tubérculos y que, conforme aumenta la dosis de N, disminuye el uso eficiente del N, por lo tanto, recomiendan aplicaciones moderadas de este elemento.

En variedades del Grupo Phureja aún no se han evaluado tecnologías de liberación controlada de fertilizante. La fertilización, el manejo agronómico y las condiciones edafoclimáticas son variables que influyen directamente sobre el rendimiento de las variedades del Grupo Phureja. Roza y Núñez (2011) reportaron que la aplicación de P entre 50 y 150 kg ha⁻¹ incide sobre el rendimiento de tubérculos de categoría primera, segunda y rendimiento total con respecto a la fertilización sin P para la variedad Criolla Colombia en una localidad del municipio de Zipaquirá, Colombia. El promedio para la categoría primera fue superior a 14 t ha⁻¹, para la categoría segunda mayor a 10 t ha⁻¹ y para el rendimiento total superior a 25 t ha⁻¹. Interesantemente, estos autores no encontraron diferencias cuando se aplicaron dosis de 0, 50, 100 y 150 kg ha⁻¹ de K en la misma localidad ni para la interacción entre P y K. Rodríguez *et al.*, (2009) también reportaron el rendimiento total de tubérculos para la variedad Criolla Colombia en seis diferentes localidades en el departamento de Antioquia, Colombia los cuales variaron entre 11,5 y 19,48 t ha⁻¹.

El análisis de parámetros como GE e IC son importantes ya que valores superiores 1,08 para GE indican buena acumulación de masa seca, factor de calidad importante para consumo fresco (Rivera *et al.*, 2006). Rodríguez *et al.*, (2009) encontraron que la variedad Criolla Colombia presenta valores de GE superiores a los presentados por otras variedades del Grupo Phureja los cuales están entre 1,0708 y 1,1016. El IC indica la

relación entre la biomasa total y la biomasa de interés comercial, es decir, en el caso de la papa, los tubérculos. En papa variedad Criolla Colombia, Cabezas (2002) encontró un índice de cosecha de 57,21%, el cual puede variar también fácilmente de acuerdo con las condiciones de fertilización del cultivo.

En Colombia, Rozo y Rozo (2006) sintetizaron un gel superabsorbente por copolimerización de poliacrilamida y k-carragenina aislada del alga roja (*Hypnea musciformis*) el cual mostró buena fuerza de gel y alta capacidad de absorción, es decir, pueden absorben hasta diez mil veces su peso en agua, sin disolverse ni perder su integridad, lo que permite proponerlo como un gel hidroretenedor para uso en diferentes tipos de suelos. La carragenina pertenece a una familia de polisacáridos sulfatados presentes en la pared y la matriz de las algas rojas en la clase Rhodophyceae. Estos polisacáridos son aniónicos; con alto peso molecular; un contenido de 15-40% de éster-sulfato; y una estructura química de d-galactosa y 3,6-anhidrogalactosa (3,6 AG), que se unen a través de α -1,3- y β -1,4-glucosídico (Rhim & Wang, 2013). En el año 2017, se propuso una nueva formulación para el hidrogel a base de carragenina, sin poliacrilamida, cuyas características fisicoquímicas y resultados de evaluación en laboratorio sugieren que este hidrogel puede ser un buen candidato para ser utilizado como recubrimiento de fertilizantes NPK con el objetivo de disminuir la pérdida de nutrientes por lixiviación (Santamaría *et al.*, 2019). En este sentido, es importante considerar la aplicación de fertilizantes recubiertos con hidrogel a base de carragenina en cultivos de papa, por cuanto en Colombia éste es un cultivo con sistemas productivos basados en la aplicación de compuestos con altas dosis de elementos minerales. El objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento, índice de cosecha (IC) y gravedad específica (GE) de tubérculos de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la aplicación de diferentes dosis de fertilizante NPK con y sin recubrimiento de hidrogel a base de carragenina.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Localización y diseño experimental

El ensayo se estableció en el municipio de Sibaté, departamento de Cundinamarca, en la vereda San Rafael a una altitud de 2720 msnm (N 04°28'37,2'' W 74°17'17,5'') entre abril y agosto de 2018. Se utilizó semilla seleccionada de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) obtenida de los agricultores de la región. Se presentó un suelo andisol con textura franco-arenosa, pH de 5.59, ligeramente ácido; una saturación de bases alta y alto contenido de materia orgánica. Las características físico-químicas del suelo se presentan en la tabla 2.1.

El experimento se realizó bajo un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial 2x2, con tres repeticiones y unidades experimentales de 15 m². Cada unidad experimental consistió de dos surcos distanciados por 1 m y 25 sitios de siembra por

surco, distanciadas 0,3 m. La precipitación se midió diariamente empleando un pluviómetro convencional, registrando 214,5 mm en el ciclo de cultivo. La temperatura promedio fue de 13,8 °C de acuerdo con el programa de simulación Marksim de CIAT para el modelo de simulación GISS y RCP 6.0. No se realizó riego suplementario. El primer factor fue el fertilizante N-P-K (15-15-15) con dos niveles, 25 g/planta (833,3 kg·ha⁻¹) y 15 g/planta (500 kg·ha⁻¹), y densidad de 33,333 plantas/ha. El segundo factor fue el recubrimiento con hidrogel (ausente y presente). Se realizó una sola fertilización al momento de la siembra. La fuente utilizada para la aplicación de los elementos fue abono granulado VECOL 15-15-15-11 (N total 15%, P₂O₅ 15%, K₂O 15%, 11% S), el cual contiene N amoniacal en su totalidad, P como fosfato monoamónico (MAP), K como KCl y azufre (S) como sulfato diamónico. De esta manera los tratamientos se establecieron así: Tratamiento 1; 25 g/planta en ausencia de hidrogel, Tratamiento 2; 25 g/planta en presencia de hidrogel, Tratamiento 3; 15 g/planta en ausencia de hidrogel, Tratamiento 4; 15 g/planta en presencia de hidrogel.

3.3.2 Análisis de rendimiento

Al momento de la cosecha, se realizó una evaluación de la producción tomando todos los tubérculos en cada unidad experimental para clasificarlos y pesarlos en tres categorías: primera (>4 cm ø), segunda (2-4 cm ø) tercera (<2 ø) (Pérez, 2008). Con estos resultados se estimó el rendimiento de tubérculo en cada parcela en t ha⁻¹.

3.3.3 Índice de cosecha

El índice de cosecha (IC) se estimó como la relación porcentual entre el rendimiento económico y el rendimiento biológico con base en los datos de masa seca por órgano y total, tomados a partir de los muestreos al momento de la cosecha tomando 32 plantas en total en cada unidad experimental, mediante la fórmula:

$$IC = \left(\frac{\text{Peso seco de tubérculos}}{\text{Peso seco total de la planta}} \right) \times 100$$

3.3.4 Gravedad específica

De cada parcela se tomaron aleatoriamente 10 tubérculos de calidad primera y se determinó la gravedad específica en laboratorio luego de la cosecha, mediante el método del peso en agua y peso en aire (CIP, 2010).

$$\text{Gravedad específica} = \left(\frac{\text{Peso aire}}{\text{Peso aire} - \text{Peso agua}} \right)$$

3.3.5 Análisis estadístico

Los datos se analizaron bajo un ANOVA para cada variable y prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0.05. Se realizó verificación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. El análisis de los datos se realizó con el software estadístico R STUDIO.

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Rendimiento de tubérculo

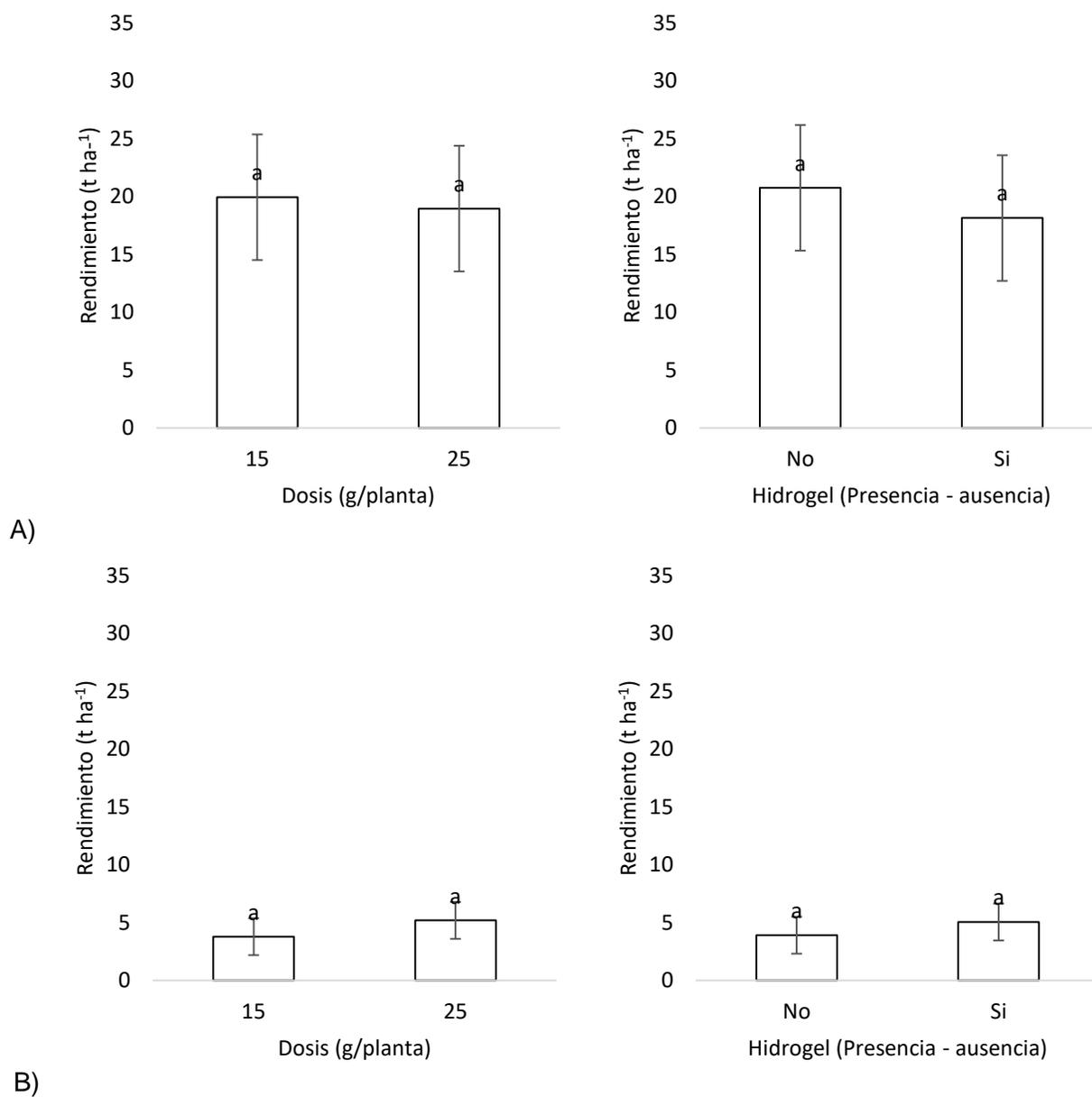
En esta variable de rendimiento de tubérculos en sus diferentes categorías no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para los factores de fertilización y recubrimiento ni para la interacción entre ellos. Para la categoría primera, la cual mostró los rendimientos más altos, la dosis de 15 g/planta de fertilizante presentó un promedio de 19,93 t ha⁻¹, mientras que para la dosis de 25 g/planta el promedio fue de 18,95 t ha⁻¹. En el caso de la presencia o ausencia del hidrogel en esta misma categoría, cuando se utilizó el recubrimiento de hidrogel a base de carragenina se logró un rendimiento de 18,13 t ha⁻¹; cuando no se usó el rendimiento fue de 20,74 t ha⁻¹ (Fig. 3.1).

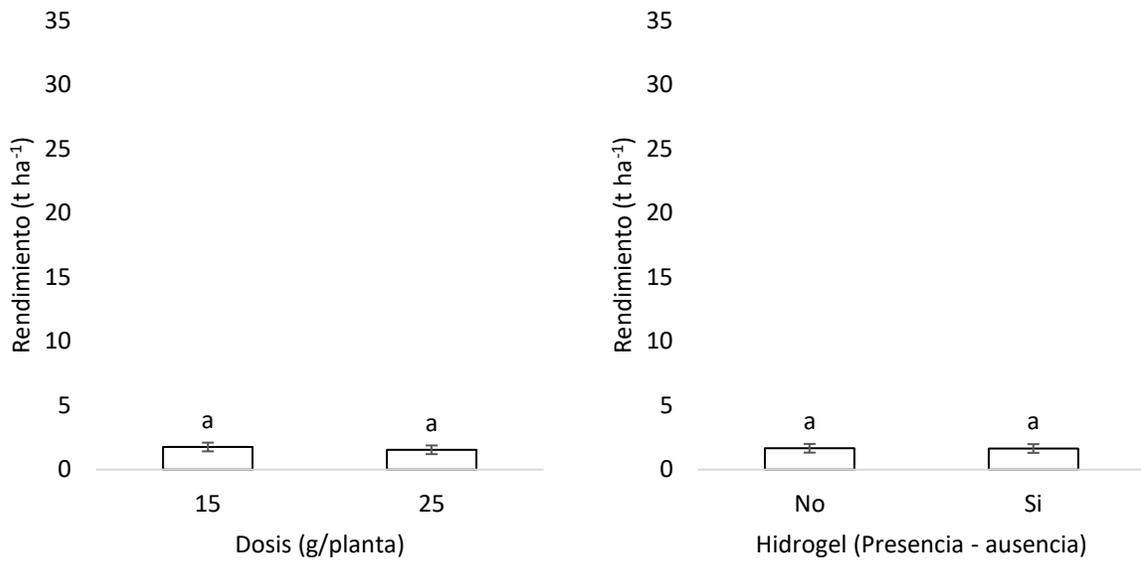
Estos resultados indican que el rendimiento tanto por categoría como el total, fue igual estadísticamente para las dosis evaluadas (15 y 25 g/planta) lo que evidencia que la variedad requiere niveles bajos de fertilización en suelos con buenos niveles de nutrición. De la misma manera se evidenció que el recubrimiento con hidrogel de carragenina no influyó en la respuesta del rendimiento, al igual que esta respuesta evidenció que no afectó la liberación de los nutrientes de la matriz que encapsulaba el fertilizante, aspecto que es interesante como resultado para su uso con fertilizantes. El rendimiento total en el experimento osciló entre 24,57 y 26,26 t. ha⁻¹ (Fig. 3.1).

En resultados obtenidos en cultivares *Solanum tuberosum* L. subsp. *tuberosum* donde el tamaño de tubérculos, en la mayoría de variedades, es superior, se ha reportado un aumento significativo en el rendimiento total de tubérculos de 8,77–26,46% cuando se usó la urea de liberación controlada (CRU) respecto a la urea recubierta con polímero (PCU) y el recubrimiento de polímero de urea recubierta con azufre (PSCU) Gao *et al.*, (2015). Resultados similares reportan Song *et al.*, (2014), con fertilizantes recubiertos con paligorskita, obteniendo rendimiento total de tubérculos con un 14,6–20,3% más alto respecto a los tratamientos de fertilizante sin recubrimiento. En papa variedad Criolla Colombia, ni ninguna otra diploide se tienen reportes previos de rendimiento de tubérculo con el uso de fertilizantes con recubrimiento, no obstante, los resultados de rendimiento total obtenidos en este trabajo estuvieron en línea con lo reportado por Villa y Barrientos (2012), quienes encontraron un rendimiento total de 21,2 t ha⁻¹ cuando se aplicaron 2 Kg ha⁻¹ de Mn respecto a un rendimiento de 13,9 t ha⁻¹ cuando no se usó Mn. Bautista *et*

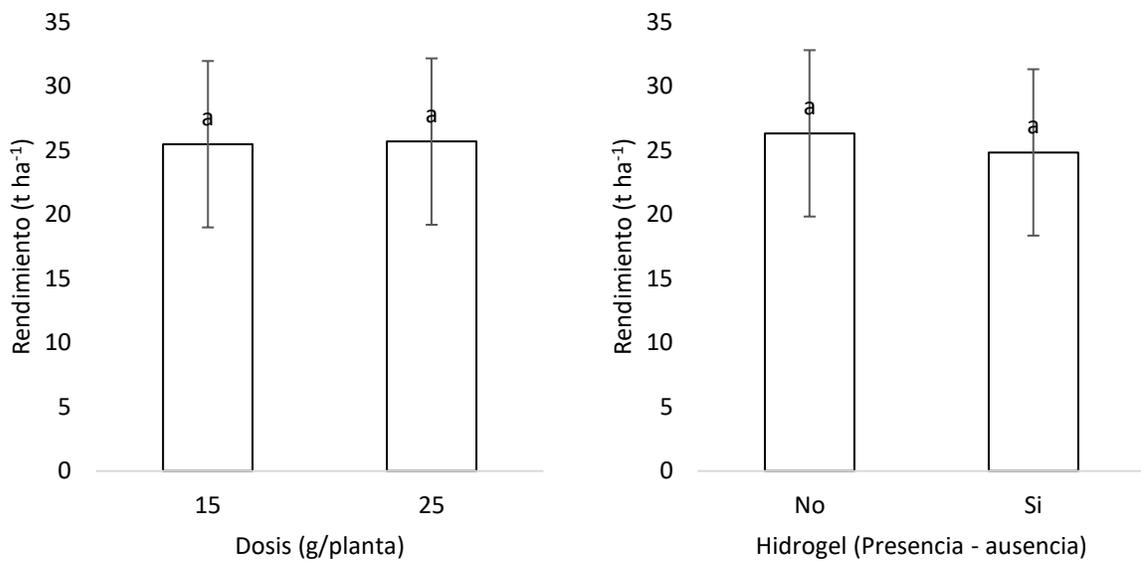
al., (2012) reportaron rendimientos totales que entre 11,8 t ha⁻¹ hasta las 23,1 t ha⁻¹ con tratamientos de fertilización nitrogenada en dosis entre 0 y 175 kg ha⁻¹.

Los resultados obtenidos muestran que no hay una interferencia del hidrogel en la liberación de nutrientes que conlleve a cambios significativos en el rendimiento de tubérculos. Por el contrario, se evidencia que los rendimientos alcanzados se encuentran dentro de los rangos reportados para la variedad Criolla Colombia. Esto es un resultado positivo ya que se puede inferir que las propiedades del hidrogel permiten que los nutrientes sean liberados para posteriormente ser absorbidos por las plantas en el momento adecuado sin afectar la producción.

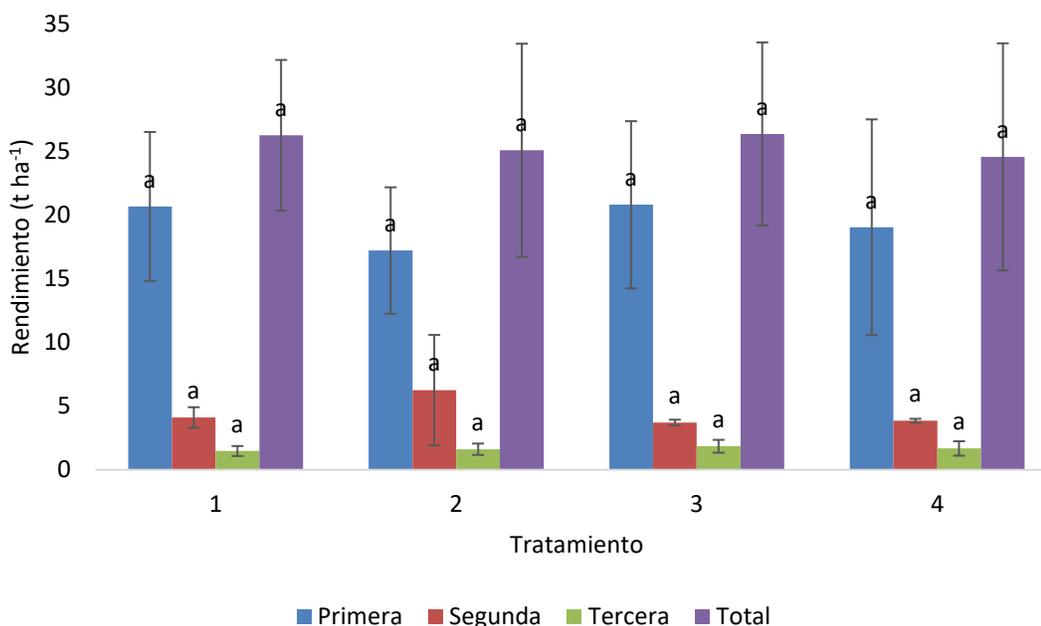




C)



D)



E)

Figura 3.1 Rendimiento promedio: (A) categoría primera, (B) segunda, (C) tercera y (D) total para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael (Sibaté). (E) interacción de los factores dosis de fertilizante x hidrogel: T1; 25 g/planta – sin hidrogel, T2; 25 g/planta - con hidrogel, T3; 15 g/planta - sin hidrogel, T4; 15 g/planta - con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar.

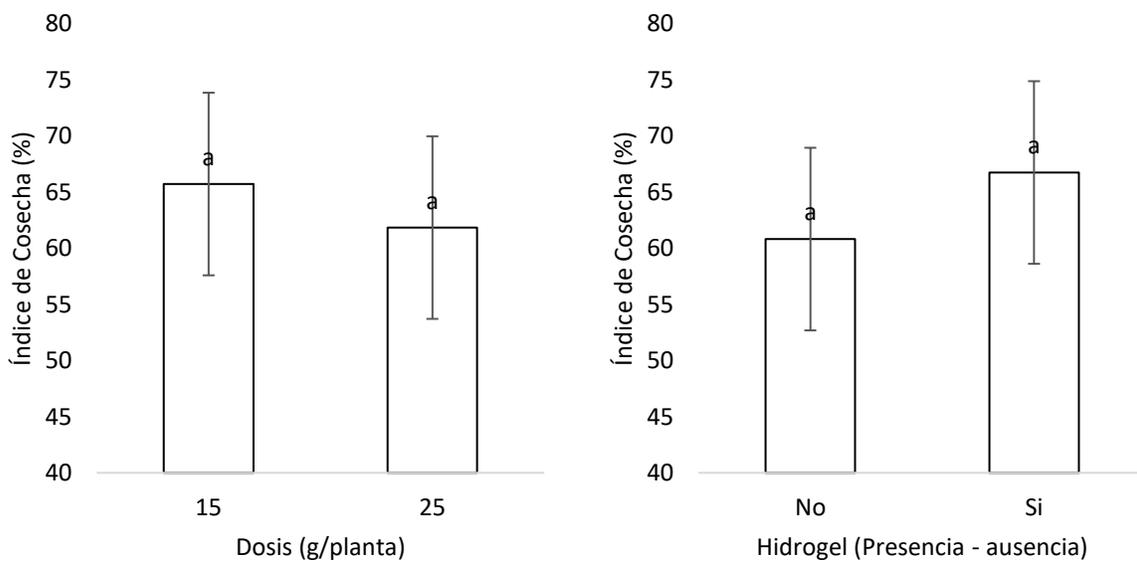
3.4.2 Índice de cosecha

Este índice de cosecha es una medida relevante de la eficiencia de la acumulación de masa seca en el órgano de interés del cultivo y hace relación a la distribución de masa seca porcentual, definiéndose ésta como el porcentaje de la masa seca del órgano cosechable o de interés comercial (en el caso de papa los tubérculos) con respecto a la masa seca total de la planta.

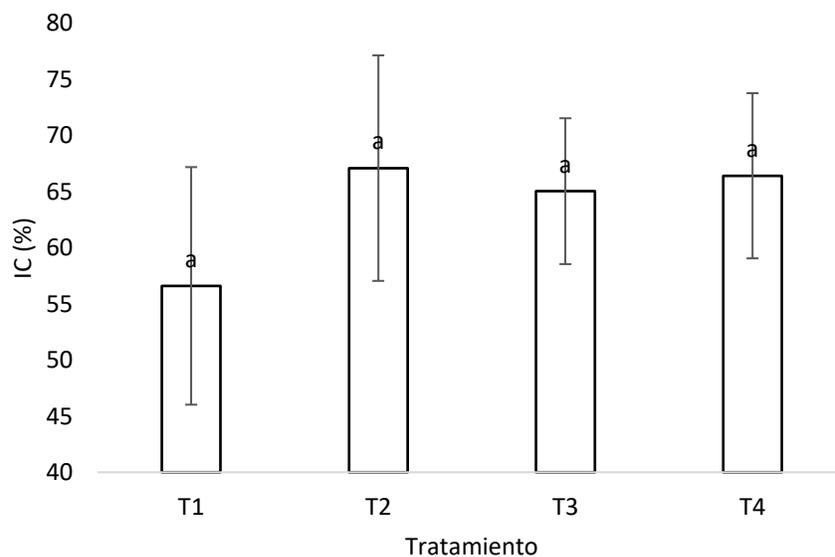
En esta variable no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor dosis, lo que indica que la mayor dosis de fertilizante no favoreció proporcionalmente la distribución de masa seca en los tubérculos con promedios de 65,72% y 61,84% cuando se usaron 15 g/planta y 25 g/planta de fertilizante respectivamente. La presencia del recubrimiento de hidrogel tampoco influye sobre el IC presentándose un promedio de 66,75% en presencia y 60,81% en ausencia del hidrogel (Fig. 3.2 A). Tampoco se presentó interacción Dosis*Hidrogel (DxH), es decir que no hay combinaciones mejores que otras (Fig. 3.2 B).

Diferentes autores han reportado el IC para la variedad Criolla Colombia; por ejemplo, Cabezas (2002) encontró un índice de cosecha de 57,21%, resultados que son entre 3,61% y 9,54% inferiores a los valores hallados en el presente estudio para los

tratamientos en ausencia y presencia del hidrogel respectivamente. Asimismo, Silva *et al.*, (2017) reportan que para la variedad Criolla Guaneña el IC aumentó hasta 70%, mientras que Seminario *et al.*, (2017) reportan un promedio de 65% para 17 cultivares del Grupo Phureja, resultados que se ajustan a los actuales hallazgos. Santos (2010) reportó un IC para la variedad Criolla Colombia de 70% cuando se estableció el cultivo bajo un ambiente a una altitud de 2859 msnm y de 54% a una altitud de 2572 msnm. Si bien en el presente estudio no hay una diferencia en cuanto a la dosis de fertilizante aplicado, así como tampoco para el uso del recubrimiento de hidrogel, los resultados se encuentran acorde con lo reportado en la literatura, indicando que los tratamientos no están afectando negativamente el IC.



A)



B)

Figura 3.2 Índice de cosecha promedio: (A) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael. (B) interacción de los factores fertilizante x hidrogel: T1; 25 g/planta - ausencia de hidrogel, T2; 25 g/planta - presencia de hidrogel, T3; 15 g/planta - ausencia de hidrogel, T4; 15 g/planta - presencia de hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar.

3.4.3 Gravedad específica de tubérculos

La gravedad específica (GE) es un parámetro de calidad importante para el consumo en fresco e indica la acumulación de masa seca en tubérculo (Rivera *et al.*, 2006). En este trabajo no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para el factor dosis y tampoco para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel y, además, no se presentó interacción entre éstos. En el factor dosis de fertilizante los resultados indican que una mayor dosis no significa una mayor GE (Fig. 3.3 A).

La combinación entre la dosis de fertilizante de 15 g/planta sin recubrimiento de hidrogel presentó el promedio más alto de GE (1,088), seguido del tratamiento de igual dosis, pero, con recubrimiento de hidrogel (1,084), sin presentarse diferencias entre estos dos tratamientos. Por su parte, la dosis de fertilizante de 25 g/planta sin recubrimiento de hidrogel, presentó el menor promedio (1,075), siendo inferior a los restantes tratamientos (Fig. 3.3 B).

Estos resultados se encuentran dentro del rango reportado por Ligarreto y Suárez (2003) en 50 clones, con valores reportados de 1,050 hasta 1,100, con promedio de 1,080, y cercanos a los resultados de Rodríguez *et al.*, (2013), quienes hallaron en nueve clones colombianos un promedio de 1,07. Para el caso de la variedad Criolla Colombia, Pérez *et al.*, (2008) encontraron valores de 1,09 a 1,1, los cuales son promedios mayores a los encontrados aquí. Roza y Núñez, (2011) reportaron también para la variedad Criolla Colombia en el municipio de Zipaquirá, Colombia, una GE la cual está alrededor de 1,08 mientras que esta variable disminuyó con promedios entre 1,063 y 1,068 en el municipio de Cogua, evaluadas bajo diferentes dosis de fósforo y potasio.

Esta variable es importante, tanto para el procesamiento de papa industrial como para el consumo en fresco. Como se pudo observar en este trabajo, tanto el uso del hidrogel como las diferentes dosis de fertilizante no influyeron sobre la variable. Estos resultados de GE son positivos ya que valores superiores a 1,080 son deseables (Ligarreto y Suárez 2003) y, además, la GE no se altera por el uso del recubrimiento de hidrogel y tampoco significa un cambio cuando se emplea una mayor dosis de fertilizante.

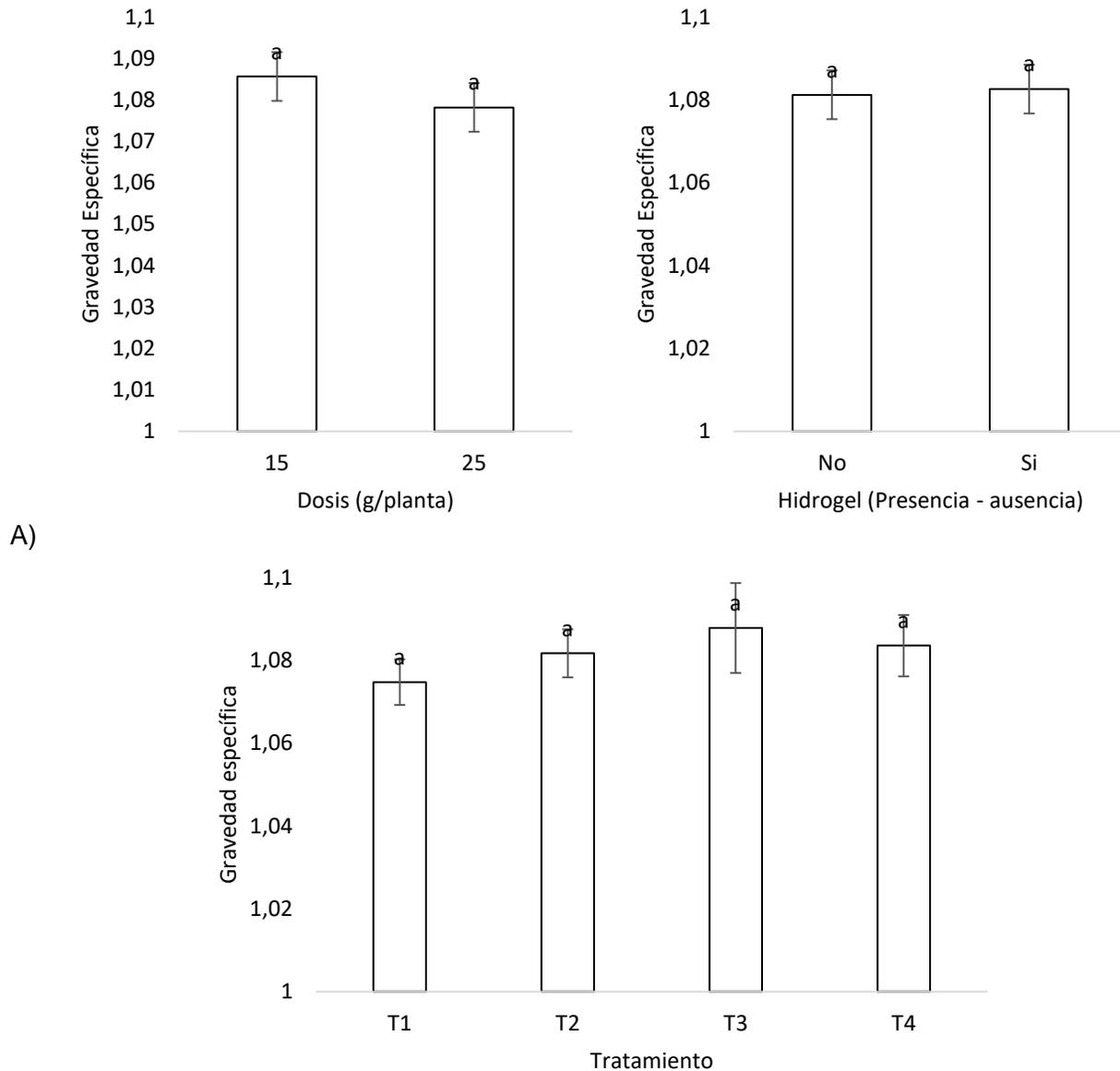


Figura 3.3 Gravedad específica promedio de tubérculos: (A) para la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con diferentes dosis de fertilizante NPK (15-15-15) recubierto con hidrogel a base de carragenina en la vereda San Rafael. (B) interacción de los factores fertilizante x hidrogel: T1; 25 g/planta - ausencia de hidrogel, T2; 25 g/planta - presencia de hidrogel, T3; 15 g/planta - ausencia de hidrogel, T4; 15 g/planta - presencia de hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar.

3.5 Conclusiones

La fertilización con recubrimiento de hidrogel a base de carragenina y las diferentes dosis de fertilizante aplicadas no repercuten positiva o negativamente sobre el rendimiento total

y/o rendimiento por categoría bajo condiciones edafoclimáticas evaluadas. Esto debido a que bajo condiciones de suelos de alta fertilidad las dosis de fertilización de 15 g/planta son suficientes para el adecuado desarrollo del cultivo.

La presencia del recubrimiento de hidrogel a base de carragenina, así como las diferentes dosis de fertilizante aplicadas, no modificaron significativamente el IC bajo condiciones edafoclimáticas de la vereda San Rafael.

La GE de tubérculos de papa variedad Criolla Colombia no se afecta por la presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel a base de carragenina y, además, una mayor dosis de fertilizante no significa un aumento de la GE de los tubérculos bajo condiciones edafoclimáticas de la vereda San Rafael.

Bibliografía

- Bautista, H. F., Ramírez, W. L., & Torres, J. 2012. Nutrient uptake of the diploid potato (*Solanum phureja*) variety Criolla Colombia, as a reference point to determine critical nutritional levels. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 436-447.
- Cabezas, M. 2002. Estimación de la interceptación de la radiación solar en papa criolla (*Solanum phureja*, Juz, et Buk.) en tres localidades colombianas. Trabajo de Grado Maestría. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia.
- Centro Internacional de la Papa (CIP). 2010. Procedimientos para pruebas de evaluaciones estándar de clones avanzados de papa. Guía para Cooperadores Internacionales.
- Gao, X., Li, C., Zhang, M., Wang, R., & Chen, B. 2015. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil. *Field Crops R.* 181, 60-68.
- Federación Colombiana de Productores de Papa [Fedepapa] y Fondo Nacional de Fomento de la papa [FNFP]. 2017. Competencias organizacionales, generalidades del sector. *Revista Papa*, 43, 9-12.
- Gastal, F., & Lemaire, G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *J. Exp. Bot.* 53, 789-799.
- Ke, J., He, R., Hou, P., Ding, C., Ding, Y., Wang, S., & Li, G. 2018. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice. *Agr. Ecosyst. Environ.* 256, 402-412.
- Ligarreto, G. A., & Suárez, M. N. 2003. Evaluación del potencial de los recursos genéticos de papa criolla (*Solanum phureja*) por calidad industrial. *Agronomía Colombiana*, 21, 83-94.
- Ñústez, 2018. Papas diploides: Un legado ancestral para la agricultura en Colombia. Grupo de investigación en papa, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.papaunc.com/blog/papas-diploides-un-legado-ancestral-para-la-agricultura-en-colombia>.
- Pérez, L. C., Rodríguez, L. E., & Gómez, M. I. 2008. Efecto del fraccionamiento de la fertilización con N, P, K y Mg y la aplicación de los micronutrientes B, Mn y Zn en el rendimiento y calidad de papa criolla (*Solanum phureja*) variedad Criolla Colombia. *Agronomía Colombiana*, 26(3), 477-486.
- Pumisacho, M., & Sherwood, S. 2002. El cultivo de la papa en Ecuador. Quito: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP).
- Rhim, J., & Wang, L. 2013. Mechanical and water barrier properties of agar/k-carrageenan/konjac glucomannan ternary blend biohydrogel films. *Carbohydr. Polym.* 96 (1),71-81.
- Rivera, V., Herrera, A., & Rodríguez, M. 2006. Evaluación sensorial en productos procesados de papa criolla (*Solanum phureja*) y su importancia para el fitomejoramiento. *Fitotecnía Colombiana*, 6(2), 9-25.

-
- Rodríguez, L., Núñez, C., & Estrada, N. 2009. Criolla Latina, Criolla Paisa y Criolla Colombia, nuevos cultivares de papa criolla para el departamento de Antioquia (Colombia). *Agronomía Colombiana*, 27(3), 289-303. Recuperado de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/13204/37297>
- Rozo, C. Y., & Núñez, C. E. 2011. Effects of phosphorus and potassium levels on the yield of the tuber variety Criolla Colombia in the department of Cundinamarca. *Agronomía Colombiana*, 29(2), 205-212.
- Rozo, G., & Rozo, C. 2008. Síntesis de un gel superabsorbente por copolimerización de poliacrilamida-Kappa carragenina y ensayo del sobre el crecimiento de *Crot funkianus*. XIII Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar, Senalmar.
- Santamaría Vanegas, J., Rozo Torres, G., & Barreto Campos, B. J. 2019. Characterization of a k-Carrageenan Hydrogel and its Evaluation as a Coating Material for Fertilizers. *J. Polym. Environ.* 27, 774–783.
- Santos, M. 2010 Evaluación del crecimiento, desarrollo y componentes de rendimiento de cuatro cultivares de papa criolla en dos localidades del departamento de Cundinamarca. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Seminario Cunya, Juan F, Seminario Cunya, Alejandro, Domínguez Palacios, Antenor, & Escalante Zumaeta, Berardo. 2017. Rendimiento de cosecha de diecisiete cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) del grupo Phureja. *Scientia Agropecuaria*, 8(3), 181-191. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.03.01>
- Silva Parra, A., Albornoz Bucheli, C., & Criollo Escobar, H. 2017. Efecto del potasio y la densidad de siembra en la producción de papa *Solanum tuberosum* Grupo Phureja var. Criolla Guaneña. *Temas Agrarios*, 223(1), 37-46.
- Song, C., Guan, Y., Wang, D., Zewudie, D., & Li, F. 2014. Palygorskite-coated fertilizers with a timely release of nutrients increase potato productivity in a rain-fed cropland. *Field Crops Res.* 166, 10-17.
- Villa, M. R., & Barrientos, J. C. 2012. Incremento de la rentabilidad económica en el cultivo de papa criolla mediante fertilización con manganeso. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 6(1), 67-75.
- Zorb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. 2014. Potassium in agriculture: status and perspectives. *J. Plant Physiol.* 171(9), 656-669.

4. Lixiviados de N y K en suelo cultivado con papa variedad Criolla Colombia y fertilizado con NPK, con y sin recubrimiento

4.1 Resumen

El uso excesivo de los fertilizantes en la agricultura conlleva a diferentes problemáticas de contaminación ambiental. Con el fin de reducir la contaminación y pérdida de nutrientes como nitrógeno y potasio, se han desarrollado recubrimientos de fertilizantes que permiten la liberación lenta de los elementos al suelo. Aquí reportamos la lixiviación de nitrógeno y potasio en un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo dos dosis de fertilizante NPK en presencia y ausencia de un recubrimiento de hidrogel a base de carragenina en un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 2x2 en la vereda El Peñón del municipio de Sibaté. Se realizó un pre muestreo donde se recogieron muestras de lixiviados a partir de los 14 dds cada 14 días hasta los 42 dds. Con base en los resultados se colectaron muestras de lixiviado a partir de los 7 dds y hasta los 42 dds y un muestreo final a los 56 dds. El factor hidrogel a base de carragenina no presentó efecto significativo sobre los lixiviados evaluados, sin embargo, la variación en los datos fue menor con la presencia del hidrogel indicando un potencial control sobre la lixiviación de NH_4^+ . El factor dosis de fertilizante únicamente presentó diferencias significativas a los 28 días después de siembra (dds) cuando la lixiviación de NH_4^+ fue mayor con una mayor dosis de fertilizante. La lixiviación de NH_4^+ , cuando se usó el recubrimiento de hidrogel, a los 7 dds con una dosis de 25 g/planta se redujo en $0,247 \text{ mg L}^{-1}$ frente al fertilizante sin hidrogel, y en $1,36 \text{ mg L}^{-1}$ con la dosis de 15 g/planta de NPK. Por su parte, el potasio (K^+) lixiviado no presentó diferencias entre los tratamientos y, además, tampoco aumenta o disminuye en el tiempo tanto en presencia como en ausencia del hidrogel de carragenina.

Palabras clave: Lixiviación, hidrogel encapsulante, nitrógeno amoniacal, potasio, lisímetro.

4.2 Introducción

La fertilización de los cultivos es importante con el fin de asegurar la producción agrícola y satisfacer la demanda de alimentos. Los fertilizantes se suministran al suelo o se aplican a las plantas para que puedan ser asimilados. Se estima que para el año 2020, el 70% de los nutrientes usados por las plantas tendrán que proceder de fertilizantes (Wang *et al.*, 2018). Los fertilizantes convencionales están inherentemente limitados por su baja eficiencia de uso de nutrientes. Por ejemplo, el uso eficiente de los principales macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) es bajo con rangos de 30-

35%, 18-20% y 35-40%, respectivamente, (Subramanian *et al.*, 2015). Esto significa que más de la mitad de los fertilizantes aplicados de manera inapropiada se pierden rápidamente dispersándose en el medio ambiente a través de escorrentía, lixiviación y/o volatilización (Huang *et al.*, 2017).

El N ejerce una gran influencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo diferentes condiciones ambientales, además, es fundamental para garantizar el rendimiento y calidad y su manejo y control se hace complejo. Por ejemplo, el N presente en el suelo antes de ser tomado por las plantas está sujeto a pérdidas por volatilización, lixiviación por nitrificación y emisiones de óxido nitroso (Linguist *et al.*, 2013). El P forma parte de lípidos y fosfolípidos, por lo que es fundamental en procesos como fotosíntesis y respiración (Marschner, 1995). En el caso de la papa, el P promueve el crecimiento radical y la tuberización. Sin embargo, el pH del suelo es determinante para la disponibilidad del P. En los trópicos donde se presentan suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) predominan las arcillas como la alófana las cuales tienen gran afinidad para reaccionar con iones ortofosfato. Además, la formación de precipitados insolubles del P con el aluminio (fosfatos de aluminio) en medios ácidos favorece la fijación (Becerra *et al.*, 2007). El K participa en los balances iónicos, regula el potencial osmótico, la actividad estomática y la translocación de fotoasimilados (Oosterhuis *et al.*, 2014). La deficiencia de K no solamente disminuye el rendimiento, sino que, además, influye sobre el contenido de almidón (Li *et al.*, 2015). Si bien la lixiviación de K no resulta en una eutroficación directa de los cuerpos de agua, es un elemento móvil en el suelo y en consecuencia sus pérdidas en los sistemas productivos pueden ser significativas (Alfaro *et al.*, 2010) con consecuencias sobre los costos de producción.

El cultivo de papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) en Colombia es de gran importancia y plantea grandes desafíos debido a su producción y consumo en constante aumento, convirtiéndose en un producto clave para la alimentación y una fuente importante de ingresos para los agricultores (Bonilla *et al.*, 2009). Sin embargo, el uso inadecuado y excesivo de los fertilizantes genera ineficiencia y pérdidas, por lo que se hace necesario hacer un manejo adecuado de los fertilizantes en el sistema productivo de papa criolla para reducir costos y optimizar producciones (Bautista *et al.*, 2012). El desarrollo de fertilizantes de liberación lenta o controlada se presenta como una alternativa para la reducción de pérdidas y aumento de eficiencia en el uso de nutrientes en combinación con las dosis adecuadas de fertilizantes. Li *et al.*, (2017) evaluaron el efecto de dos fertilizantes nitrogenados de liberación lenta con diferentes regímenes de riego sobre el rendimiento y calidad de un cultivo de tomate bajo invernadero. Estos autores hallaron que la urea resultó en un aumento en el rendimiento de 4600 kg ha⁻¹ comparado con la urea recubierta con polímero, además, mostró mejores características en la calidad de los frutos. En papa, Song *et al.*, (2014) evaluaron el efecto del uso de un recubrimiento a base de palygorskita en el rendimiento y uso eficiente del fertilizante. Se reporta que el control en la liberación de nutrientes del fertilizante recubierta con palygorskita se sincroniza mejor con la demanda de nutrientes de las plantas de papa respecto a la fertilización convencional. Consecuentemente, hubo un aumento en el

rendimiento total de tubérculos de 14.6-20.3% y el factor parcial de productividad para N, P y K también aumentó, por lo que sugieren esta tecnología como una alternativa para mejorar la productividad del cultivo de papa y favorecer la agricultura sostenible.

En Colombia, Rozo y Rozo (2008) sintetizaron un gel super absorbente biodegradable no tóxico a base de carragenina aislada del alga roja *Hypnea musciformis* el cual mostró buena fuerza de gel y alta capacidad de absorción, es decir, pueden absorben hasta diez mil veces su peso en agua, sin disolverse ni perder su integridad. La carragenina pertenece a una familia de polisacáridos sulfatados presentes en la pared y la matriz de las algas rojas en la clase Rhodophyceae. Estos polisacáridos son aniónicos; con alto peso molecular; un contenido de 15-40% de éster-sulfato; y una estructura química de d-galactosa y 3,6-anhidrogalactosa (3,6 AG), que se unen a través de α -1,3- y β -1,4-glucosídico (Rhim & Wang, 2013). Santamaría, *et al.*, (2019) continuaron el desarrollo de este hidrogel a base de carragenina cuyo comportamiento mostró un aumento máximo en espesor del 74% por absorción de agua, siendo la osmolalidad un factor importante para controlar la entrada de agua en el CBH, haciendo éste un factor determinante para la liberación tanto de N como de P y K. Esto permite proponerlo como un gel hidrorretenedor para uso en diferentes tipos de suelos.

En experimentos conducidos bajo condiciones controladas en laboratorio, Santamaría, *et al.*, (2019) también determinaron que los lixiviados mostraron menor concentración de NH_4^+ en los tratamientos en presencia del hidrogel. Bajo un régimen de precipitación de 90mm mensuales, se presentó una lixiviación del 2.02% (\pm 0.25) del N- NH_4^+ aplicado como fertilizante con recubrimiento de hidrogel, mientras que, en ausencia del hidrogel, la lixiviación llegó a 14.1% (\pm 2.38). No obstante, aún no se ha evaluado el efecto de este gel sobre la lixiviación de nutrientes en cultivos en campo, además, en combinación con dosis diferentes de fertilizante. El objetivo de este trabajo fue evaluar la lixiviación de NH_4^+ y K^+ en un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) con la aplicación de diferentes dosis de un fertilizante NPK con y sin recubrimiento de hidrogel a base de carragenina.

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Localización y diseño experimental

El experimento se realizó en la vereda El Peñón del municipio de Sibaté a una altitud de 2815 msnm (N 04°25'42,0'' W 74°17'58,4'') entre agosto y diciembre de 2018. Se utilizó semilla seleccionada de la variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) obtenida de los agricultores de la región. El experimento constó de 4 tratamientos, bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones y arreglo factorial 2x2, el primer factor fue el fertilizante N-P-K (15-15-15) con los niveles 25 g/planta (833,3 kg·ha⁻¹) y 15 g/planta (500 kg·ha⁻¹). El segundo factor fue el hidrogel (presencia y ausencia). La unidad experimental fue de 15 m², conformada por dos surcos distanciados por 1 m y 25 plantas

por surco distanciadas 0.3 m. Se realizó una sola fertilización al momento de la siembra. La fuente utilizada para la aplicación de los elementos fue abono granulado del distribuidor VECOL 15-15-15-11 (N total 15%, P₂O₅ 15%, K₂O 15%, 11% S), el cual contiene N amoniacal en su totalidad, P como fosfato monoamónico (MAP), K como KCl y azufre (S) como sulfato diamónico. Los tratamientos establecidos fueron: Tratamiento 1; 25 g/planta en ausencia de hidrogel, Tratamiento 2; 25 g/planta en presencia de hidrogel, Tratamiento 3; 15 g/planta en ausencia de hidrogel, Tratamiento 4; 15 g/planta en presencia de hidrogel.

La precipitación se midió diariamente empleando un pluviómetro convencional registrando 161,8 mm hasta los 56 dds. No se realizó riego suplementario. El suelo en la vereda El Peñón fue un andisol que presentó una textura franca, un pH de 4.92, contenido de materia orgánica alto y baja saturación de bases. Las características físico-químicas de los suelos se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores de variables químicas y físicas de los suelos en la vereda El Peñón.

pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Na
pH	%	mg·kg ⁻¹		cmol(+)·kg ⁻¹			
4.92	25.4	31.6	64.4	0.252	5.16	0.444	NA
CICE	Mn	Zn	Fe	Cu	B	Textura	
cmol(+) kg ⁻¹	mg·kg ⁻¹						
7.10	23.2	9.2	6.6	0.3	0.8	Franco	

MO: Materia orgánica. CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico. Métodos de análisis: pH Agua 1:1, fósforo disponible Bray II, cationes cambiables en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles Ab. At., micronutrientes en suelo doble ácido Ab.At. Laboratorio de suelos del Centro Internacional de Agricultura Tropical; CIAT.

4.3.2 Análisis de lixiviados

Para establecer el número de muestras de lixiviados a coleccionar y el intervalo de tiempo entre colectas, se llevó a cabo un pre muestreo en la vereda San Rafael (primer experimento) donde se recogieron muestras de lixiviados a partir de los 14 dds cada 14 días hasta los 42 dds. Con base en estos resultados se estableció este segundo experimento para evaluar los lixiviados en la vereda El Peñón, municipio de Sibaté. Se instaló un lisímetro en cada unidad experimental y se colectó una muestra de lixiviado a partir de los 7 dds y hasta los 42 dds y un muestreo final a los 56 dds.

Los lixiviados del suelo se coleccionaron usando lisímetros de succión SSAT (Irrometer Company, Inc. USA). Los lisímetros se ubicaron contiguos a una planta en cada parcela a una profundidad de 40 cm (figura 4.1) teniendo en cuenta resultados de experimentos previos. Los lixiviados fueron analizados para determinar la concentración de NH₄⁺ y K⁺

en la solución, en el laboratorio de servicios analíticos de Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT.



Figura 4.1 Instalación de lisímetros de succión.

4.3.3 Análisis estadístico

Los datos se analizaron de acuerdo con el diseño experimental establecido y descrito antes. Se realizó un análisis no paramétrico de Friedman con un nivel de significancia de 0.05 por cada punto de muestreo para la variable NH_4^+ lixiviado, debido a que la variable no cumplió el supuesto de normalidad. Se realizó un ANOVA y luego una prueba de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0.05 por cada punto de muestreo para la variable K lixiviado. El análisis de los datos se realizó con el software estadístico R STUDIO.

4.4 Resultados y discusión

4.4.1 Lixiviado de nitrógeno amoniacal (NH_4^+)

En la primera evaluación de campo para la variable realizada en la vereda San Rafael, la tendencia general en la mayoría de tratamientos fue presentar mayor lixiviación los días inmediatamente posteriores al establecimiento del cultivo. Los tratamientos T1 y T2 (25 g/planta de fertilizante), presentaron mayores concentraciones de NH_4^+ respecto a los

tratamientos de 15 g/planta en todos los muestreos, pasando de 0,584 mg L⁻¹ y 0,545 mg L⁻¹ a los 14 dds a 0,264 mg L⁻¹ y 0,181 mg L⁻¹ a los 42 dds respectivamente. La respuesta del tratamiento con una combinación de 15 g/planta de fertilizante con hidrogel, fue contraria a lo presentado por los demás tratamientos ya que inició con una lixiviación de 0,030 mg L⁻¹ a los 14 dds para mantenerse con resultados similares a los 28 dds y finalmente aumentar hasta 0,092 mg L⁻¹ a los 42 dds.

En la vereda El Peñón el factor de hidrogel no presentó diferencias significativas para la concentración de NH₄⁺ (Tab. 4.2). Cuando no se utilizó el recubrimiento con hidrogel el promedio más alto se presentó a los 7 dds cuando hubo una concentración de NH₄⁺ de 1,083 mg L⁻¹, mientras que en su presencia la concentración fue de 0,172 mg L⁻¹ (Fig. 4.2-B). La dosis de fertilizante aplicado únicamente presentó diferencias significativas a los 28 dds, cuando se usó una dosis de 15 g/planta se registró una concentración de NH₄⁺ de 0,144 mg L⁻¹ y cuando se usó una dosis de 25 g/planta fue de 0,219 mg L⁻¹ (Fig. 4.2-A). En las demás evaluaciones no se presentaron diferencias significativas para el factor dosis de fertilizante. Este resultado puede estar relacionado a la menor variación en los datos en este punto de muestreo frente al resto, el cual permite observar estas diferencias.

Al evaluar la interacción de los factores, no se presentaron diferencias significativas y la lixiviación a los 7 dds fue mayor en los tratamientos sin hidrogel, la cual asciende a 1,511 mg L⁻¹ en el tratamiento T3 (15 g/planta) y a 0,440 mg L⁻¹ en el tratamiento T1 (25 g/planta). En los tratamientos con hidrogel la lixiviación se evidenció desde los 7 dds con 0,193 y 0,151 mg L⁻¹ para los tratamientos T2 (25 g/planta) y T4 (15 g/planta), respectivamente. A pesar de no presentar diferencias significativas entre los tratamientos, debido a una alta variación en los datos de muestreo, se observó que a partir de los 14 dds y hasta los 56 dds hubo disminución de la lixiviación de NH₄⁺. Los tratamientos con hidrogel mostraron valores inferiores en la concentración de NH₄⁺ en los lixiviados y, además, esta concentración es constante a lo largo del tiempo con menor variación entre repeticiones cuando se compara con la variación observada en los tratamientos sin hidrogel (Fig. 4.3). Esto es importante ya que, al presentarse menor variación en los datos de los tratamientos con hidrogel, se puede intuir que existe un relativo control sobre la migración de los nutrientes hacia el perfil del suelo.

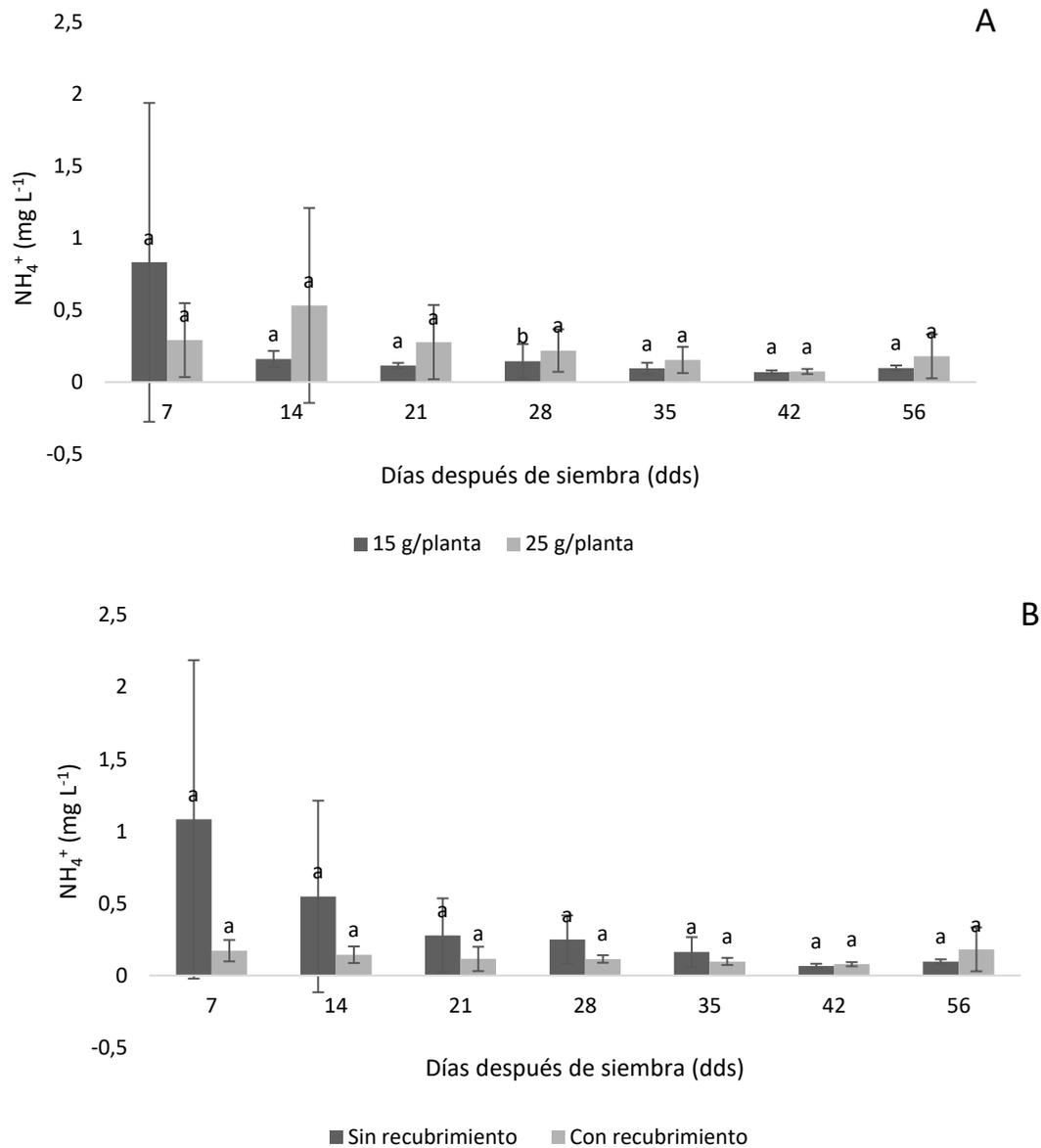


Figura 4.2 Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) lixiviado en un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda El Peñón (Sibaté), evaluado bajo los factores (A) dosis de fertilizante y (B) presencia y ausencia de recubrimiento con hidrogel.

Estos resultados son interesantes ya que se observan reducciones en la concentración de NH₄⁺ lixiviado durante las primeras dos semanas de establecimiento del cultivo, en especial, porque la aplicación del fertilizante de parte del agricultor en general se realiza al inicio del cultivo (en el momento de la siembra), de tal forma que las pérdidas pueden ser mayores por llixiviación cuando éste entra en contacto con el agua y comienza a disolverse, momento en el cual las plantas de papa aún no han desarrollado el sistema radical para absorber los nutrientes. Un aspecto importante a considerar es la dinámica de estos nutrientes en el perfil del suelo, en especial si consideramos que el cultivo

requiere aporque, que consiste en acumular suelo en la base de los tallos de la planta creando un montículo alrededor. Esta labor hace que el horizonte que debe atravesar el agua lluvia sea mayor, haciendo que la distancia desde la superficie hasta la punta colectora del lisímetro aumente, y de esta manera el proceso de filtración del agua y la lixiviación de nutrientes se vea modificada. Teniendo en cuenta esto y los resultados obtenidos durante los primeros 14 dds, se hace importante enfocar el estudio de la lixiviación de NH_4^+ en el periodo comprendido entre la siembra hasta los 28 dds, periodo en el cual se observa la mayor reducción en la lixiviación.

Algunos resultados similares han sido reportados por diferentes autores en distintos sistemas productivos utilizando fertilizantes recubiertos. Zheng *et al.*, (2016) reportó que la lixiviación de nitrógeno en el suelo se redujo mediante el uso de urea recubierta, por lo que mejoró el uso eficiente del nitrógeno en 33.7-56.4% en trigo y 16.7-19.9% en maíz, al tiempo que disminuyó los costos de fertilizantes y los trabajos necesarios para la aplicación de fertilizantes. Por su parte, Tian *et al.*, (2018) concluyeron que utilizando urea de liberación controlada es posible una disminución de un tercio en la aplicación de N y, por tanto, disminuir la lixiviación de este nutriente, preservando así la fertilidad del suelo en una localidad al norte de China. Los resultados obtenidos en este estudio confirman lo reportado por Santamaría, *et al.*, (2019) quienes determinaron en experimentos de columna que, en presencia del hidrogel, se disminuye la lixiviación de NH_4^+ en cerca del 12,08% respecto a los tratamientos sin hidrogel. En este trabajo se encontró que la reducción en la lixiviación de NH_4^+ , cuando se usó el recubrimiento de hidrogel, a los 7 dds con una dosis de 25 g/planta de fertilizante fue de 0,247 mg L⁻¹ frente al fertilizante sin hidrogel, y una reducción de 1,36 mg L⁻¹ con la dosis de 15 g/planta de NPK.

Tabla 4.2 Cuadrados medios para nitrógeno amoniacal (NH_4^+) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dds	Cuadrado medio fuentes de variación			CV%
	Dosis	Hidrogel	D x H	
7 dds	0,833 n.s.	0,682 n.s.	2,667 n.s.	56,578
14 dds	3,000 n.s.	0,000 n.s.	1,333 n.s.	55,940
21 dds	3,000 n.s.	0,000 n.s.	1,333 n.s.	55,940
28 dds	21,333*	0,000 n.s.	0.333 n.s.	36,886
35 dds	9,796 n.s.	0,907 n.s.	3,130 n.s.	41,906
42 dds	0,000 n.s.	0,000 n.s.	8,333 n.s.	52,164
56 dds	8,333 n.s.	0,000 n.s.	5,333 n.s.	46,107

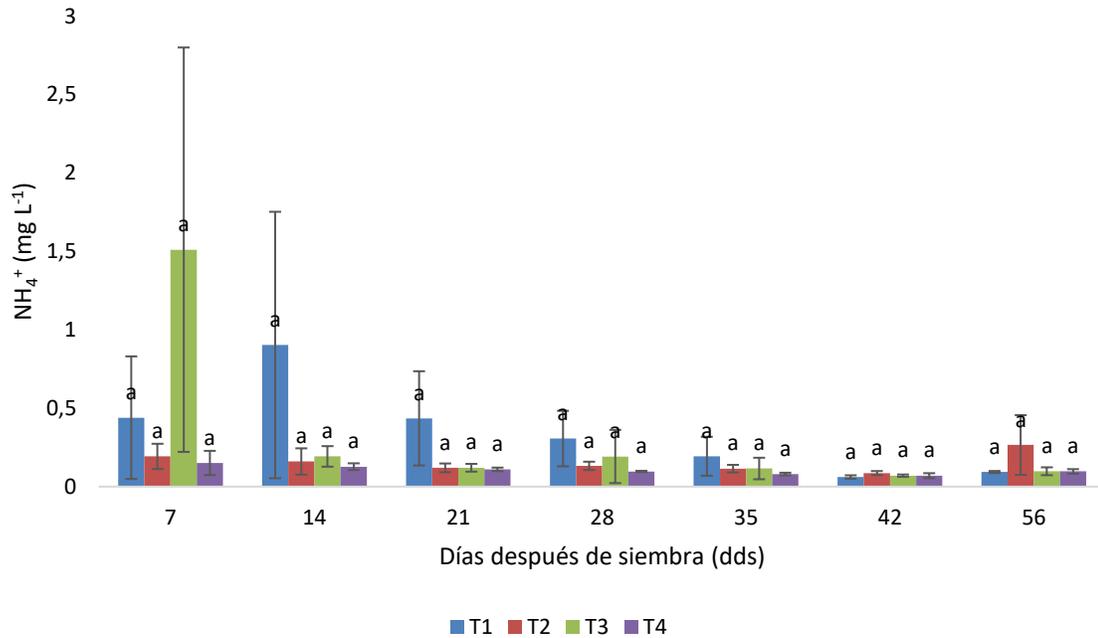


Figura 4.3 Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la combinación de dos niveles de fertilizante y la ausencia o presencia de recubrimiento con hidrogel en la vereda El Peñón (Sibaté): Tratamiento 1; 25 g/planta sin hidrogel, Tratamiento 2; 25 g/planta con hidrogel, Tratamiento 3; 15 g/planta sin hidrogel, Tratamiento 4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey (p≤0.05). Las barras indican la desviación estándar (n=3).

4.4.2 Potasio lixiviado

En el primer experimento de la vereda San Rafael también se realizó una evaluación preliminar de lixiviados de K⁺, en el cual al contrario de lo observado en el caso del NH₄⁺, la tendencia de la lixiviación fue homogénea a través del tiempo. Esta tendencia puede deberse entre otras cosas a las características físicas y químicas de los suelos. Según Malavolta, (1985), el tipo de suelo afecta la lixiviación de K⁺ ya que la cantidad final de K depende del K disponible, el cual está relacionado con la textura del suelo. Pal *et al.*, (1999) mostraron que el K soluble en el suelo está relacionado negativamente con la proporción de arena gruesa y positivamente con las cantidades de arcilla y limo. Por lo tanto, se esperan mayores pérdidas de K⁺ por lixiviación en suelos arenosos que en suelos arcillosos (Alfaro *et al.*, 2010). En los resultados preliminares de la vereda San Rafael no fue posible evidenciar claramente el efecto del hidrogel, lo que está en contraposición con lo evidenciado en los experimentos de laboratorio llevados a cabo por Santamaría, *et al.*, (2019), allí es claro el efecto en la reducción de la lixiviación de K⁺, sin embargo, en este trabajo la precipitación fue menor (Anexo A), influyendo en el resultado de las tasas de lixiviación de K⁺.

Las cantidades de K^+ disponible y no disponible para la planta en el suelo varían entre los tipos de suelo, además, existen reacciones para equilibrar las cargas del suelo. Por lo tanto, las propiedades físicas y químicas del suelo, así como las interacciones planta-suelo y las actividades microbianas, afectan la fijación y liberación de K^+ en los suelos (Zörb *et al.*, 2014). En la vereda San Rafael se presentó un suelo de textura franco arenosa el cual presenta una fracción de arcilla del 20% y de arena entre 50% y 70%, esto conllevó a que se presentara menor fijación y por lo tanto mayor lixiviación de K^+ en este tipo de suelo.

En esta variable de lixiviados de K^+ , en la vereda El Peñón, no se presentaron diferencias significativas tanto para el factor dosis como para el factor presencia o ausencia del recubrimiento de hidrogel y tampoco para la interacción. Esto significa que la variable responde de manera independiente de la dosis de fertilizante que se aplica o de si se usa o no el recubrimiento de gel (Tab. 4.3), lo cual se mantuvo durante el tiempo de evaluación (Fig. 4.4).

Además de liberar K^+ , los minerales del suelo también pueden fijar el K^+ , lo que significa que se afecta su disponibilidad. El grado de fijación de K^+ en los suelos depende del tipo de mineral arcilloso y su densidad de carga, contenido de humedad, iones y pH del suelo. La montmorillonita, la vermiculita y las micas meteorizadas son los principales minerales arcillosos que tienden a fijar K^+ (Sparks, 1987). Sumado a esto, la humedad del suelo también afecta significativamente la fijación de K^+ ; en este trabajo la precipitación alcanzada a los 56 dds fue de 161,8 mm (Anexo A).

El proceso de fijación de K^+ es relativamente rápido, mientras que la liberación de K^+ es muy lenta debido a la fuerza de unión entre K^+ y los minerales arcillosos (Öborn *et al.*, 2005). La liberación o fijación de K^+ va a depender directamente del K^+ total en la solución del suelo (Schneider *et al.*, 2013). Los ácidos orgánicos y la concentración de H^+ en la solución del suelo (pH del suelo) son importantes en la liberación de K^+ de los minerales de arcilla. Por lo tanto, la regulación del pH del suelo es fundamental para mejorar la liberación de K^+ (Zörb *et al.*, 2014). En la vereda El Peñón el suelo presentó textura franca y, por lo tanto, un promedio de arcilla 10% mayor frente al suelo de la vereda San Rafael. Este mayor porcentaje de arcilla, entre otras cosas, resulta en una mayor fijación de K^+ , haciendo que se presente una menor variación en la lixiviación de este elemento en el suelo. Finalmente, tal y como lo reportaron Santamaría, *et al.*, (2019) en experimentos de columna, en el presente trabajo se pudo evidenciar que el hidrogel a base de carragenina no es tan eficiente ralentizando la liberación de K^+ como si lo es en el caso del NH_4^+ al suelo ya que se observaron grandes cantidades de K^+ lixiviado.

Los resultados de una mayor lixiviación en tratamientos en ausencia de recubrimiento de hidrogel y por ende la retención de nutrientes ha sido reportada por diferentes autores utilizando diferentes materiales. Por ejemplo, Bley *et al.*, (2017) evaluaron la eficacia del producto Producote® (KCl recubierto con polímero) frente al fertilizante KCl convencional. Estos autores reportaron que los datos se ajustaron a una función lineal a partir de la cual se estimó un período de 315 días según se requería para la liberación del 75% del

nutriente en el fertilizante recubierto. Mientras tanto, el KCl convencional liberó el 85% del K^+ en las primeras 48 h. En macetas, el recubrimiento redujo las pérdidas de K^+ debido a la lixiviación en suelos arenosos francos. Los resultados obtenidos en la vereda El Peñón van en contraposición a estos resultados, ya que los promedios de K^+ lixiviado son altos ($3,967 - 12,606 \text{ mg L}^{-1}$) en comparación con el NH_4^+ lixiviado para todas las combinaciones de los factores.

Tabla 4.3 Cuadrados medios para Potasio (K^+) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) en la vereda San Rafael (Sibaté), para los factores dosis del fertilizante (D), presencia y ausencia del hidrogel (H) y su interacción.

dds	Cuadrado medio fuentes de variación			CV%
	Dosis	Hidrogel	D x H	
7	7,995 ^{n,s}	64,127 ^{n,s}	1,628 ^{n,s}	75,605
14	4,446 ^{n,s}	3,329 ^{n,s}	7,561 ^{n,s}	75,750
21	0,847 ^{n,s}	1,452 ^{n,s}	1,229 ^{n,s}	55,056
28	2,266 ^{n,s}	0,647 ^{n,s}	0,813 ^{n,s}	60,059
35	0,012 ^{n,s}	0,008 ^{n,s}	0,001 ^{n,s}	57,122
42	18,204 ^{n,s}	8,184 ^{n,s}	12,225 ^{n,s}	80,586
56	2,121 ^{n,s}	3,631 ^{n,s}	0,290 ^{n,s}	53,769

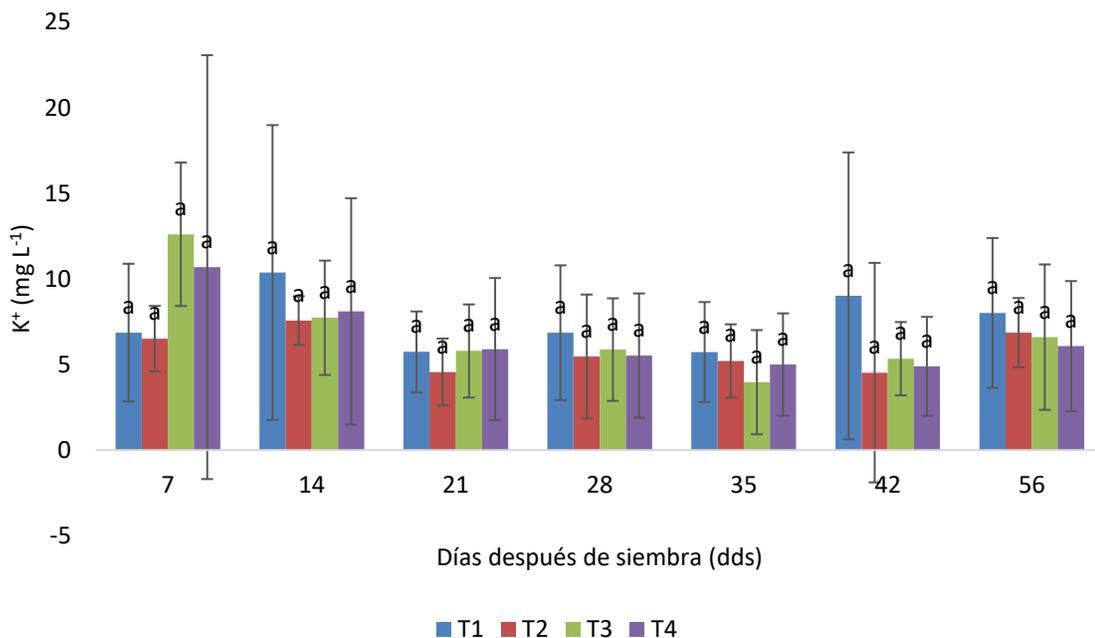


Figura 4.4 Potasio (K^+) lixiviado de un cultivo de papa variedad Criolla Colombia (Grupo Phureja) bajo la combinación de dos niveles de fertilizante y la ausencia o presencia de

recubrimiento con hidrogel en la vereda El Peñón (Sibaté): Tratamiento 1; 25 g/planta sin hidrogel, Tratamiento 2; 25 g/planta con hidrogel, Tratamiento 3; 15 g/planta sin hidrogel, Tratamiento 4; 15 g/planta con hidrogel. Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Las barras indican la desviación estándar ($n=3$).

4.5 Conclusiones

El recubrimiento de fertilizantes con hidrogel a base de carragenina presenta un potencial en la disminución de la lixiviación de nitrógeno amoniacal en suelos de textura franco-arenosa como el evaluado con el cultivo de papa variedad Criolla Colombia en la vereda El Peñón del Municipio de Sibaté.

En un suelo de textura franco-arenosa de la vereda El Peñón del Municipio de Sibaté, Cundinamarca, la mayor cantidad de NH_4^+ se pierde durante los primeros 28 días del ciclo de cultivo de papa Criolla. Para lograr establecer de manera más precisa las pérdidas de NH_4^+ , es importante aumentar la frecuencia de colecta de lixiviados desde la siembra y durante los primeros 28 días del ciclo de cultivo.

El uso de fertilizante con recubrimiento de hidrogel a base de carragenina no generó efecto sobre la lixiviación de K^+ en el cultivo de papa Criolla Colombia, por el contrario, se evidencia que en el tiempo de desarrollo del cultivo, su lixiviación en las condiciones de suelo evaluadas, fue superior con respecto al NH_4^+ .

Bibliografía

- Alfaro, M. A., Jarvis, S. C., & Gregory, P. J. 2010. Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Manage.* 20(2), 182-189.
- Bautista, H. F., Ramírez, W. L., & Torres, J. 2012. Nutrient uptake of the diploid potato (*Solanum phureja*) variety Criolla Colombia, as a reference point to determine critical nutritional levels. *Agronomía Colombiana*, 30(3), 436-447.
- Becerra Sanabria, L. A., Navia de Mosquera, S. L., & Núñez López, C. E. 2007. Efecto de niveles de fósforo y potasio sobre el rendimiento del cultivar "Criolla Guaneña" en el departamento de Nariño. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14(1), 51-60.
- Bley, H., Gianello, C., da Silva Santos, J., Roldão Selau, P., 2017. Nutrient Release, Plant Nutrition, and Potassium Leaching from Polymer-Coated Fertilizer. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* 41, e0160142. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160142>
- Bonilla, M., Cardozo, F., & Morales, A. 2009. Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la papa en Colombia, con énfasis en papa criolla. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural; Universidad Nacional de Colombia; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica).
- Huang, J., Xu, C., Ridoutt, B. G., Wang, X., & Ren, P. 2017. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *J. Clean. Prod.* 159, 171-179.

- Li, S., Duan, Y., Guo, T., Zhang, P., He, P., Johnst, A., & Shcherbakove, A. 2015. Potassium management in potato production in Northwest region of China. *Field Crops Res.* 174, 48-54.
- Li, Y., Sun, Y., Liao, S., Zou, G., Zhao, T., Chen, Y., & Zhang, L. 2017. Effects of two slow-release nitrogen fertilizers and irrigation on yield, quality, and water-fertilizer productivity of greenhouse tomato. *Agric. Water Manag.* 186, 139-146.
- Linquist, B. A., Liu, L., Kessel, C., & Groenigen, K. J. 2013. Enhanced efficiency nitrogen fertilizers for rice systems: meta-analysis of yield and nitrogen uptake. *Field Crops Res.* 154, 246-254.
- Malavolta, E. 1985. Potassium status of tropical and subtropical region soils. In: R. Munson (ed). Potassium in Agriculture. *American Society of Agronomy.* Madison Wisconsin, USA.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2a edición. Londres: Editorial Academic Press Limited.
- Öborn, I., Andrist-Rangel, Y., Askegaard, M., Grant, C. A., Watson, C. A., & Edwards, A. C. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use Manage.* 21(1), 102-112.
- Oosterhuis, D., Loka, D., Kawakami, E., & Pettigrew, W. 2014. The physiology of potassium in crop production. *Adv. Agron.* 126, 203-234.
- Pal, Y., Wong, M.T.F., & Gilkes, R.J. 1999. The forms of potassium and potassium adsorption in some virgin soils from South-Western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 37, 695-709.
- Rhim, J., & Wang, L. 2013. Mechanical and water barrier properties of agar/ κ -carrageenan/konjac glucomannan ternary blend biohydrogel films. *Carbohydr. Polym.* 96 (1),71-81.
- Rozo, G., & Rozo, C. 2008. Síntesis de un gel superabsorbente por copolimerización de poliacrilamida-Kappa carragenina y ensayo del sobre el crecimiento de *Crot funckianus*. XIII Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar, Senalmar.
- Santamaría Vanegas, J., Rozo Torres, G., & Barreto Campos, B. J. 2019. Characterization of a κ -Carrageenan Hydrogel and its Evaluation as a Coating Material for Fertilizers. *J. Polym. Environ.* 27, 774–783.
- Schneider, A., Tesileanu, R., Charles, R., & Sinaj, S. 2013. Kinetics of soil potassium sorption-desorption and fixation. *Commun. Soil. Sci. Plan.* 44, 1-4.
- Song, C., Guan, Y., Wang, D., Zewudie, D., & Li, F. M. 2014. Palygorskite-coated fertilizers with a timely release of nutrients increase potato productivity in a rain-fed cropland. *Field Crops Res.* 166, 10-17.
- Sparks, D. L. 1987. Potassium dynamics in soils. In: Stewart B.A. (eds) *Advances in Soil Science.* Advances in Soil Science, vol 6. Springer, New York, NY.
- Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., & Rahale, C. S. 2015. Nano-fertilizers for Balanced Crop Nutrition. In: Rai M., Ribeiro C., Mattoso L., Duran N. (eds) *Nanotechnologies in Food and Agriculture.* Springer, Cham.

- Tian, X., Li, C., Zhang, M., Li, T., Lu, Y., & Liu, L. 2018. Controlled release urea improved crop yields and mitigated nitrate leaching under cott-garlic intercropping system in a 4-year field trial. *Soil. Till. Res.* 158-167.
- Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, S., & Wang, Y. 2018. What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? *J. Clean. Prod.* 199, 882-890.
- Zheng, W., Zhang, M., Liu, Z., Zhou, H., Lu, H., Zhang, W., & Chen, B. 2016. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops Res.* 197, 52-62.
- Zorb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. 2014. Potassium in agriculture: status and perspectives. *J. Plant Physiol.* 171(9), 656-669.

5.Recomendaciones

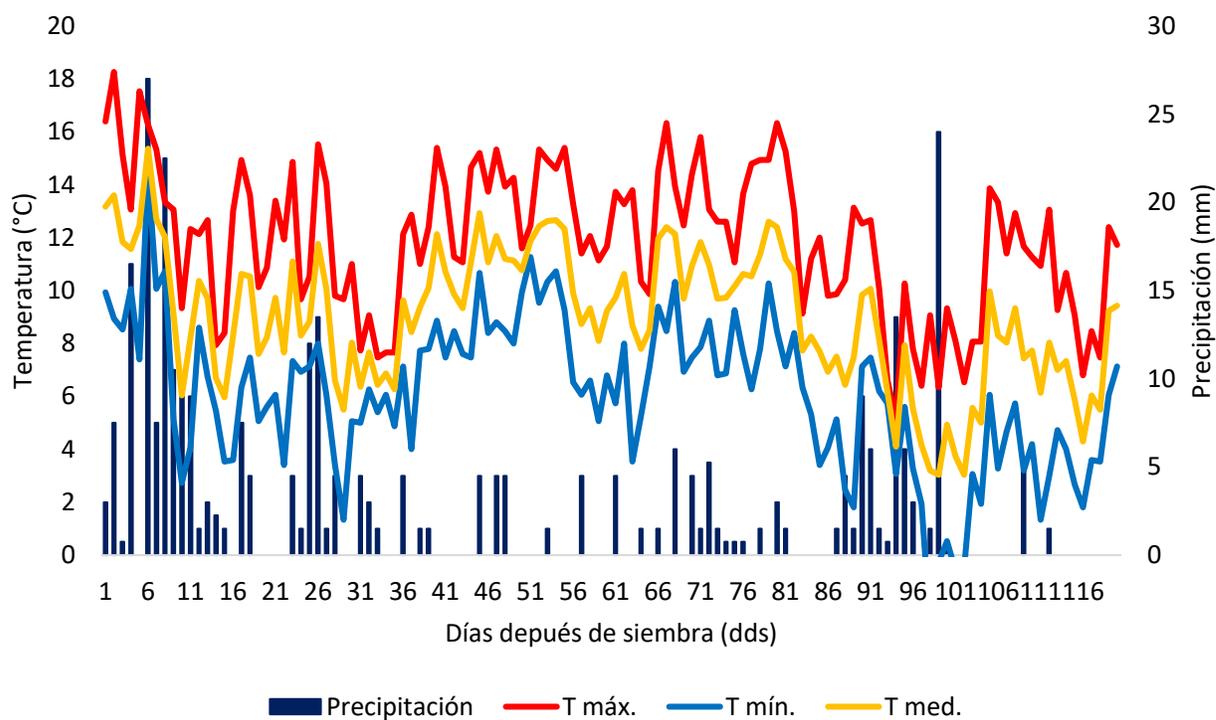
Es importante profundizar en el desarrollo de metodologías que permitan la obtención de los datos en campo de lixiviados con alta precisión, con el propósito de evidenciar posibles diferencias entre tratamientos que se apliquen.

Es relevante continuar las investigaciones en estas tecnologías de recubrimiento de fertilizantes como estrategia para la disminución y mitigación del impacto ambiental causado por el uso de fertilizantes minerales en los cultivos.

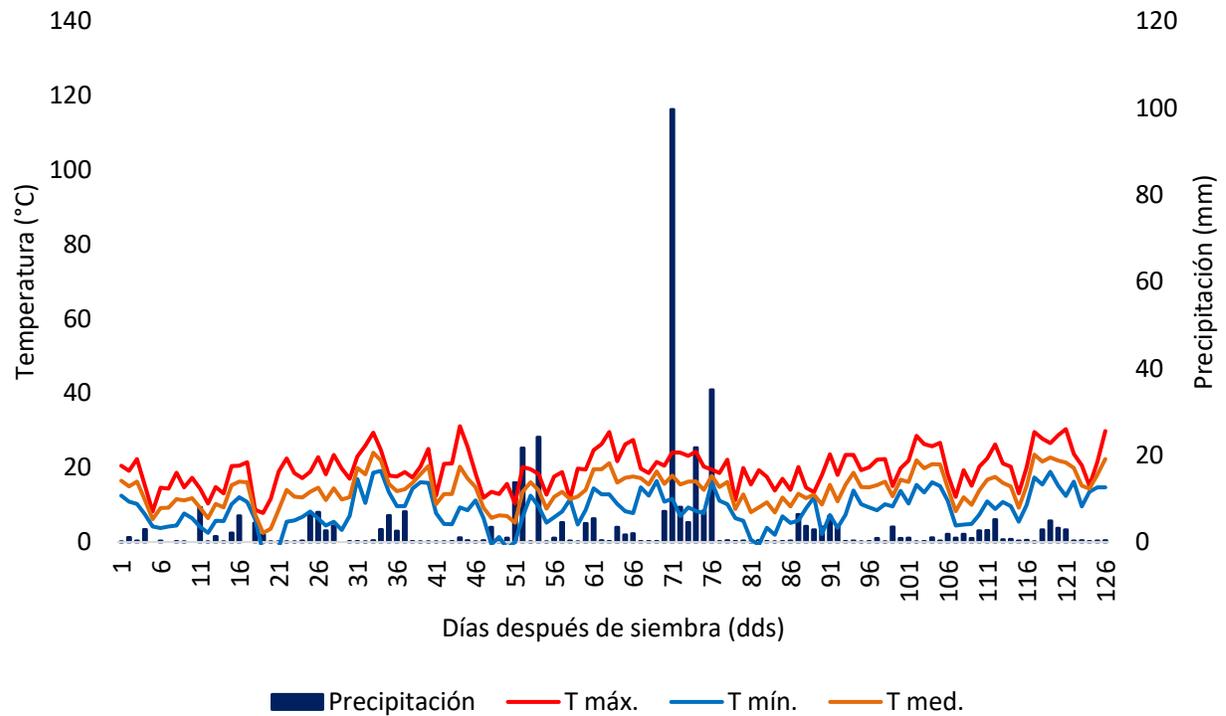
Se debe evaluar el uso de hidrogel a base de carragenina en otros ambientes de producción (tipos de suelo y clima) y en diferentes cultivos, debido a los resultados positivos en la presente investigación. Se sugiere evaluar en ambientes que presenten suelos con limitaciones por baja fertilidad natural y/o que presenten baja retención de humedad con el fin de evaluar las propiedades hidroretendedoras y de lenta liberación de nutrientes del hidrogel.

Anexo A: Variables climáticas

Variables climáticas Vereda San Rafael.



Precipitación medida mediante pluviómetro convencional manual. Temperatura de acuerdo con el programa de simulación Marksim de CIAT para el modelo de simulación GISS y RCP 6.0. Fuente: <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>

Variables climáticas Vereda El Peñón

Precipitación medida mediante pluviómetro convencional manual. Temperatura de acuerdo con el programa de simulación Marksim de CIAT para el modelo de simulación GISS y RCP 6.0. Fuente: <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>