

Influencia de las variables agroclimáticas sobre las características fisicoquímicas y funcionales de cinco genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) y sus potenciales usos

Autor: Lia Zamara Mora Vergara

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Química

Director

Luis Javier López Giraldo

Ph.D. Ingeniería Química

Codirector

Víctor Gabriel Baldovino Medrano

Ph.D. Ingeniería Química

Codirector

María del Socorro Cerón Lasso

Ph.D. Ciencias Agrarias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico muy especialmente el desarrollo del presente trabajo de grado a mi padre Never Antonio Mora Lozano; a mis hermanos Never Lenin, Ana Paola e Iván Darío Mora Vergara, y a mis sobrinos David, Camilo y Alejandro; ellos siempre han sido mi apoyo y me inspiran a seguir adelante, y a alcanzar nuevas metas en mi vida y carrera profesional.

A los seres queridos que ya no están pero que siguen rodeándome con su amor y sabiduría: mi madre, Ana Gertrudis Vergara Chávez, quien ha sido “la brisa y el velero” en nuestras vidas; mis abuelas Ana Lozano y Bernardina Chávez, y abuelos Manuel Vergara y Ricardo de la Ossa quienes consintieron cada etapa de mi vida y a mi tía Ingrit Vergara Chávez quien me enseñó que la entrega desinteresada por los demás es un triunfo a la violencia.

Y a toda mi familia y amigos por su confianza, constante ánimo y apoyo incondicional, fundamentales para alcanzar este logro.

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos en el desarrollo del presente Trabajo de Investigación a:

Mi director Luis Javier López Giraldo y codirectores Víctor Valdovino Medrano y María del Socorro Cerón Lasso por sus orientaciones y enseñanzas, siempre guiándome para culminar con éxito el presente Trabajo.

A los profesionales, compañeros y personal de laboratorio CICTA, CICAT y Centro de Investigaciones de AGROSAVIA “La Suiza”, por su apoyo y orientaciones en el desarrollo experimental del presente trabajo. A los productores de papa diploide dueños de fincas donde se establecieron los ensayos de campo para la toma de las muestras de tubérculos.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y a la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo en el desarrollo del presente proyecto de investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
2. Objetivos	19
2.1 Objetivo General	19
2.2 Objetivos Específicos	19
3. Metodología	20
3.1 Materiales y métodos	21
3.1.1 Localización	21
3.1.2 Información de las condiciones agroclimáticas (CAC)	21
3.1.3 Materiales biológicos	22
3.1.4 Diseño experimental	22
3.1.3 Químicos y reactivos	22
3.1.4 Preparación de la muestra	23
3.1.5 Análisis fisicoquímico	24
3.1.6 Análisis funcional	24
3.1.7 Determinación de uso	26
3.1.7 Análisis estadístico	26
4. Resultados y discusión	28
4.1 Resultados y discusión objetivo 1	28
4.1.1 Características fisicoquímicas	28
4.1.1.1 Color	29

4.1.1.2 Contenido de humedad, gravedad específica, glucosa, sacarosa, almidón, proteínas, cenizas y grasas.....	30
4.1.2 Características funcionales.....	37
4.1.2.1 Contenido de compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante.....	38
4.1.2.1 Contenido de vitamina C, hierro, zinc y carotenoides totales.....	41
4.2 Resultados y discusión objetivo 2.....	45
4.2.1 Efecto de las condiciones agroclimáticas (ambiente/localidad) sobre las características fisicoquímicas	45
4.2.2 Efecto de las condiciones agroclimáticas (localidad o ambiente) sobre las características funcionales	47
4.2.4 Análisis de estabilidad, método AMMI.....	51
4.3 Resultados y discusión objetivo 3.....	61
5. Conclusiones	68
6. Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas	71
Apéndices.....	76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Descripción de las principales condiciones agroclimáticas (ambientes) de los sitios de evaluación</i>	22
Tabla 2 <i>Características físicoquímicas de genotipos de papa criolla Solanum tuberosum grupo Phureja cultivadas en las localidades de Chitagá, Mutiscua y Concepción 1 y 2</i>	30
Tabla 3 <i>Contenido de ácido clorogénico, ácido cafeico, ORAC, carotenoides totales, vitamina C, hierro y zinc de genotipos de papa criolla Solanum tuberosum Grupo Phureja cultivados en la localidad de Chitagá, Mutiscua, Concepción 1 y 2</i>	37
Tabla 4 <i>Análisis de varianza combinado para las variables humedad, cenizas, grasas, proteínas, almidón, glucosa, sacarosa de los seis clones de papa criolla evaluados en los ambientes de Chitagá, Mutiscua, concepción, de los departamentos de Santander y Norte de Santander.</i>	46
Tabla 5 <i>Análisis de varianza combinado para las variables ácido clorogénico, ácido cafeico, actividad antioxidante, carotenoides totales, hierro, zinc, de los seis clones de papa criolla evaluados</i>	48
Tabla 6 <i>Análisis de varianza combinado para la variable Vitamina C, de los seis clones de papa criolla evaluados en los ambientes de Chitagá, Mutiscua, concepción, de los departamentos de Santander y Norte de Santander</i>	50
Tabla 7 <i>Análisis AMMI de 3 genotipos de papa criolla según contenido de proteína y almidón, evaluados en 4 localidades de Santander y Norte de Santander, Colombia</i>	53
Tabla 8 <i>Análisis AMMI de 3 genotipos de papa criolla según contenido de ácido clorogénico, hierro, vitamina C y carotenoides totales, evaluados en 4 localidades de Santander y Norte de Santander</i>	53

Tabla 9 <i>Matriz FODA extracción de Ácido Clorogénico</i>	64
Tabla 10 <i>Matriz FODA extracción de carotenoides</i>	64
Tabla 11 <i>Criterios de evaluación</i>	65
Tabla 12 <i>Puntajes de valoración para cálculo de uso preferente del Clon 9</i>	66
Tabla 13 <i>Resultados de Evaluación del Puntaje Total por Opción de Uso</i>	67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Metodología empleada en la investigación</i>	20
Figura 2 <i>Color de piel y pulpa de tubérculos de papa de los genotipos de estudiados</i>	29
Figura 3 <i>Contenido de proteínas, de las variedades estudiadas en las diferentes localidades</i> ...	36
Figura 4 <i>Relación capacidad antioxidante vs contenido de polifenoles</i>	40
Figura 5 <i>Contenido de vitamina C, de las variedades estudiadas en las diferentes localidades</i>	42
Figura 6 <i>Contenido de carotenoides totales en los genotipos de estudio</i>	44
Figura 7 <i>Gráfico del contenido de almidón (g/100 g , BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el testigo Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	55
Figura 8 <i>Gráfico del contenido de proteínas (g/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el testigo Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	56
Figura 9 <i>Gráfico del contenido de ácido clorogénico (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	57
Figura 10 <i>Gráfico del contenido de vitamina C (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	58

Figura 11 <i>Gráfico del contenido de hierro (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	59
Figura 12 <i>Gráfico del contenido de carotenoides totales (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander</i>	60
Figura 13 <i>Interfaz gráfica para determinar usos de la papa criolla Solanum tuberosum grupo Phureja</i>	62
Figura 14 <i>Marco lógico</i>	63

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Resultados análisis de varianza combinado por localidad.....	76
Apéndice B. <i>Scores</i> de los componentes principales (CP 1, CP 2, CP 3) y la media para cada ambiente y genotipo, de los términos AMMI para el gráfico del biplot.....	84
Apéndice C. Matriz FODA de opciones de uso.....	86
Apéndice D. Formato de cuestionario para expertos	89

Glosario

Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis (AMMI): Modelo estadístico que combina el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los efectos principales de genotipos y ambientes, con el análisis de componentes principales (ACP) para estudiar la interacción genotipo × ambiente.

Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA): Herramienta estratégica que evalúa los factores internos (fortalezas y debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) de una organización, proyecto o producto, con el fin de orientar la toma de decisiones.

Análisis de varianza (ANOVA): Método estadístico que compara medias de dos o más grupos y determina si existen diferencias significativas entre ellas. En estudios de campo permite evaluar la influencia de factores como el genotipo, el ambiente y sus interacciones sobre variables de interés.

Capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC): Ensayo que mide la capacidad antioxidante de un alimento o compuesto, es decir, su habilidad para neutralizar radicales libres de oxígeno. Se expresa en micromoles equivalentes de Trolox por gramo de muestra ($\mu\text{mol ETrolox/g}$).

Condiciones agroclimáticas (CAC): Conjunto de factores ambientales y climáticos de una región (como temperatura, precipitación, humedad relativa, altitud y radiación solar) que influyen directamente en el crecimiento, desarrollo y calidad de los cultivos.

Estabilidad: propiedad de un genotipo que refleja su capacidad para mantener un desempeño consistente en distintas condiciones ambientales. En el análisis de interacción genotipo × ambiente, la estabilidad se asocia con la poca variación en las características de interés (físicoquímicas y funcionales) cuando el cultivo se evalúa en diferentes localidades o bajo condiciones agroclimáticas contrastantes.

Resumen

Título: Influencia de las variables agroclimáticas sobre las características fisicoquímicas y funcionales de cinco genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) y sus potenciales usos*

Autor: Lia Zamara Mora Vergara**

Palabras Clave: propiedades fisicoquímicas, propiedades funcionales, tubérculos de papa

Esta investigación evaluó el efecto del genotipo y las condiciones agroclimáticas (CAC) sobre las características fisicoquímicas y funcionales de cinco genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) y la variedad Criolla Colombia como testigo, en muestras crudas. Los genotipos fueron sembrados en cuatro localidades de Santander y Norte de Santander: Chitagá, Concepción 1 y 2 y Mutiscua; para evaluar la composición, estabilidad en los localidades evaluadas y el uso potencial. Los genotipos presentaron un alto contenido promedio de almidón (85.75 g/100 g) y de compuestos funcionales destacados como ácido clorogénico, ácido cafeico, vitamina C, hierro, zinc (178.78; 17.60; 97.18; 2; 1.32 mg/100 g, respectivamente), capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC - 59.56 $\mu\text{mol ETrolox/g}$) y carotenoides totales (61.06 $\mu\text{g/100 g}$); superando a la variedad testigo (84.01 g/100 g; 109.84 mg/100 g; 12.21 mg/100 g; 96.62 mg/100 g; 1.84 mg/100 g; 1.09 mg/100 g, 43.31 $\mu\text{mol ETrolox/g}$ y 46 $\mu\text{g/100 g}$, respectivamente). La interacción genotipo x CAC influyó significativamente en todas las variables estudiadas. Según el análisis AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction Analysis), la interacción explicó el 68.83% y 87.73% de la variabilidad en ácido clorogénico y carotenoides totales, respectivamente. Las CAC fueron determinantes en la variabilidad del almidón (61.41%), hierro (79.84%) y vitamina C (57.20%), mientras que el efecto del genotipo sobre el contenido de proteína (45.30%) fue mayor que el de las CAC. El clon 9 fue identificado como el genotipo más prometedor por su balance entre estabilidad y altos contenidos de compuestos funcionales, especialmente ácido clorogénico y carotenoides, lo que lo hace ideal para aplicaciones en alimentos funcionales y productos procesados con antioxidantes naturales. Este estudio resalta las ventajas fisicoquímicas y funcionales de los nuevos cultivares recientemente adaptados a Santander y Norte de Santander en comparación con la variedad comercial, su estabilidad en distintos ambientes y su potencial para diversas aplicaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Maestría en Ingeniería Química. Director: Luis Javier López Giraldo. Ph.D. en Ingeniería Química. Codirector: Víctor Gabriel Baldovino Medrano. Ph.D en Ingeniería Química. Codirectora: María del Socorro Cerón Lasso. Ph.D. en Ciencias Agrarias.

Abstract

Title: Influence of the agroclimatic variables on the physicochemical and functional characteristics of five diploid potato genotypes (*Solanum tuberosum* Phureja group) and their potential uses. *

Author(s): Lia Zamara Mora Vergara **

Key Words: physicochemical properties, functional properties, potato tubers

This research evaluated the effect of genotype and agroclimatic conditions on the physicochemical and functional characteristics of 5 genotypes (*Solanum tuberosum* Phureja group) and the Criolla Colombia variety as a control in raw samples. The genotypes were planted in four locations in the departments of Santander and Norte de Santander: Chitagá, Concepción 1 and 2 and Mutiscua; to analyze their composition, stability in the evaluated locations and potential use. The genotypes presented high average starch content (85.75 g/100 g) and prominent functional compounds such as chlorogenic acid, caffeic acid, vitamin C, iron, zinc (178.78; 17.60; 97.18; 2; 1.32 mg/100 g, respectively), ORAC (59.56 μmol ETrolox/g) and total carotenoids (61.06 $\mu\text{g}/100$ g); surpassing the control variety (84.01 g/100 g; 109.84 mg/100 g; 12.21 mg/100 g; 96.62 mg/100 g; 1.84 mg/100 g; 1.09 mg/100 g, 43.31 μmol Equiv Trolox/g and 46 $\mu\text{g}/100$ g, respectively). The genotype x CAC interaction significantly influenced the variability of all the variables studied. According to the AMMI (Additive Main effects and Multiplicative Interaction Analysis), the interaction explained 68.83% and 87.73% of the variability in chlorogenic acid and total carotenoids, respectively. The CACs were determinants in the variability of starch (61.41%), iron (79.84%) and vitamin C (57.20%), while the genotype had a more significant effect on the protein content (45.30%). Clone 9 was identified as the most promising genotype due to its balance between stability and high contents of functional compounds, especially chlorogenic acid and production of pigments from carotenoids, which makes it ideal for specific applications. This study highlights the physicochemical and functional advantages of the new cultivars recently adapted to Santander and Norte de Santander compared to the commercial variety, its stability in different environments and its potential for diverse applications.

* Degree Work

**Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Master's degree in chemical engineering. Director: Luis Javier López Giraldo. Ph.D. Chemical Engineering. Co-director: Víctor Gabriel Baldovino Medrano. Ph.D. Chemical Engineering. Co-director: María del Socorro Cerón Lasso. Ph.D. Agricultural Sciences.

Introducción

La papa es el cuarto cultivo alimentario más importante del mundo después del maíz, arroz y trigo (1), que pertenece a la familia de las Solanaceas y al género *Solanum*. La principal especie cultivada en todo el mundo es *Solanum tuberosum* L. y sus variedades son las más consumidas. Son nativas de los Andes de Sur América, pero su cultivo se ha extendido a más de 150 países (2) y se ha adaptado a un amplio rango de hábitats; lo que se refleja en sus diferentes formas (desde redondas, ovaladas, comprimidas, alargadas), colores (crema, amarillas, rojas, moradas, negruzcas, bicolor), y tamaños (muy grande, grande, mediano, pequeño) (3). Es el principal cultivo no cereal a nivel mundial, consumido por más de mil millones de personas, con una producción estimada de 388 millones de toneladas por año, producción encabezada por Asia, Europa y América (4).

Dentro de esta especie se encuentra la variedad *Solanum tuberosum* Grupo Phureja, la cual representa un importante aporte económico para los países andinos, incluyendo Colombia, que junto con Perú y Bolivia lidera su producción (5); con una producción estimada de 248 mil toneladas en un área de 15 mil ha y con un rendimiento de 16 t/ha hacia 2021(6). La forma de comercialización al mercado exterior más frecuente es la de procesada hacia papa precocida congelada y encurtida en lata o en vidrio y los principales países a los cuales se comercia son Estados Unidos, Japón, España y Reino Unido.

La papa criolla posee adaptación a días cortos entre siembra y cosecha (120 días), lo que abarata los costos de producción y permite realizar varios ciclos de cultivo al año (7) y es importante en los programas de mejoramiento de papa como el de la Colección de Trabajo de la corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA debido a sus destacadas

propiedades organolépticas y nutricionales, potencial de procesamiento industrial y cualidades culinarias (8).

A nivel nutricional, tiene un contenido bajo en grasa (0.2 g/100 g en Base Seca [BS]), posee proteína de alta calidad (6.4 g/100 g, BS) al tener un rico perfil de aminoácidos incluyendo la lisina que es un aminoácido esencial deficiente en cultivos principales como arroz, trigo y maíz, contiene almidón como el nutriente más abundante y se constituye en una excelente fuente de energía (123.11 kcal/100g BS).

A nivel funcional es una fuente importante de fibra (14.8 ± 0.3 g/100 g de fibra dietaria total) y de compuestos bioactivos incluyendo vitamina C (85.1 mg/100 g BS), minerales esenciales como hierro (2.2 ± 0.3 mg/100 g, BS) y zinc (2.3 ± 1.3 mg/100 g, BS) (5), carotenoides (1.5 mg/100 g, BS) y compuestos fenólicos (entre 245.2 hasta 524.8 en papa cocida y desde 161.6 - 442.7 mg Equivalente ácido gálico/100 g BS para papa cruda).

Este tubérculo también posee buenas propiedades para consumo en fresco y es atractivo para el procesamiento industrial debido a la variedad de productos que pueden derivarse de su procesamiento (papa precocida congelada, encurtida en lata o en vidrio, etc), donde se requiere que sea fácil de lavar (lo que favorece que la piel del tubérculo no se desprenda y se comercialice a buen precio), de tamaño grande (40 - 49 mm de diámetro), con contenidos altos de almidón (16.61 g/100 g, BH) y proteína (2.00 – 8.29 g/100 g, BS) y contenidos bajos de azúcares reductores (0.097 – 0.23 g/100 g, BS); además de gravedad específica entre 1.07 – 1.11; variables que se pueden obtener al cultivar papa criolla en altitudes entre 2000 y 3000 m.s.n.m, en suelos de tipo franco arenoso, de pH entre 5.0 y 5.9, con buen drenaje y con bajo contenido de materia orgánica y temperaturas promedio entre 10 y 20 °C (5)

Las propiedades de diferentes variedades comerciales como Criolla Colombia han sido estudiadas, y se ha encontrado que el genotipo, métodos de cocción, almacenamiento y las variables agroclimáticas (también conocidas como ambiente o localidad) tienen influencia sobre las características fisicoquímicas y funcionales (9). De igual manera se ha encontrado, que el rendimiento en procesamiento (rendimiento en frito) y la calidad industrial de la papa se ven influenciados por la interacción genotipo y ambiente al afectar el peso y tamaño del tubérculo, la gravedad específica, la concentración de azúcares reductores y el contenido de materia seca (10). Sin embargo, existe limitada información acerca de los nuevos cultivares desarrollados por los programas de mejoramiento, en especial de los clones 2, 8, 9 y de las variedades Sol Andina y Agrosavia Estrella de la colección de trabajo de AGROSAVIA en cuanto al contenido de compuestos funcionales y características fisicoquímicas, efecto de las condiciones agroclimáticas (CAC), genotipo y su interacción sobre el contenido de estos compuestos y sobre el potencial de procesamiento.

La anterior carencia de información conlleva a desconocimiento de atributos fisicoquímicos y funcionales, usos potenciales del tubérculo, y variabilidad de los contenidos de los genotipos en cuanto a los factores mencionados que limita la oferta de variedades y productos de calidad que podrían satisfacer las necesidades de los agricultores, industria, consumidores que buscan productos con valor agregado y de fácil y rápida preparación, y limita la información que permitiría identificar la estabilidad de estos genotipos en diferentes ambientes, es decir de genotipos superiores que puedan ser utilizados como progenitores en los programas de mejoramiento.

Es por lo que, el presente trabajo de investigación buscó estudiar *¿Cuál es la influencia de las variables agroclimáticas sobre las características fisicoquímicas y funcionales en cinco*

genotipos de papa diploide (Solanum tuberosum Grupo Phureja) y de qué forma esta información puede servir para plantear una opción de uso que permita ampliar la oferta de productos a partir de este tubérculo?

El Trabajo de Investigación se realizó en tres fases, la primera consistió en la caracterización fisicoquímica y funcional de los genotipos de papa criolla (Clon 2, Clon 8, Clon 9, Agrosavia Estrella, Sol Andina y Criolla Colombia (como testigo) proporcionadas por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA para determinar si se presentaron ventajas fisicoquímicas y funcionales de los genotipos de estudio frente al testigo.

La segunda fase correspondió al análisis de la interacción genotipo por ambiente, que conllevó a seleccionar el genotipo con mayor estabilidad. Esta estabilidad se evaluó considerando la influencia de variables agroclimáticas (precipitación, temperatura, contenido de hierro y zinc del suelo, y, altitud y tipo de pH del suelo) sobre las características fisicoquímicas y funcionales de los genotipos, particularmente proteína, almidón, ácido clorogénico, ácido cafeico, carotenoides totales, hierro y vitamina C, debido a su relevancia nutricional y funcional.

Este análisis se llevó a cabo mediante un análisis de varianza combinado y el modelo *Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis* (AMMI, por sus siglas en inglés), el cual combina el análisis de componentes principales (ACP) en un único modelo: aditivo para los efectos principales de genotipos y ambientes y multiplicativo para los efectos de interacción G*A (11).

Cabe resaltar que la interacción genotipo por ambiente (IGA) es un fenómeno complejo, ya que abarca condiciones ambientales (agroecológicas, climáticas y agronómicas) y todos los factores fisiológicos y genéticos que determinan el crecimiento y desarrollo de las plantas (12) y es de gran importancia en los estudios de estabilidad fenotípica, es decir, en la escogencia de un

genotipo que sea estable en varios ambientes y tenga rendimientos superiores e importantes a nivel de procesamiento.

En la tercera fase se realizó la identificación del uso potencial del genotipo con mayor estabilidad. En este contexto, la estabilidad se entiende como la capacidad de un genotipo para mantener un desempeño consistente en sus características fisicoquímicas y funcionales a través de diferentes ambientes de cultivo. Para esta fase se creó una interfaz en Visual Basic que permitió determinar usos potenciales según programación algorítmica basada en los parámetros de calidad encontrados en la literatura científica y relacionados con las ventajas fisicoquímicas y funcionales determinadas en la presente investigación. Los usos potenciales fueron evaluados a través de un análisis de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA), considerando aspectos de procesos de transformación, madurez tecnológica, mercado, insumos y recursos, sector, restricciones legales e innovación; permitiendo escoger dos ideas para usos potenciales que fueron posteriormente evaluadas por panel de expertos quienes escogieron el uso potencial priorizado.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar el efecto de las condiciones agroclimáticas (altitud, temperatura media del aire; tipo, pH y, concentración de hierro y zinc en suelo) sobre las propiedades fisicoquímicas y funcionales de cinco genotipos de papa diploide (*Solanum tuberosum* grupo Phureja) en cultivos en Santander y Norte de Santander planteando el uso potencial para el genotipo priorizado.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar las ventajas fisicoquímicas y funcionales de tres genotipos de papa criolla *Solanum tuberosum* grupo Phureja (Clon 2, 8, 9), y de variedad Agrosavia Estrella y Sol Andina, comparadas con el testigo Criolla Colombia.

Determinar la adaptación de los genotipos de papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) a las condiciones agroclimáticas (CAC) en relación con sus características fisicoquímicas y funcionales.

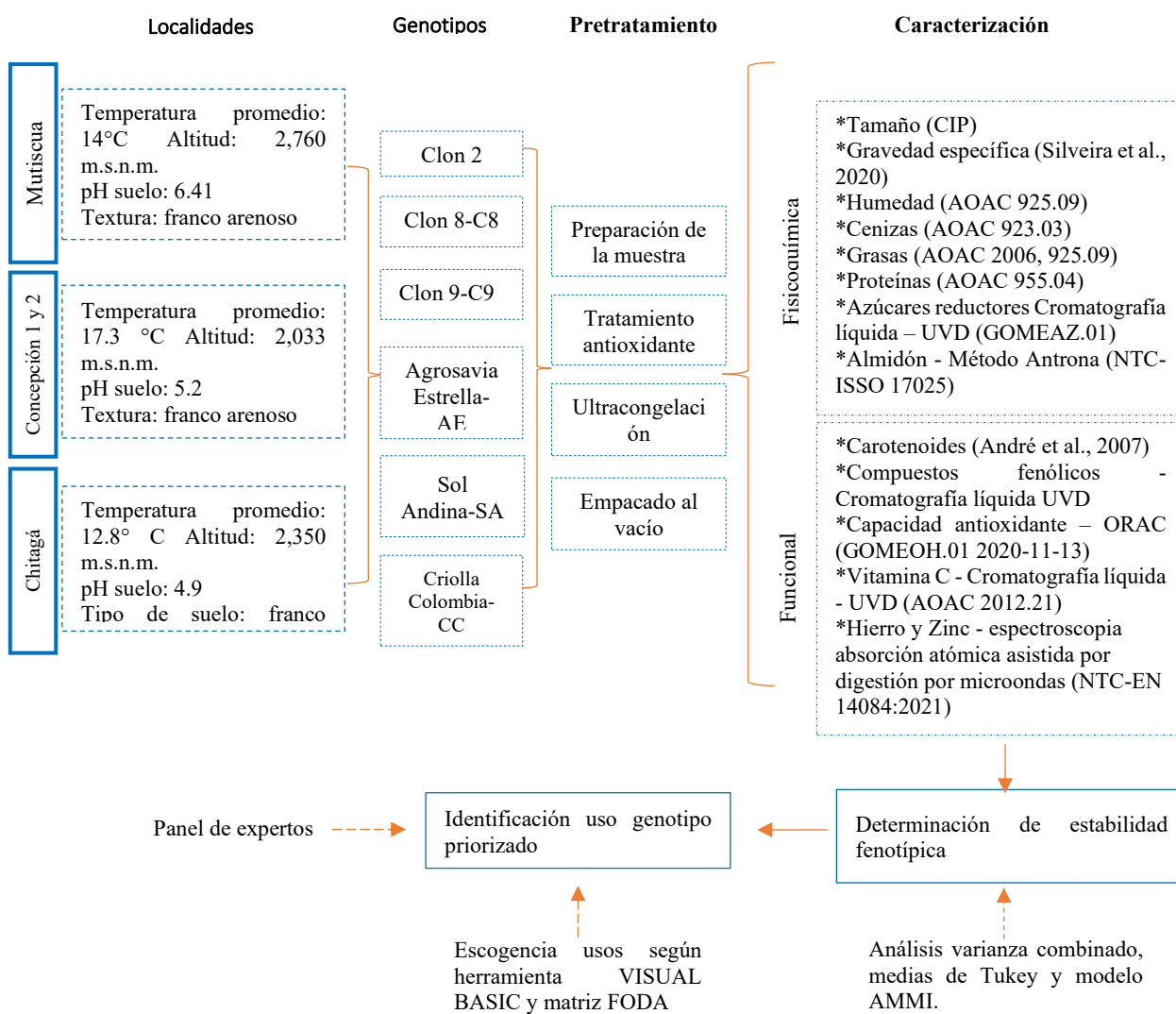
Identificar la mejor alternativa de uso para el genotipo priorizado en esta investigación a partir de los resultados obtenidos sobre las ventajas fisicoquímicas y funcionales.

3. Metodología

En la figura 1 se presenta el diseño metodológico empleado para la realización del presente Trabajo de Investigación.

Figura 1

Metodología empleada en la investigación



3.1 Materiales y métodos

La investigación hizo parte de las actividades desarrolladas dentro del proyecto “Investigación, vinculación y ampliación de la oferta tecnológica disponible para el mejoramiento productivo del cultivo de papa en los departamentos de Santander, Norte de Santander” identificado con el código BPIN 2018000100186, financiado por Sistema General de Regalías (SGR) que es administrado por MINCIENCIAS.

3.1.1 Localización

Los municipios donde se establecieron los ensayos con los genotipos y la variedad testigo fueron: Chitagá ($7^{\circ}08'16''$ latitud norte y $72^{\circ}39'52''$ longitud oeste), Concepción ($6^{\circ}46'16''$ latitud norte y $72^{\circ}41'53''$ longitud oeste), Mutiscua ($7^{\circ}18'$ longitud oeste y $72^{\circ}45'$ longitud oeste); todas las actividades de siembra, manejo de los ensayos y cosecha fueron programados desde las coordinaciones del proyecto. En el Centro de Investigación La Suiza de AGROSAVIA, ubicado en la vereda Galápagos, municipio de Rionegro, Departamento de Santander, se realizó la recepción y pretratamiento de los tubérculos por cada uno de los genotipos y testigo evaluados. En el laboratorio CICTA del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Km 2, vía Guatiguará, Piedecuesta – Santander, se determinaron las características fisicoquímicas y funcionales de cada uno de los genotipos y testigo evaluados.

3.1.2 Información de las condiciones agroclimáticas (CAC)

En la tabla 1, se presentan las variables agroclimáticas más relevantes de los suelos en las localidades donde estuvieron sembrados los ensayos.

Tabla 1

Descripción de las principales condiciones agroclimáticas (ambientes) de los sitios de evaluación

Localidad	Departamento	Altitud (m.s.n.m)	Temperatura Promedio (°C)	Tipo de suelo	pH del suelo	Fe (ppm)	Zn (ppm)
Chitagá (CH)	Norte de Santander	2,350	12.80	Franco - Arenoso	4.90	396.00	4.15
Concepción 2 (CN2)	Santander	2,033	17.30	Franco – Arenoso	5.20	198.00	0.68
Concepción 1 (CN1)	Santander	2,033	17.30	Franco – Arenoso	5.20	198.00	0.68
Mutiscua (M)	Norte de Santander	2,760	14.00	Franco - Arenoso	6.41	221.17	4.27

Nota: Información proporcionada por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). Colombia 2021-2022.

3.1.3 Materiales biológicos

Las variedades Agrosavia Estrella, Sol Andina y Criolla Colombia provienen de cultivares que mantiene y conserva AGROSAVIA en el Plan Nacional de Semillas, los genotipos Clon 2, Clon 8 y Clon 9 proceden del banco de germoplasma vegetal que administra AGROSAVIA.

3.1.4 Diseño experimental

En campo se establecieron los ensayos utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, los tratamientos lo constituyeron los 5 genotipos evaluados más la variedad comercial Criolla Colombia como el testigo. La unidad experimental estuvo constituida de cuatro surcos por 10 m de longitud (largo) que representan 40 m²; la distancia de siembra fue de 1 m entre surcos y 30 cm entre plantas. Los datos obtenidos son producto de tres repeticiones de campo y tres réplicas de laboratorio.

3.1.3 Químicos y reactivos

Los solventes (de grado analítico o HPLC según se requiera) y el reactivo de fenol de Folin-Ciocalteu, carbonato de sodio, ácido gálico, ácido ascórbico, hidroxitolueno butilado (BHT), sal sódica de fluoresceína, Trolox® (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2 carboxílico), el

diclorhidrato de 2-azinobis(2-amidinopropano) (AAPH), ácido sulfúrico 95-97%, indicador mixto 5, ácido bórico 2%, ácido clorhídrico, se adquirieron de Sigma-Aldrich.

3.1.4 Preparación de la muestra

Tubérculos completos de papa (provenientes de las localidades Mutiscua, Concepción 1 y 2 y Chitagá) fueron lavados con agua del grifo enjuagados con agua destilada, se secaron con papel absorbente y se seleccionaron aquellos que presentaron tamaños con 4.5 cm de diámetro, llamado tamaño grande según la Resolución 3168 de 2015 del Instituto Colombiano Agropecuario-ICA (3). A continuación, se determinó el color de piel y pulpa siguiendo los lineamientos del Centro Internacional de la Papa (CIP) (13). Se halló el valor de gravedad específica mediante el uso de dinamómetro y determinando el peso en aire y peso en agua (14). Posteriormente se tomaron muestras de 500 g de papa de cada genotipo por separado del tamaño especificado y se cortaron en cuartos; luego se aplicó tratamiento antioxidante (L-cisteína 35 mM – ácido ascórbico 35 mM), calentamiento a $96 \pm 5^\circ \text{C}$ por 6 min, choque térmico a 4°C por 30 min y nuevamente choque término a 4°C por 30 min) (15); las muestras se sometieron a ultracongelación (-82°C) por 1 semana para luego realizar el proceso de liofilización a $-82 \pm 5^\circ \text{C}$, 5 Pa de presión por 48 h en equipo Biocool Vacuum Freeze Dryer. Los recipientes empleados para realizar el tratamiento antioxidante y ultracongelación fueron cubiertos con papel aluminio para evitar foto degradación de sus contenidos. Después del proceso de liofilización, las muestras liofilizadas de cada genotipo fueron homogenizadas en molino de tornillo sin fin de pasta, modelo Omega, para obtener polvo liofilizado de papa que fue tamizado con tamiz No. 40 para asegurar igual tamaño de partícula y homogenización de la muestra. Las muestras fueron empacadas al vacío y se mantuvieron en congelación a -20°C hasta análisis.

3.1.5 Análisis fisicoquímico

Se determinaron los colores de piel y pulpa siguiendo los lineamientos del Centro Internacional de la papa (CIP) (13), la gravedad específica (GE) se determinó mediante el uso de dinamómetro para la determinación del peso en aire y peso en agua empleando la fórmula $GE = [\text{Peso en aire} / (\text{peso en aire} - \text{peso en agua})]$ (14). El color de piel y pulpa se determinó según el protocolo del CIP (13).

Se estimaron los contenidos de humedad, cenizas, proteínas, grasas, azúcares reductores y almidón de acuerdo con los protocolos establecidos internamente en el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos - CICTA y la normativa establecida por la *Association of Analytical Chemists* (AOAC), con algunas modificaciones. Brevemente, el contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico por pérdida de peso a 103° C (AOAC 925,10). El contenido de cenizas se determinó por el método de calcinación o incineración a 550° C (AOAC 972.15). El contenido de proteínas se determinó según el método Kjeldahl usando 6.25 como factor de conversión de nitrógeno a proteína (AOAC 970.22). El contenido de grasas se determinó extrayendo la muestra liofilizada (3 g) con hexano por el método Soxhlet (AOAC, 2005). El contenido de almidón se determinó por el método Antrona (NTC-ISSO 17025).

3.1.6 Análisis funcional

Siguiendo los protocolos internos del CICTA, se determinó el contenido de vitamina C por cromatografía líquida - UVD (AOAC 2012.21), el contenido de hierro y zinc por espectroscopia de absorción atómica asistida por digestión por microondas (NTC-EN 14084:2021). Los extractos de compuestos polifenólicos se obtuvieron según norma interna del laboratorio CICTA - GOMEPT.01 V01 2021-09-13 y la capacidad antioxidante a partir del método de Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno [ORAC por sus siglas en inglés, (GOMEOH.01 2020-11-13)].

La cuantificación de compuestos fenólicos individuales se realizó según los descrito por M. Valiñas et al. (16) y Risner, C.H. (17), con algunas modificaciones. Brevemente, los extractos de compuestos fenólicos fueron concentrados a 15°C y 1000 psi de presión en evaporador rotatorio (BUCHI) y filtrados a través de un filtro de jeringa PDVF de 0.45 μm antes de la inyección y se guardaron en viales ámbar de 2 mL hasta análisis. El análisis se realizó mediante cromatografía líquida – UVD empleando un cromatógrafo líquido de alta eficiencia Thermo Dionex Ultimate 3000 con detector de múltiple longitud de onda, una columna Agilent Eclipse XDB-C18 (5 μm 12.5 x 2.13 mm de d.i). Se empleó una velocidad de flujo de 0.5 mL min^{-1} a temperatura ambiente y con temperatura de muestreador a 10° C. Las fases móviles fueron (A) agua de grado HPLC acidificada con H_3PO_4 al 4% y (B) metanol. El monitoreo simultáneo se fijó a 273 nm (catequina), 320 nm (ácidos clorogénico y cafeico). Para la cuantificación se utilizó el método de calibración estándar externo y las áreas de los picos. Los niveles de compuestos polifenólicos se expresaron en mg/100 g BS.

El contenido de carotenoides se determinó según la metodología descrita por André et al. (18) con algunas modificaciones. Se pesaron 500 mg de polvo liofilizado de papa en tubo falcon de 50 mL y se sometieron a extracción con 20 mL de solución de acetona que contenía BHT al 1% (P:V), el extracto se agitó en vortex por 20 s y se procedió a homogenizar en baño de ultrasonido por 10 min. Seguidamente se centrifugó a 4°C y 4500 rpm por 10 min. Se separó el sobrenadante y se transfirió a un frasco ámbar; el residuo fue sometido a doble extracción y luego se combinaron los tres sobrenadantes. Se tomaron alícuotas de 3 mL para determinación espectrofotométrica a longitud de onda de 450 nm utilizando un espectrofotómetro Genesys 20 (Thermo Spectronic).

El contenido total de carotenoides se calculó según lo descrito por F. Ibanez (19) y se expresó como $\mu\text{g/g}$ de β -caroteno, en Base Seca (BS).

3.1.7 Determinación de uso

Se creó una Interfaz en Visual Basic que permite identificar uso potencial de los genotipos bajo estudio mediante los parámetros de calidad de la papa (físicoquímicos y funcionales) para usos específicos (harina, frituras, extracción de almidón, proteínas, carotenoides, ácido clorogénico o consumo en fresco); se realizó análisis de matriz FODA para escoger 2 usos que tuvieran mayores fortalezas y oportunidades y menores desventajas y amenazas para el genotipo priorizado para luego someter los usos de este análisis a evaluación por panel de expertos y determinar el uso o consumo del genotipo priorizado.

3.1.7 Análisis estadístico

Los datos obtenidos para todas las variables fueron sujetos a análisis de varianza (ANOVA, Analysis Of Variance, según terminología inglesa) combinado, comparación entre medias utilizando la prueba de rango de Tukey ($p=0.05$) y análisis de estabilidad por el modelo Additive Main effects and Multiplicative Interaction (AMMI por sus siglas en inglés) empleando el programa SAS (SAS ® Enterprise Guide, Versión 8.3). El modelo se expresa como:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + (GA)_{ij} + E_{ijk}$$

donde:

Y_{ijk} : corresponde a la variable respuesta del i -ésimo genotipo obtenido en el j -ésimo ambiente y k -ésima repetición

μ : media general

G_i : efecto del i -ésimo genotipo

A_j : efecto del j -ésimo ambiente

$(GA)_{ij}$: efecto de la interacción entre el i -ésimo genotipo y el j -ésimo ambiente

E_{ijk} : efecto aleatorio del error experimental asociado al i-ésimo genotipo en el j-ésimo ambiente

La representación gráfica bidimensional (biplot) que visualiza simultáneamente la información de genotipos y ambientes, y permite ilustrar la interacción genotipo-ambiente para el análisis AMMI, se realizó en Jupyter lab versión gratuita que maneja el lenguaje de programación Python. El análisis de estabilidad se realizó sobre los contenidos de proteína, almidón, ácido clorogénico, ácido cafeico, carotenoides totales, hierro y vitamina C, por su relevancia nutricional y funcional.

4. Resultados y discusión

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos en la caracterización de los genotipos de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo *Phureja*), considerando sus propiedades fisicoquímicas, funcionales, el efecto de la interacción genotipo por ambiente en diferentes localidades de estudio y la identificación de los usos potenciales del genotipo priorizado según sus atributos diferenciales. El análisis se organiza de acuerdo con los objetivos específicos planteados en la investigación.

4.1 Resultados y discusión objetivo 1

Con el fin de establecer las ventajas comparativas de distintos materiales de papa criolla *Solanum tuberosum* grupo *Phureja*, se evaluaron las características fisicoquímicas y funcionales de los genotipos Clon 2, 8 y 9, así como de las variedades Agrosavia Estrella y Sol Andina, frente al testigo Criolla Colombia. El análisis de estos parámetros resulta fundamental, ya que permiten diferenciar los genotipos en aspectos relacionados con la calidad nutricional y el potencial de uso industrial.

4.1.1 Características fisicoquímicas

La figura 2 muestra el color de piel y pulpa de los genotipos Clon 2, 8, 9, Agrosavia estrella, Sol Andina y Criolla Colombia de las localidades de Chitagá, Mutiscua, Concepción 1 y Concepción 2 y en la tabla 2 se muestran los valores de contenido de humedad, gravedad específica, glucosa, sacarosa, almidón, cenizas, grasas y proteínas de los genotipos y localidades mencionadas anteriormente.

4.1.1.1 Color. Dentro de los genotipos de papa estudiados en las diferentes localidades, resaltó el color del Clon 8; este clon posee color de piel negruzco intenso y color de pulpa crema (en algunos tubérculos se presentó anillo vascular medula violeta); mientras los clones 2 y 9 y la variedad Agrosavia Estrella mostraron color de pulpa y piel amarillas, al igual que el testigo Criolla Colombia. La variedad Sol Andina presentó color de piel amarillo con intensidad intermedia y el color de la pulpa fue amarillo como se muestra en la figura 2.

Figura 2

Color de piel y pulpa de Tubérculos de papa de los genotipos de estudiados



La coloración de variedades de papa *Solanum tuberosum* no convencionales (papas de color rojo, morado, negruzco con sus diferentes tonalidades) como el Clon 8, está basada en el contenido de antocianinas (20); las antocianinas son consideradas fitoquímicos que poseen propiedades antioxidantes que pueden prevenir el riesgo de enfermedades crónicas y degenerativas asociadas a la edad, a la vez, tienen el potencial para ser empleados como pigmentos naturales en la industria de alimentos (21); luego, el Clon 8 no solo sería visiblemente atractivo por su coloración, sino que podría tener mayor contenido de antocianinas en comparación con demás genotipos bajo estudio y con respecto al testigo Criolla Colombia, lo que podría significar ventajas en términos de valor nutricional y funcionalidad en la industria alimentaria.

4.1.1.2 Contenido de humedad, gravedad específica, glucosa, sacarosa, almidón, proteínas, cenizas y grasas. En la tabla 2 se muestran los valores de contenido de humedad (%), gravedad específica, glucosa, sacarosa, almidón, cenizas, grasas y proteínas (en g/100 g, Base Seca [BS]) para los genotipos Clon 2 (Cl_2), 8 (Cl_8), 9 (Cl_9); variedades Agrosavia Estrella (AE) y Sol Andina (SA) y para el testigo Criolla Colombia (CC) de las localidades de Chitagá (Chit), Mutiscua (Muti), Concepción 1(Conc_1) y Concepción 2 (Conc_2).

Tabla 2

Características fisicoquímicas de genotipos de papa criolla Solanum tuberosum grupo Phureja cultivadas en las localidades de Chitagá, Mutiscua y Concepción 1 y 2

Localidad	Genotipo	Contenidos expresados en Base Seca								
		Humedad (%)	Gravedad específica	Glucosa (g/100 g)	Sacarosa (g/100 g)	Almidón (g/100 g)	Proteína (g/100 g)	Cenizas (g/100 g)	Grasa (g/100 g)	
Chitagá	Clon 2	97.19 ± 0.14 ^{bcd}	1.05 ± 0.02 ^{ab}	0.23 ± 0.01 ^{hij}	0.42 ± 0.01 ^c	92.37 ± 0.49 ^{ab}	0.92 ± 0.03 ^c	2.50 ± 0.00 ^h	0.73 ± 0.01 ^{bcd}	
		Clon 8	97.44 ± 0.03 ^{abc}	1.05 ± 0.02 ^{ab}	0.50 ± 0.20 ^{fgh}	0.29 ± 0.01 ^{def}	81.26 ± 1.23 ^{fgh}	1.40 ± 0.02 ^a	3.10 ± 0.05 ^{defg}	0.59 ± 0.00 ^{efgh}
	Clon 9		98.87 ± 0.53 ^a	1.04 ± 0.00 ^b	0.41 ± 0.15 ^{ghij}	0.25 ± 0.00 ^f	93.75 ± 2.37 ^a	1.15 ± 0.04 ^{bc}	3.19 ± 0.01 ^{bcd}	0.51 ± 0.02 ^{hi}
		Agrosavia Estrella	93.84 ± 0.72 ^{fghi}	1.08 ± 0.01 ^{ab}	0.27 ± 0.00 ^{hij}	0.23 ± 0.00 ^f	89.01 ± 0.28 ^{abcde}	1.08 ± 0.02 ^{bcd}	2.73 ± 0.01 ^{gh}	0.84 ± 0.10 ^{ab}
	Criolla Colombia		96.91 ± 0.09 ^{bcd}	1.05 ± 0.01 ^{ab}	0.26 ± 0.01 ^{hij}	0.27 ± 0.02 ^{ef}	89.35 ± 0.59 ^{abcd}	1.11 ± 0.02 ^{bc}	3.14 ± 0.08 ^{cdef}	0.66 ± 0.02 ^{defg}
		Concepción 1	Clon 2	94.46 ± 0.78 ^{efgh}	1.07 ± 0.01 ^{ab}	0.46 ± 0.0058 ^{fghi}	0.28 ± 0.00 ^{def}	79.28 ± 1.92 ^{ghi}	1.09 ± 0.04 ^{bcd}	3.38 ± 0.24 ^{bcd}
	Clon 8			96.81 ± 0.43	1.05 ± 0.01 ^{ab}	1.28 ± 0.03 ^b	0.38 ± 0.02 ^{de}	89.92 ± 1.09 ^{abcd}	1.47 ± 0.01 ^a	3.55 ± 0.02 ^{ab}
Clon 9			95.08 ± 0.60 ^{ef}	1.06 ± 0.01 ^{ab}	0.69 ± 0.03 ^{def}	1.28 ± 0.04 ^a	86.27 ± 1.85	1.17 ± 0.01 ^b	3.53 ± 0.024 ^{abc}	0.53 ± 0.00 ^{ghi}
	Agrosavia Estrella		97.16 ± 0.11 ^{bcd}	1.05 ± 0.01 ^{ab}	0.63 ± 0.12 ^{efg}	0.38 ± 0.09 ^{cde}	89.02 ± 0.77 ^{abcde}	1.16 ± 0.01 ^{bc}	2.97 ± 0.00 ^{efg}	0.80 ± 0.00 ^{bc}
Criolla Colombia			94.14 ± 0.89 ^{efghi}	1.06 ± 0.00 ^{ab}	0.39 ± 0.02 ^{ghij}	0.26 ± 0.01 ^f	83.93 ± 2.07 ^{defg}	1.18 ± 0.00 ^b	2.88 ± 0.06 ^{efgh}	0.59 ± 0.01 ^{fgh}
	Concepción 2		Clon 2	95.69 ± 0.14 ^{de}	1.05 ± 0.01 ^{ab}	0.91 ± 0.01 ^{cd}	0.43 ± 0.01 ^c	83.17 ± 0.89	1.41 ± 0.03 ^a	3.19 ± 0.24 ^{bcd}
Clon 8				93.40 ± 0.05 ^{ghi}	1.08 ± 0.07 ^{ab}	1.17 ± 0.00 ^{bc}	0.48 ± 0.01 ^{bc}	80.55 ± 4.53 ^{hi}	1.44 ± 0.04 ^a	3.52 ± 0.12 ^{abc}
		Clon 9	94.87 ± 0.02 ^{efg}	1.06 ± 0.01 ^{ab}	0.22 ± 0.01 ^{ij}	0.39 ± 0.04 ^{cd}	86.59 ± 0.61 ^{cdef}	1.06 ± 0.01 ^{bcd}	2.95 ± 0.04 ^{efg}	0.73 ± 0.00 ^{bcd}
Sol Andina			97.99 ± 0.28 ^{abc}	1.05 ± 0.01 ^a	1.55 ± 0.01 ^a	0.46 ± 0.00 ^{bc}	77.98 ± 0.19 ^{ghi}	1.11 ± 0.05 ^{bc}	3.86 ± 0.09 ^a	0.98 ± 0.02 ^a
		Criolla Colombia	98.50 ± 0.33 ^{ab}	1.04 ± 0.00 ^{ab}	0.78 ± 0.02 ^{de}	0.29 ± 0.00 ^{def}	86.91 ± 0.11 ^{bcd}	1.18 ± 0.03 ^b	3.06 ± 0.01 ^{defg}	0.43 ± 0.00 ⁱ
Mutiscua			Clon 2	92.76 ± 0.07 ⁱ	1.08 ± 0.015 ^a	0.16 ± 0.00 ^j	0.56 ± 0.01 ^b	87.55 ± 0.37 ^{bcd}	0.97 ± 0.01 ^{cde}	2.76 ± 0.00 ^{fgh}
		Clon 9		93.13 ± 0.25 ^{hi}	1.08 ± 0.08 ^a	0.47 ± 0.01 ^{fghi}	0.24 ± 0.00 ^f	81.78 ± 0.28 ^{ghi}	0.96 ± 0.03 ^{de}	2.86 ± 0.05 ^{efgh}

Localidad	Genotipo	Contenidos expresados en Base Seca							
		Humedad (%)	Gravedad específica	Glucosa (g/100 g)	Sacarosa (g/100 g)	Almidón (g/100 g)	Proteína (g/100 g)	Cenizas (g/100 g)	Grasa (g/100 g)
Sol Andina		97.84 ±	1.05 ±	0.46 ±	0.24 ±	90.22 ±	1.16 ±	2.81 ±	0.73 ±
		0.12 ^{abc}	0.01 ^{ab}	0.02 ^{fg}	0.00 ^f	0.22 ^{abc}	0.05 ^{bc}	0.03 ^{efgh}	0.01 ^{bcd}
Criolla		98.29 ±	1.04 ±	0.71 ±	0.29 ±	75.84 ±	1.04 ±	2.91 ±	0.76 ±
Colombia		0.04 ^{abc}	0.00 ^{ab}	0.00 ^{def}	0.01 ^{def}	2.00 ⁱ	0.01 ^{cde}	0.01 ^{efg}	0.00 ^{bcd}

Nota. Los resultados se expresaron como promedio de 3 mediciones ($n = 3$) ± SD. Las medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0.05$).

Los valores mínimo y máximo de humedad se encontraron en los clones 2 en Mutiscua (92.7606 g/100 g BS) y 9 en Chitagá (98.8677 g/100 g BS), respectivamente; estos valores son similares a los hallados por R.G. Pinhero et al. (65% - 96%) para polvos liofilizados de 14 variedades de papa de Ontario Canadá (22), aunque el valor máximo en esta investigación superó el del intervalo superior de la referencia.

En promedio, los valores de humedad (95.9766 g/100g, BS) para los 5 genotipos estudiados en las diferentes condiciones agroclimáticas (CAC), aunque altos para tubérculos de papa comerciales, son ligeramente menores que el promedio para el testigo Criolla Colombia (96.9605 g/100 g, BS), lo que podría significar una oportunidad de mejora en cuanto al control de esta variable en los programas de fitomejoramiento y ventajas fisicoquímicas de estos frente al testigo. A pesar de la alta humedad, estudios han encontrado que el alto contenido de agua de diferentes cultivares de papa puede ejercer un efecto positivo significativo sobre su impacto glicémico en comparación con alimentos ricos en carbohidratos como la pasta y arroz (23,24); luego, el hecho de que los genotipos estudiados tengan contenido de humedad alta puede ser favorable en cuanto al uso de papa para consumo en fresco sin que haya un aumento del índice glicémico.

Cabe señalar que la humedad presentó una alta correlación negativa con gravedad específica ($r = -0.9358$), resultado similar a lo reportado por Garnica et al. Este resultado puede ser debido al efecto de dilución del agua sobre los compuestos en la papa (25).

Los valores de gravedad específica (GE) variaron entre 1.0367 (Clon 9 en Chitagá) y 1.0833 (Clon 2 y Clon 9 en Mutiscua) como se muestra en la tabla 2. Las principales diferencias significativas se presentaron entre Clon 9 en Chitagá (1.0367) y clones 2 y 9 en Mutiscua (ambos de GE= 1.0833) y entre Agrosavia Estrella en Concepción 2 (1.0493) y nuevamente los clones 2 y 9 en Mutiscua. Valores de GE mayores o iguales a 1.070 son preferibles para el potencial uso de la papa hacia productos procesados; luego los genotipos Cl_2-Muti, Cl_8-Conc_2 (1.0806), C9-Muti y AE-Chit (1.0806) tendrían ventajas fisicoquímicas sobre el testigo Criolla Colombia (1.0483) respecto a la variable gravedad específica y podrían ser recomendados para la industria del procesamiento. Los clones con contenidos de gravedad específica por debajo de 1.070 (como la variedad Sol Andina) podrían ser empleados para consumo directo en forma cocida o en conserva (26).

Entre los azúcares libres de las muestras estudiadas se detectaron el monosacárido glucosa (azúcar reductor) y el disacárido sacarosa. El contenido de glucosa varió desde 0.1555 g/100 g, BS para Clon 2 en la localidad Mutiscua hasta 1.5538 g/100 g, BS para Sol Andina en la localidad Concepción 2, con una variación significativa de 10.26 veces entre el valor más bajo y alto. Contenidos de azúcares reductores inferiores al 0.5% son recomendables para el procesamiento industrial ya que niveles de azúcares reductores más altos favorecerían las reacciones de pardeamiento lo que conllevaría a colores y sabores desagradables en los productos (25). Tres de los genotipos bajo estudio mostraron valores promedio de glucosa menores al 0.5%, estos fueron el clon 2 en Mutiscua (0.1555 g/100 g, BS), Agrosavia Estrella en Chitagá (0.2739 g/100 g, BS) y Clon 9 en Mutiscua (0.4743 g/100 g, BS) y fueron menores al promedio del testigo Criolla Colombia (0.5377 g/100 g, BS) encontrado en las diferentes condiciones agroclimáticas (CAC),

presentando ventajas fisicoquímicas con respecto al testigo y con posible uso hacia procesamiento industrial.

En cuanto a los niveles de sacarosa, estos oscilaron desde 0.2304 g/100 g, BS (para Agrosavia Estrella de Chitagá) hasta 1.2761 g/100 g, BS (para Clon 9 de Concepción 1), con una variación de 5.54 entre el valor más bajo y alto. Solo dos genotipos, clon 9 en Mutiscua (0.2426 g/100 g, BS) y Agrosavia Estrella en Chitagá (0.2304 g/100 g, BS) presentaron niveles de sacarosa menores al promedio Criolla Colombia (0.2788 g/100g, BS) y por lo tanto ventajas fisicoquímicas con respecto al testigo, teniendo en cuenta esta variable. La sacarosa puede ser convertida hacia glucosa y fructosa aún a temperaturas inferiores a 10°C (por ejemplo en el proceso de liofilización), al acumularse estos azúcares libres se pueden generar reacciones de pardeamiento no enzimáticas y formación de acrilamida durante el procesamiento hacia fritura u productos horneados, luego son preferibles genotipos de papa con bajos niveles de este disacárido así como de los azúcares reductores glucosa y fructosa para minimizar los niveles de este compuesto en los productos (27); por lo tanto, el Clon 9 en Mutiscua y la variedad Agrosavia Estrella en Chitagá podrían tener menor riesgo de producción de acrilamida en su procesamiento hacia frituras y productos horneados en comparación con el testigo.

La papa es considerada como buena fuente de almidón, luego se esperaba que su contenido fuera alto (mayor a 72 g/100 g, BS), lo cual fue confirmado en la presente investigación donde el contenido de almidón varió desde 77.9806 g/100 g, BS para Criolla Colombia en la localidad Mutiscua hasta 93.7496 g/100 g, BS para Clon 2 de la localidad de Chitagá. Dentro de los genotipos bajo estudio, los clones 2 y 9 y la variedad Agrosavia Estrella tuvieron contenidos promedio de almidón (85.5929, 86. 6949 y 89.0114 g/100 g, BS, respectivamente) mayores al testigo Criolla Colombia (84.0095 g/100 g, BS); teniendo ventajas fisicoquímicas sobre el testigo.

Es importante señalar que para obtener frituras de papa más crocantes y con menor contenido de aceites al igual que harinas menos susceptibles a oxidación, se requieren altos valores de gravedad específica (>1.070) y bajo contenido de azúcares reductores como la glucosa (entre $0.09 - 0.3$ g/100 g; BS); adicionalmente, para el procesamiento hacia extracción de almidón de papa, se requieren altos valores de gravedad específica (>1.070), alto contenido de almidón (mayores a 72 g/100 g, BS) y contenido de azúcares reductores inferior al 0.5% (26). Teniendo en cuenta lo anterior, los genotipos con mayores ventajas para ser usados en frituras y harinas serían se presenta en los clones 2 (GE: 1.0833; glucosa: 0.1555 g/100 g, BS) en la localidad Mutiscua y la variedad Agrosavia Estrella (GE: 1.0806; glucosa: 0.2739 g/100 g, BS) en la localidad Chitagá; así mismo, estos genotipos más el Clon 9 en Mutiscua (GE: 1.0833; Glucosa: 0.4743 g/100 g. BS; Almidón: 81.7760 g/100 g; BS), serían buenos candidatos para el procesamiento relacionado con la obtención de almidón.

Los contenidos de cenizas [2.5092 (Clon 2 -Chitagá) – 3.8609 (Sol Andina-Concepción 2) g/100 g; BS] y grasa [0.4330 (Criolla Colombia-Concepción 2) – 0.9784 (Sol Andina-Concepción 2) g/100 g] se encuentran en concordancia con lo reportado por Narváez-Cuenca y compañía [($2.3 - 6.9$ g/100 g; BS); ($0.1 - 0.8$ g/100 g; BS), respectivamente], para genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja. Los clones 2, 8, 9 y la variedad Sol Andina, en promedio, tienen valores de contenido de cenizas (2.9599 , 3.393 , 3.1380 y 3.3352 g/100 g, BS, respectivamente) mayores que el valor promedio del testigo Criolla Colombia (2.9966 g/100 g, BS), esto significa ventajas en cuanto al contenido de minerales de dichos genotipos sobre el control; por ejemplo, se ha encontrado que altos contenidos de cenizas ($>1.1\%$) se relacionan con buen contenido de minerales (25).

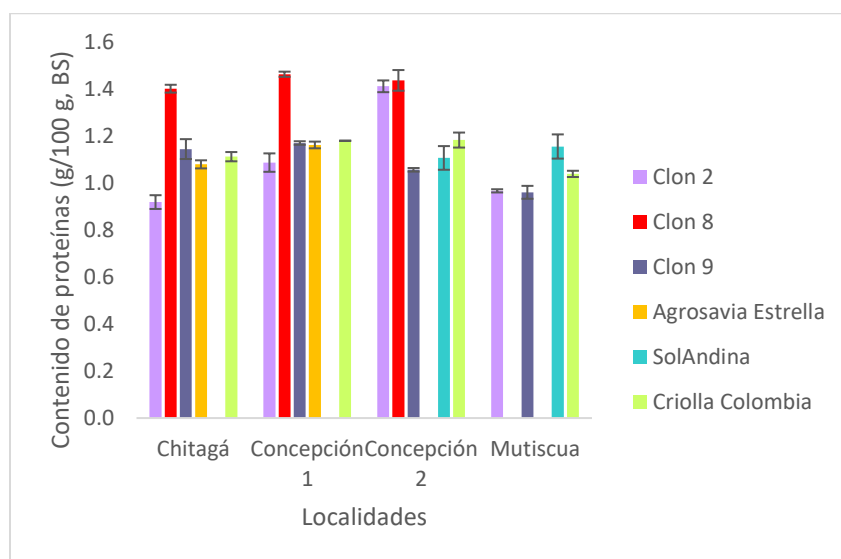
En cuanto al contenido de grasas, solo el Clon 2 (0.6019 g/100 g, BS) presenta valores promedio de grasa menores que el testigo Criolla Colombia (0.6102 g/100 g, BS); a pesar de esto, como lo corrobora este estudio, el contenido de grasa en papa sigue siendo bastante bajo; debido a ello, su consumo en fresco es nutricionalmente ventajoso al no aumentar los índices de ácidos grasos, ya que investigaciones previas han encontrado que la ingesta de tubérculos de papa solo provee entre el 4% de ácidos grasos saturados, y en gran medida estos se atribuyen a la adición de margarina u aceites en el procesamiento de papa en preparaciones culinarias; adicionalmente, los lípidos presentes en papa (fosfolípidos, galactolípidos, acilgliceroles y ácidos grasos libres) son elementos estructurales de membranas biológicas (28), lo que permitiría que se favorezca el uso de los ácidos grasos de la papa por el organismo hacia la formación de membranas.

Los valores de proteína oscilaron entre 0.9204 g/100 g, en Base Seca (BS) para Clon 2 de Chitagá y 1.4651 g/100 g, BS para Clon 8 de Concepción 1. Se encontró que para el Clon 2 se duplica el contenido de proteínas cuando se cambia de la localidad Chitagá a Concepción 2. El clon 8, de color piel negruzca, fue el genotipo que mostró el mayor contenido de proteínas (figura 3) superando al valor promedio (1.1302 g/100 g, BS) y el valor más alto [1.1846 g/100 g; BS, Concepción 2] del testigo Criolla Colombia. Aunque dichos valores son bajos y menores a lo reportado por Narváez-Cuenca y compañía para Criolla Colombia [4.0 g/100 g, en Base Seca (BS)] (29) y por debajo del contenido mínimo reportado por este autor para Cultivares de la Colección Central Colombiana (1.8 g/100 g, BS), se recomienda estudiar más a fondo el clon 8 en programas de mejoramiento con respecto a esta variable; esto debido a que i) valores bajos de proteína (<2%) facilitan el proceso de extracción de almidón lo que permitiría potenciar su procesamiento para este fin; ii) a pesar de que la papa se caracteriza por poseer valores bajos de proteína en comparación con alimentos básicos como el maíz y frijol, su proteína es de alta calidad por su alto

valor biológico, VB (VB: 70-90), comparable con el del huevo de gallina (VB: 100) y mayor que en cereales como el arroz (VB:73), soja (VB: 84), legumbres (VB: 73) y otros tubérculos; además, se ha documentado que posee un alto contenido del aminoácido esencial lisina (30,31), presente en menores cantidades en los alimentos básicos mencionados lo que sería prometedor para su consumo en fresco por su valor nutritivo y iii) teniendo en cuenta las ventajas de las papas coloreadas como fuente de antocianinas que poseen acción antioxidante, además de un color novedoso y presencia de proteínas de calidad, el clon 8 podría considerarse una alternativa importante a las clásicas papas amarilla tanto como alimento como materia prima para industrias diferentes a la alimentaria.

Figura 3

Contenido de proteínas, de las variedades estudiadas en las diferentes localidades.



En general, los genotipos mencionados ofrecen ventajas fisicoquímicas que los posicionan favorablemente frente al testigo Criolla Colombia, especialmente Clon 2, Clon 9 y Agrosavia Estrella por su alta gravedad específica y mayor contenido de almidón, ideal para el procesamiento industrial; adicional a su bajo contenido de glucosa y sacarosa que disminuye el riesgo de

pardeamiento enzimático y la formación de compuestos nocivos como acrilamida. Particularmente, el Clon 8 se destaca del testigo por su mayor contenido de cenizas y proteínas, su color atrayente y la posibilidad de contener un mayor contenido de antocianinas, aportando propiedades antioxidantes. Esto sugiere que los genotipos estudiados podrían ofrecer mayores beneficios tanto para la salud humana como para la industria alimentaria.

4.1.2 Características funcionales

Los valores del contenido de compuestos polifenólicos o polifenoles (ácido clorogénico, ácido cafeico, catequina), ORAC, vitamina C, hierro, zinc y carotenoides totales, se encuentran ubicados en la Tabla 3, como el promedio de tres réplicas experimentales.

Tabla 3

Contenido de ácido clorogénico, ácido cafeico, ORAC, carotenoides totales, vitamina C, hierro y zinc de genotipos de papa criolla Solanum tuberosum Grupo Phureja cultivados en la localidad de Chitagá, Mutiscua, Concepción 1 y 2

Localidad	Genotipo	Ácido clorogénico (mg/100 g)	Ácido cafeico (mg/100 g)	Catequina (mg/100 g)	ORAC (μmol ETrolox/g)	Vitamina C (mg/100 g)	Hierro (mg/100 g)	Zinc (mg/100 g)	Carotenoides totales (μg/g β-caroteno)
Chitagá 2	Clon 2	117.59 ± 5.38 ^e	13.97 ± 0.13 ^{ghi}	16.22 ± 0.15 ^{def}	57.87 ± 7.28 ^{defg}	101.00 ± 0.07 ^f	1.52 ± 0.01 ^{ghi}	1.03 ± 0.00 ^h	23.52 ± 0.35 ⁿ
	Clon 8	229.45 ± 0.07 ^c	14.30 ± 0.02 ^{gh}	14.33 ± 0.04 ^f	60.89 ± 3.15 ^{cdef}	70.74 ± 1.18 ⁱ	2.15 ± 0.02 ^{ede}	1.30 ± 0.01 ^{ij}	35.71 ± 0.19 ^{jk}
	Clon 9	333.27 ± 1.77 ^b	20.89 ± 1.27 ^{de}	17.09 ± 0.68 ^{cdef}	76.90 ± 7.32 ^{bc}	123.03 ± 2.61 ^d	1.84 ± 0.02 ^{defgh}	1.18 ± 0.01 ^{ef}	123.72 ± 2.87 ^b
	Agrosavi a Estrella	104.57 ± 1.66 ^{ef}	10.18 ± 0.19 ^{ijk}	ND	47.75 ± 5.68 ^{efgh}	71.28 ± 0.02 ⁱ	1.56 ± 0.02 ^{ghi}	1.01 ± 0.00 ^j	77.40 ± 0.51 ^d
	Criolla Colombia	106.85 ± 0.09 ^{ef}	13.10 ± 0.24 ^{ghij}	13.89 ± 0.82 ^f	46.41 ± 1.79 ^{fgh}	125.33 ± 0.18 ^d	1.44 ± 0.01 ^{hi}	1.24 ± 0.00 ^d	24.53 ± 0.47 ⁿ
	Concepción 1	Clon 2	191.66 ± 13.09 ^d	30.29 ± 1.87 ^a	16.41 ± 0.21 ^{def}	65.13 ± 4.87 ^{bcd}	135.87 ± 1.30 ^e	2.20 ± 0.00 ^{cd}	1.08 ± 0.01 ^h
Clon 8		78.60 ± 2.57 ^{fg}	28.49 ± 0.49 ^{ab}	15.10 ± 0.77 ^f	55.04 ± 2.05 ^{defg}	ND	2.66 ± 0.00 ^b	1.41 ± 0.01 ^b	51.77 ± 0.24 ^g
Clon 9		125.99 ± 0.22 ^e	11.29 ± 0.32 ^{hij}	ND	45.27 ± 4.75 ^{fgh}	186.83 ± 0.30 ^a	2.13 ± 0.01 ^{cde}	1.21 ± 0.01 ^c	71.23 ± 0.03 ^e
Agrosavi a Estrella		129.28 ± 4.31 ^e	15.99 ± 0.53 ^{fg}	17.01 ± 0.61 ^{cdef}	35.27 ± 0.7977 ^h	95.33 ± 0.04 ^f	1.89 ± 0.00 ^{defg}	1.17 ± 0.00 ^f	76.74 ± 0.02 ^d
Criolla Colombia		111.61 ± 3.56 ^{ef}	16.24 ± 0.51 ^{fg}	19.50 ± 0.65 ^{cd}	36.0256 ± 1.2610 ^h	120.39 ± 0.00 ^{de}	2.10 ± 0.02 ^{de}	1.10 ± 0.05 ^{hi}	68.87 ± 1.20 ^e

Localidad	Genotipo	Ácido clorogénico (mg/100 g)	Ácido cafeico (mg/100 g)	Catequina (mg/100 g)	ORAC (μmol ETrolox/g)	Vitamina C (mg/100 g)	Hierro (mg/100 g)	Zinc (mg/100 g)	Carotenoides totales (μg/g β-caroteno)
Concepción 2	Clon 2	349.02 ± 9.37 ^b	24.29 ± 1.99 ^{cd}	26.99 ± 0.56 ^b	107.95 ± 3.07 ^a	82.37 ± 0.957 ^g	2.51 ± 0.02 ^{bc}	1.38 ± 0.02 ^b	151.79 ± 0.11 ^a
	Clon 8	337.04 ± 11.17 ^b	24.95 ± 1.05 ^{bc}	20.38 ± 1.07 ^c	63.42 ± 3.18 ^{bcde}	18.18 ± 0.07 ^j	3.08 ± 0.00 ^a	1.58 ± 0.01 ^a	27.54 ± 0.41 ^{mn}
	Clon 9	132.52 ± 7.63 ^c	12.62 ± 0.20 ^{ghij}	19.10 ± 2.35 ^{cd}	50.72 ± 6.40 ^{defgh}	179.22 ± 3.87 ^b	2.13 ± 0.03 ^{cde}	1.19 ± 0.01 ^{ef}	35.88 ± 0.14 ^{jk}
	Sol	115.95 ± 0.18 ^c	14.91 ± 0.02 ^{igh}	14.22 ± 0.63 ^f	35.05 ± 2.00 ^h	155.57 ± 19.64 ^c	1.98 ± 0.36 ^{def}	1.55 ± 0.00 ^a	81.20 ± 0.14 ^c
	Andina	140.34 ± 0.57 ^c	12.92 ± 0.23 ^{ghij}	15.43 ± 1.28 ^{ef}	48.21 ± 1.25 ^{efgh}	116.38 ± 0.98 ^c	2.08 ± 0.012 ^{dc}	1.12 ± 0.09 ^g	30.07 ± 0.05 ^{lm}
	Criolla								
	Colombia								
Mutiscua	Clon 2	61.41 ± 0.08 ^g	7.36 ± 0.02 ^k	69.46 ± 2.61 ^a	56.13 ± 7.37 ^{defg}	80.84 ± 0.87 ^g	1.37 ± 0.02 ⁱ	0.80 ± 0.00 ⁱ	39.68 ± 1.14 ^{ij}
	Clon 9	349.19 ± 12.04 ^b	9.50 ± 0.18 ^{jk}	5.86 ± 0.40 ^g	100.54 ± 2.37 ^a	73.68 ± 1.77 ^{hi}	1.56 ± 0.00 ^{ghi}	0.87 ± 0.00 ^k	41.52 ± 1.31 ⁱ
	Sol	180.90 ± 7.06 ^d	18.50 ± 0.71 ^{ef}	16.28 ± 0.89 ^{cd}	77.73 ± 4.69 ^b	79.33 ± 0.1922 ^{gh}	1.66 ± 0.02 ^{fghi}	0.87 ± 0.01 ^k	31.99 ± 0.15 ^{kl}
	Andina	80.57 ± 1.89 ^a	6.84 ± 0.12 ^k	27.63 ± 0.96 ^b	42.99 ± 1.79 ^{gh}	24.40 ± 0.07 ^j	1.76 ± 0.01 ^{eighi}	0.88 ± 0.00 ^k	60.51 ± 1.87 ^f
	Criolla								
	Colombia								

Nota. Los resultados se expresaron como promedio de 3 mediciones ($n = 3$) ± SD. Las medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey, $P \leq 0,05$)

4.1.2.1 Contenido de compuestos polifenólicos y capacidad antioxidante. Los compuestos polifenólicos individuales (ácido clorogénico, ácido cafeico, catequina) fueron identificados y cuantificados mediante Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC por sus siglas en inglés). El perfil de compuestos polifenólicos se mantuvo estable en todos los ambientes en términos de la composición química, aunque difirieron significativamente en cuanto a la cantidad. La concentración de ácido clorogénico fue mayor en comparación con los otros compuestos, con valores que oscilaron desde 61.4149 (Clon 2 - Mutiscua) a 349.1891 mg/100 g, BS (Clon 9 - Mutiscua); seguido de ácido cafeico con valores que variaron desde 6.8420 (Criolla Colombia - Mutiscua) hasta 30.2880 mg/100 g, BS (Clon 2 - Concepción 2) y catequina con valores que variaron desde por debajo del límite de detección hasta 69.4583 mg/100 g, BS (Clon 2 - Mutiscua). Es importante destacar que los genotipos de papa bajo estudio presentan contenidos promedio de ácido clorogénico y ácido cafeico significativamente superiores a los de otras opciones en el mercado. En particular, los clones 2 (179.9195 y 18.9753 mg/100 g, BS,

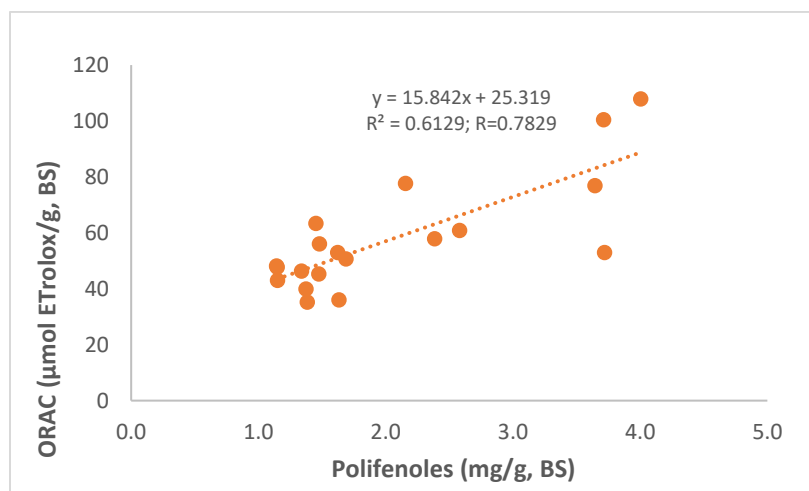
respectivamente), 8 (215.0294 y 22.5809 mg/100 g, BS, respectivamente) y 9 (235.2442 y 16.6587 mg/100 g, BS, respectivamente), así como la variedad Sol Andina (148.4238 y 16.7046 mg/100 g, BS, respectivamente), superan notablemente el contenido promedio del testigo Criolla Colombia (109.8428 y 12.2745 mg/100 g, BS, respectivamente). Esta ventaja funcional sugiere que estos genotipos podrían ofrecer beneficios adicionales en comparación con el control.

Adicionalmente, si se suman los polifenoles individuales cuantificados por HPLC (ácido clorogénico, ácido cafeico y catequina) para obtener los polifenoles totales (PT) como lo sugiere Deußer et al (32) tenemos que los genotipos con valores bajos de PT (Agrosavia Estrella, Criolla Colombia) serían menos susceptibles a la acción de la polifenol oxidasa y por lo tanto al pardeamiento enzimático lo que los haría aptos para procesamiento hacia fritura, mientras que los clones con valores altos de PT (Clon 2, Clon 8, Clon 9, Sol Andina) tendrían una mayor calidad funcional (33).

Los PT están directamente relacionados con la Capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC, por sus siglas en inglés), y por lo general los genotipos con mayor contenido de PT son los de mayor capacidad de absorción. En esta investigación, se encontró una correlación positiva entre el contenido de polifenoles totales y ORAC ($r=0.7829$), como se muestra en la figura 4; similar a lo reportado por Valiñas et al. (16), quienes hallaron correlación positiva entre los ácidos fenólicos y la capacidad antioxidante en pulpa ($r=0.96$) y piel ($r=0.91$) de papa.

Figura 4

Relación capacidad antioxidante vs contenido de polifenoles



El rango de valores para la capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC, por sus siglas en inglés), varió de 36.0256 (Criolla Colombia, Concepción 1) a 107.9531 (Clon 2 – Concepción 2) μmol de Equivalente Trolox (Etrolox)/g, BS. Estos valores se encuentran dentro del intervalo mostrado por André et al. (33.1 – 346.5 μmol de Etrolox/g, BS) (34). Los clones 2, 8, 9 y la variedad Sol Andina presentaron valores promedio (71.7717, 59.7836, 68.3606 y 56.3899 μmol de Etrolox/g, BS, respectivamente) superiores a los del testigo Criolla Colombia (43.3090 μmol de Etrolox/g, BS); mostrando ventajas funcionales con respecto al testigo.

Los compuestos polifenólicos, reconocidos por sus propiedades antioxidantes, se han asociado con efectos positivos en la prevención de enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes tipo 2, inflamación crónica y obesidad (35). Dichas características hacen que este grupo de compuestos bioactivos sea muy atractivo para las industrias alimentaria y farmacéutica. Los clones bajo estudio y la variedad Sol Andina podrían ser una excelente fuente de estos compuestos, añadiendo propiedades importantes para posicionar la papa criolla en el mercado.

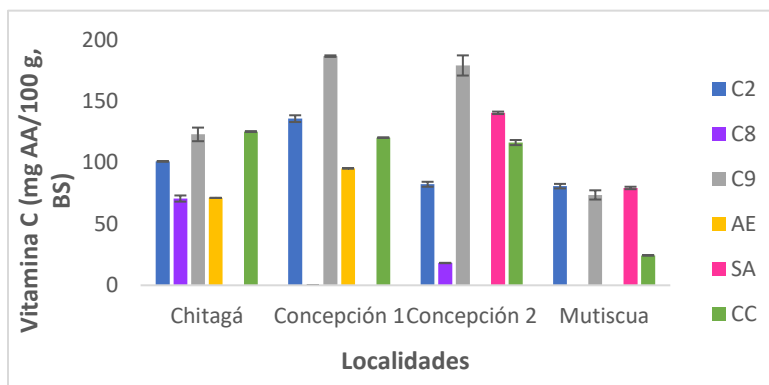
4.1.2.1 Contenido de vitamina C, hierro, zinc y carotenoides totales. Los genotipos estudiados presentaron un contenido significativo de vitamina C, hierro, zinc y carotenoides. El contenido de vitamina C varió considerablemente alcanzando valores de hasta 186.83 mg AA/100 g en base seca (BS) para el clon 9 de Concepción 1 (figura 5). Este valor fue notablemente superior a lo reportado por Thomás et al. (9.4–85.1 mg/100 g ; BS) y André et al. [21.770 – 68.947 mg AA/100 g; BS] (1,9) para papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja. Adicionalmente, el contenido promedio de vitamina C del clon 9 (140.6888 mg AA/100 g, BS) fue mayor al promedio presentado por el testigo criolla Colombia (96.6213 mgAA/100 g, BS), mostrando ventajas funcionales sobre este; característica de gran importancia para la industria de procesamiento e industria de alimentos.

La vitamina C es un antioxidante de gran interés en la protección contra el estrés oxidativo que puede contribuir a prevenir enfermedades degenerativas como cardiopatía o cáncer; además, actúa como un inhibidor natural de enzimas que causan el pardeamiento en papas, y potencia la absorción de hierro (36). Esta capacidad de la vitamina C para mejorar la absorción de hierro es particularmente relevante en el contexto de las concentraciones de hierro observadas en los diferentes clones de este estudio.

En relación con el hierro, las concentraciones variaron desde 1.3650 mg/100 g, BS (Clon 2 Mutiscua) hasta 3.0799 mg/100 g, BS (Clon 8 Concepción 2). Los genotipos con valores promedio de hierro mayores al testigo Criolla Colombia (1.8432 mg/100 g, BS) fueron los clones 2, 8 y 9 (1.9007, 2.6312 y 1.9151 mg/100 g, BS, respectivamente). Los máximos contenidos de hierro encontrados (3.0799 y 2.51 mg/100 g, BS, clon 8 y 9 de la localidad Concepción 2, respectivamente) fueron superiores a los reportados por Núñez et al. (5) para papa Criolla ($2,2 \pm 0,3$ mg/100 g) en el departamento de Cundinamarca, lo que indica que estos nuevos genotipos no solo son competitivos, sino que también pueden ofrecer beneficios nutricionales adicionales.

Figura 5

Contenido de vitamina C, de las variedades estudiadas en las diferentes localidades



A pesar de que el contenido de hierro en papa es bajo con respecto a legumbres y verduras, su contenido sigue siendo significativo debido a que la papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja contiene altos niveles de ácido ascórbico (mayores a 69.00 mg AA/100 g, BS), compuesto que es promotor de la absorción de hierro (37).

El contenido de zinc en los genotipos también fue evaluado. Las concentraciones de zinc oscilaron entre 0.7998 mg/100 g, BS para Clon 2 Mutiscua hasta 1.5823 mg/100 g, BS para Clon 8 Concepción 2; con los genotipos Clon 2, 8 y 9 y las variedades Sol Andina (1.7139, 1.5967, 1.1123 mg/100 g, BS, respectivamente), superando el contenido promedio del testigo (1.0855 mg/100 g, BS). Los mayores contenidos de zinc se encuentran dentro del rango intermedio reportado por André et al. [1.26 y 2.83 mg/100 g, BS] (21). El zinc es un micronutriente esencial que desempeña un papel crucial en el metabolismo de proteínas y carbohidratos y en la protección celular de la oxidación disminuyendo potencialmente el riesgo de cáncer. Por lo tanto, la inclusión de estos genotipos en la dieta podría ayudar a prevenir deficiencias de este micronutriente y contribuir a la seguridad alimentaria.

Se destaca que los mayores contenidos promedio de hierro presentados fueron encontrados en Concepción 2, localidad que contó con menor pH de suelo (5.20) que las localidades Chitagá y Mutiscua (6.4); posiblemente debido a que suelos con pH bajos aumentan la disponibilidad de hierro e incrementan su contenido en tubérculos de papa. Igualmente, los mayores valores para zinc se encontraron en Concepción 2, localidad con los valores más altos de proteínas, esto es importante porque la biodisponibilidad de zinc depende de la composición de la dieta y las proteínas en específico, podrían favorecer su absorción (21).

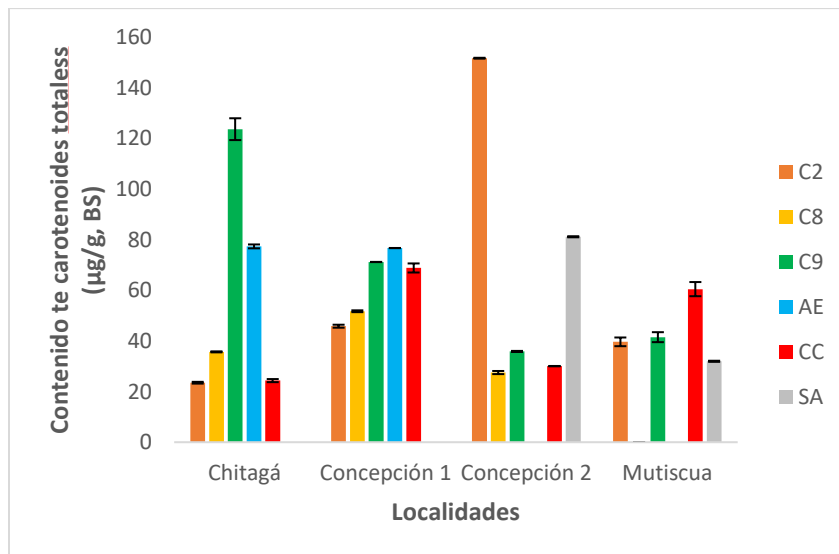
Finalmente, los carotenoides totales, que son compuestos bioactivos asociados con beneficios para la salud al contribuir a la prevención de enfermedades crónicas (38), también se encontraron en concentraciones elevadas en los clones estudiados. Las concentraciones de carotenoides totales oscilaron entre 23.5167 ± 0.3475 y 151.7875 ± 7.9436 $\mu\text{g/g}$ de β -caroteno en BS, correspondientes a los cultivares Clon 2 y Clon 9 respectivamente, ambos de la localidad Chitagá 2 (Figura 6); estos valores fueron superiores a los reportados por André et al. para cultivares nativos de los Andes de Sur América *Solanum tuberosum* L. (2.83 – 36.21 $\mu\text{g/g}$ en BS). El Clon 9 posee color de piel y pulpa amarilla, y es de esperarse que se encuentre mayor contenido de carotenoides en este tipo de papa pigmentada puesto que el contenido de carotenoides está asociado al color de la pulpa, encontrándose mayor cantidad de carotenoides totales en los tubérculos de pulpa amarilla (21). Al comparar el contenido promedio de carotenoides totales de los clones 2 y 9 con el testigo Criolla Colombia, se observa que este fue 1.4 y 1.5 veces mayor, respectivamente; lo que supone ventajas funcionales de estos nuevos genotipos con relación al control.

La mayor concentración de carotenoides totales reportada en este estudio fue superior a la mencionada en la literatura para papas crudas de *S. Phureja* (73.60 $\mu\text{g/g}$, BS) (39), lo que sugiere

que estos genotipos podrían ser utilizados no solo para el consumo fresco, sino también en la industria de colorantes alimentarios, como lo señalan Leyton et al. y Beltrán-Penagos et al. (40,41).

Figura 6

Contenido de carotenoides totales en los genotipos de estudio.



Teniendo en cuenta lo anterior, los genotipos estudiados, especialmente los clones 2, 8 y 9, se destacan como fuentes ricas en polifenoles y ORAC, vitamina C, hierro, zinc y carotenoides, y ofrecen oportunidades no solo como nutrientes esenciales para la salud humana al ser destinados para consumo en fresco, sino también para su uso en la industria alimentaria.

Cabe aclarar que debido a que los genotipos de papa criolla fueron pretratados con ácido ascórbico para evitar el pardeamiento enzimático, la alta concentración de vitamina C encontrada en los genotipos estudiados pudo estar afectada por el uso de este compuesto químico, ya que es probable que queden residuos en la superficie de las muestras (42).

Por otra parte, el hecho de que el contenido de compuestos bioactivos sea alto como ocurre con el contenido de vitamina C y carotenoides, puede estar relacionado con el efecto protector que

ejercent macromoléculas como las proteínas y fibra ante el procesamiento térmico, la degradación por oxígeno o por luz (43).

4.2 Resultados y discusión objetivo 2

El segundo objetivo buscó determinar el grado de estabilidad entre los genotipos y las condiciones agroclimáticas (CAC), sobre las características fisicoquímicas y funcionales de genotipos de papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) mediante el análisis de varianza combinado y el modelo AMMI (*Additive Main Effects and Multiplicative Interaction Analysis*).

4.2.1 Efecto de las condiciones agroclimáticas (ambiente/localidad) sobre las características fisicoquímicas

Los resultados del análisis de varianza combinado para cuatro condiciones agroclimáticas en las que se sembraron 6 genotipos de papa criolla para evaluar las variables de humedad (g/100 g), gravedad específica, glucosa (g/100 g), sacarosa (g/100 g), almidón (g/100 g), cenizas (g/100 g), grasas (g/100 g), proteínas (g/100 g), se presentan en la tabla 4. En general, se presentaron diferencias altamente significativas ($\alpha=0.01$) para las condiciones agroclimáticas (CAC - ambientes), los genotipos y la interacción genotipo x CAC, para todas las variables. Una interacción significativa entre genotipos y ambientes indica que los contenidos de las variables analizadas de los diferentes genotipos no varían en la misma medida entre ambientes (34); esto es debido a que la calidad nutricional es controlada por múltiples genes y la expresión final del genotipo es afectada por el ambiente (condiciones agroclimáticas o localidades) como lo señalan investigaciones previas (38). Luego, las condiciones agroclimáticas (ambiente o localidades) y su interacción afectan el contenido de los compuestos fisicoquímicos, como se observó en esta investigación.

El coeficiente de determinación (R^2) fue moderado para la variable gravedad específica (0.6716) y alto para todas las demás variables (0.9284 - 0.9860), lo que indica la calidad de la utilización del diseño para el modelo estadístico tanto en campo como en el laboratorio. El coeficiente de variación (CV) observado osciló entre valores bajos (0.5394% para la variable humedad) y aceptables (14.28497% para la variable Glucosa).

Para la variable gravedad específica se presentaron diferencias altamente significativas debido a los factores mencionados con anterioridad a un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

Tabla 4

Análisis de varianza combinado para las variables humedad, cenizas, grasas, proteínas, almidón, glucosa, sacarosa de los seis clones de papa criolla evaluados en los ambientes de Chitagá, Mutiscua, concepción, de los departamentos de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Humedad	Gravedad Específica	Glucosa	Sacarosa	Almidón	Cenizas	Grasas	Proteínas
Condiciones Agroclimáticas (CAC)	3	31.3021***	0.0021**	2.2858***	0.4471***	355.1403***	2.1785***	0.0449***	0.19289***
Bloque (CAC)	8	1.8111 ^{ns}	0.0013 ^{ns}	0.0166 ^{ns}	0.0013 ^{ns}	13.7041 ^{ns}	0.0111 ^{ns}	0.0010 ^{ns}	0.0111 ^{ns}
Genotipo	5	63.5756***	0.0035**	2.3306***	0.5119***	136.2249***	0.6667***	0.0948***	0.6666***
Genotipo x CAC	10	134.2885***	0.0073**	2.6774***	2.0213***	919.8330***	0.3945***	0.0536***	0.3945***
Error	30	8.0469	0.0064	0.2276	0.0422	113.6173	0.4838	0.0551	0.0499
Corregido	56	224.8949	0.0194	8.2831	3.0115	1586.6838	6.9419	1.2166	1.4715
Total									
R^2		0.96420.5	0.6721	0.9725	0.9860	0.9284	0.9303	0.9547	0.9661
CV		0.5394	1.3782	14.2849	9.5729	2.2781	4.0965	6.4940	3.5113
Promedio		96.0196	1.058	0.6097	0.3916	85.4249	3.0999	0.6598	1.1615

Nota. ns, *, **, ***: no significativo, diferencias significativas al 5%, 1% y 0.01% de probabilidad, respectivamente.

Según la suma de cuadrados, la interacción genotipo x CAC para las variables humedad, gravedad específica, glucosa, sacarosa, almidón, cenizas y grasas, afectó en mayor grado la variación total observada, en un 59.71%, 37.60%, 32.32%, 67.12%, 57.97%, 33.26%, 44.08%, respectivamente. La variable proteínas fue afectada en mayor grado por el genotipo (45.30%),

seguido de la interacción genotipo por CAC, indicando que los genotipos se comportan diferente entre CAC resultado similar a lo reportado en la literatura (26).

Luego, las condiciones agroclimáticas (CAC) y su interacción afectan las características fisicoquímicas, como se observó en esta investigación y en el anexo A.

4.2.2 Efecto de las condiciones agroclimáticas (localidad o ambiente) sobre las características funcionales

La tabla 5 muestra los resultados del análisis de varianza combinado para cuatro condiciones agroclimáticas (CAC), en las que se sembraron 6 genotipos de papa criolla para las variables ácido clorogénico (mg/100 g), ácido cafeico (mg/100 g), ORAC (mg ETrolox/100 g), hierro (mg/100 g), zinc (mg/100 g) y carotenoides totales ($\mu\text{g/g}$). La calidad de la utilización del diseño para el modelo estadístico tanto en campo como en el laboratorio fue alta, como lo corrobora el coeficiente de determinación (R^2) que osciló entre 0.9558 (catequina) y 0.9992 (carotenoides totales) y el coeficiente de variación (CV), el cual fue bajo para todas las variables oscilando entre 2.0618% (Vitamina C) y 9.1153% (ORAC).

El análisis de varianza combinado arrojó diferencias altamente significativas ($\alpha=0.01$) entre las condiciones agroclimáticas (CAC), genotipos y en la interacción genotipo x CAC para estas variables. Los resultados demuestran que los genotipos tienen un comportamiento desigual en los diferentes ambientes probados, esto es debido a la gran influencia que ejerce el ambiente sobre las variables estudiadas.

Tabla 5

Análisis de varianza combinado para las variables ácido clorogénico, ácido cafeico, actividad antioxidante, carotenoides totales, hierro, zinc, de los seis clones de papa criolla evaluados

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados					
		Ácido Clorogénico	Ácido Cafeico	ORAC	Hierro	Zinc	Carotenoides Totales
Condiciones Agroclimáticas (CAC)	3	407189.904***	684.3440***	3013.8432***	4.6152***	1.4260***	5088.24397***
Bloque (CAC)	8	333.368 ^{ns}	4.7343 ^{ns}	444.6838 ^{ns}	0.0975 ^{ns}	0.0026 ^{ns}	26.36065 ^{ns}
Genotipo	5	229112.579***	735.5183***	7273.4803***	3.5234***	0.5635***	10612.12259***
Genotipo x CAC	10	1037405.791***	1033.8543***	11618.2548***	1.2101***	0.3919***	49129.15292***
Error	30	57257.231	46.3333	846.6464	0.4896	0.0030	1390.01
Corregido	56	1621587.768	2568.1638	23696.6496	11.1356	2.7175	63540.70455
Total							
R ²		0.9974	0.9819	0.9643	0.9560	0.9989	0.9992
CV		5.6571	7.6924	9.1153	6.4537	0.8643	2.2503
Promedio		210.5745	16.1557	58.2802	1.9795	1.1547	57.8706

Nota. ns, *, **, ***: no significativo, diferencias significativas al 5%, 1% y 0.01% de probabilidad, respectivamente.

En la mayoría de los casos, la interacción genotipo x condiciones agroclimáticas (CAC) fue la que contribuyó en mayor grado a la variabilidad total (ácido clorogénico en un 63.97%, ácido cafeico en un 40.26%, capacidad antioxidante en un 49.03% y carotenoides totales en un 77.32%). En cuanto a cada factor de variación, como se presenta en la Tabla 5, las CAC afectaron significativamente los valores de contenido de ácido cafeico, capacidad antioxidante y carotenoides totales, cuyos porcentajes de variación fueron de 26.65%, 12.72% y 8.01%, respectivamente. Donde se observa que el efecto del genotipo (28.64%, 30.69% y 16.70% consecuentemente) fue mayor al efecto de la CAC; caso contrario ocurrió para las variables ácido clorogénico, hierro y zinc, donde el efecto del genotipo (14.13%, 31.64% y 20.74%, respectivamente), fue menor a la variación de las CAC (25.11%, 41.45% y 52.47% consecuentemente). Esto indica una respuesta diferencial debido al estrés ambiental y genotipo.

Es importante señalar que, aunque los carotenoides como los compuestos polifenólicos son metabolitos secundarios sintetizados durante el desarrollo normal de la planta y como respuesta al estrés causado por ejemplo por patógenos, radiación UV, estrés hídrico, temperatura y tipo de suelo (44); su contenido y estabilidad en la planta también puede ser alterado por el genotipo, puesto que “no solo las condiciones agroclimáticas, sino también el genotipo, inducen la expresión diferencial de genes para las vías de biosíntesis de carotenoides y compuestos polifenólicos como ácido clorogénico y ácido cafeico” (38). Como lo señalan Burgos y colaboradores (2009) quienes reportaron en 23 accesiones de *Solanum tuberosum* grupo Phureja efecto del genotipo sobre el contenido de carotenoides (45). Al igual que André y compañía, los cuales también reportaron que el contenido de compuestos polifenólicos no solo fue afectado por rasgos agronómicos, sino que también el genotipo ejerció un efecto importante sobre el contenido de estos compuestos en tubérculos de papa (34).

La tabla 6 muestra los resultados del análisis de varianza para la variable vitamina C (mg/100 g) y catequina (mg/100 g) estudiados en 6 genotipos de papa diploide. Se destaca que los factores genotipo, condiciones agroclimáticas (CAC) e interacción genotipo x CAC contribuyeron significativamente a la variabilidad de los contenidos de dichos compuestos ($\alpha=0.01$).

El factor genotipo contribuyó en un 52.96% a la variabilidad de los contenidos de vitamina C, seguido del factor CAC con una contribución a la variabilidad total de 42.83%, y de la interacción genotipo por CAC que afectó la variabilidad total en un 17.76%. En la cuantificación de vitamina C fue el efecto genotípico el que mayor aportó a la variación acumulada. Este efecto fue similar a lo encontrado por Thomas et al. (2021) (9) quienes reportan que el factor método de cocción contribuyó en un 92.8% a la variabilidad total, seguido del genotipo (2.5%), la interacción genotipo x método de cocción (1.5%) y por las condiciones agroclimáticas (1.0%). Estos

resultados también indican que debido a la variación genotípica se pueden seleccionar genotipos y desarrollar variedades con altas concentraciones de vitamina C (46). Estos genotipos son de gran interés porque demuestra que la respuesta a la variable es por ellos en gran medida y no es debida a la interacción genotipo por condiciones agroclimáticas.

Tabla 6

Análisis de varianza combinado para la variable Vitamina C, de los seis clones de papa criolla evaluados en los ambientes de Chitagá, Mutiscua, concepción, de los departamentos de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	GL	Suma de cuadrados
		Vitamina C		Catequina
Condiciones Agroclimáticas (CAC)	3	44371.9264***	3	2054.81281***
Bloque (CAC)	8	16.9955 ^{ns}	8	3.2099 ^{ns}
Genotipo	5	54861.0717***	5	2934.0647***
Genotipo x CAC	9	18400.8656***	8	4421.7829***
Error	28	14222.3313	26	537.4718
Corregido Total	53	103593.7380	50	8917.9940
R ²		0.9988		0.9958
CV		2.0618		5.9170
Promedio		101.3755		20.2892

Nota. ns, *, **, ***: no significativo, diferencias significativas al 5%, 1% y 0.01% de probabilidad, respectivamente.

En cuanto a la variable catequina, esta fue afectada principalmente por la interacción genotipo x CAC con una contribución de 49.58% a la variabilidad total, en comparación con el factor genotipo que contribuyó en un 32.90 % a la variabilidad y el factor CAC con un 23.04 % de afectación. Esto indica que los genotipos son muy diferentes y junto con la interacción genotipo por CAC, los principales causantes de la variación en el contenido de catequina (47). Para esta

variable se observó que el efecto interacción jugó un rol importante para la respuesta a esta variable, seguido del efecto genotípico.

En general, la variable más afectada por los factores evaluados (genotipo, Condiciones Agroclimáticas [CAC], e interacción genotipo x CAC) fue la vitamina C (cambio de 10.28 veces), seguida de glucosa (cambio de 6.97 veces), carotenoides totales (cambio de 6.45 veces) y sacarosa (5.54 veces).

Debido a que se presentaron diferencias altamente significativas en la Interacción Genotipo x CAC para todas las variables de estudio es indispensable realizar el análisis de estabilidad para determinar el efecto de la interacción en la respuesta de las variables en estudio y así obtener información importante a la hora de seleccionar y recomendar genotipos (48) que satisfagan las necesidades de la industria, de productores y de consumidores.

4.2.4 Análisis de estabilidad, método AMMI

En el presente estudio, los resultados del análisis de varianza combinado permitieron detectar diferencias altamente significativas para la Interacción Genotipo por Condiciones Agroclimáticas (CAC) en el grupo de 5 genotipos de papa criolla más el testigo Criolla Colombia evaluados en las cuatro condiciones agroclimáticas en los departamentos de Santander y Norte de Santander; por ello se procedió a estudiar la naturaleza de dicha interacción a través del modelo de Efectos Principales Aditivos y Multiplicativos de la Interacción (AMMI, por sus siglas en inglés).

El modelo AMMI es un modelo bilineal que combina el análisis de varianza y análisis de componentes principales en un solo modelo, aditivo para el genotipo y ambientes y multiplicativo para los efectos de interacción y permite analizar que factor [genotipo, ambiente, interacción genotipo por ambiente (IGA)] influyó en mayor medida la variabilidad de la suma de cuadrados

de las variables analizadas y seleccionar genotipos que cuenten con mejores rendimientos y que sean estables bajo condiciones ambientales específicas. En el modelo AMMI, para seleccionar genotipos superiores, la IGA debe ser baja o mínima; esto en el biplot se evidencia en los genotipos que se encuentran cerca al origen del primer componente principal [CP1] (12).

Los análisis de estabilidad por el método AMMI se aplicaron a los clones 2 y 9 y al testigo Criolla Colombia debido a que los demás genotipos (Clon 8, Agrosavia Estrella y Sol Andina) se cultivaron solo en una o dos localidades, presentándose datos no consistentes para el análisis. Además, las variables analizadas bajo este método fueron aquellas que mostraron valores superiores a los del testigo Criolla Colombia (almidón, ácido clorogénico, vitamina C, hierro y carotenoides totales) o que se consideraron importantes a nivel nutricional y funcional como el caso de la proteína.

Los resultados del análisis de varianza obtenidos según el modelo AMMI se muestran en la tabla 7 y 8 e indican que la interacción genotipo por Condiciones Agroclimáticas (CAC) afectó en mayor grado la variabilidad de los contenidos de proteínas (48.88%), ácido clorogénico (68.83%) y carotenoides totales (87.73%); mientras que para las variables almidón, hierro y vitamina C, las CAC fueron el factor que afectó principalmente la variabilidad de sus contenidos en los genotipos estudiados (58.22%, 79.60%, 59.09%, respectivamente). Lo anterior demuestra que el contenido de las variables mencionadas está influenciado por factores genéticos, ambientales y por su interacción. Primando el efecto Interacción genotipo x CAC para proteínas, ácido clorogénico y carotenoides totales y el efecto CAC para hierro, vitamina C y almidón.

Teniendo en cuenta que los metabolitos secundarios como polifenoles y carotenoides totales son resultado del estrés ambiental, se podría esperar que la variabilidad de sus contenidos fuera afectada en mayor parte por el factor ambiental CAC, no obstante, los mecanismos de síntesis

y acumulación de estos metabolitos en las plantas son bastante complejos y por ello la respuesta de las plantas se ve influenciada fuertemente por la genética del genotipo específico y las condiciones ambientales en las que se cultivan, como lo señalan otros autores (49).

Tabla 7

Análisis AMMI de 3 genotipos de papa criolla según contenido de proteína y almidón, evaluados en 4 localidades de Santander y Norte de Santander, Colombia

Fuente de variación	GL	Proteínas		Almidón	
		SSAMMI	SS%	SSAMMI	SS%
Condiciones Agroclimáticas (CAC)	3	0.27***	5.53	537.61***	61.41
Genotipos (G)	2	0.01***	25.25	57.27***	6.54
Interacción GxCAC	6	0.29***	69.22	280.60***	32.05
PC1	4	0.29***	98.99	0.56***	96.38
PC2	2	0.00***	1.01	0.26***	3.62

Nota. ns, *, **, ***: no significativo, diferencias significativas al 5%, 1% y 0.01% de probabilidad, respectivamente.

Tabla 8

Análisis AMMI de 3 genotipos de papa criolla según contenido de ácido clorogénico, hierro, vitamina C y carotenoides totales, evaluados en 4 localidades de Santander y Norte de Santander

Fuente de variación	GL	Ácido clorogénico		Hierro		Vitamina C		Carotenoides totales	
		SSAMMI	SS%	SSAMMI	SS%	SSAMMI	SS%	SSAMMI	SS%
Condiciones Agroclimáticas (CAC)	3	20767.83***	5.53	3.40***	79.8 4	38075.43* **	57.2 0	2991.78** *	5.63
Genotipos (G)	2	94789.82***	25.25	0.03***	0.82	14430.64* **	21.6 8	3462.23** *	6.52
Interacción GxCAC	6	259857.09* **	69.22	0.82***	19.3 4	14054.61* **	21.1 2	46680.79* **	87.8 5

Fuente de variación	GL	Ácido clorogénico		Hierro		Vitamina C		Carotenoides totales	
		<i>SSAMMI</i>	<i>SS%</i>	<i>SSAMMI</i>	<i>SS%</i>	<i>SSAMMI</i>	<i>SS%</i>	<i>SSAMMI</i>	<i>SS%</i>
PC1	4	255135.39*	98.18	0.56***	68.2	9598.01**	68.2	37156.74*	79.5
		**			3	*	9	**	9
PC2	2	4721.71***	1.82	0.26***	31.7	4456.60**	31.7	9524.05**	20.4
					7	*	1	*	0

Nota. ns, *, **, ***: no significativo, diferencias significativas al 5%, 1% y 0.01% de probabilidad, respectivamente.

El modelo AMMI, a partir de los resultados de la interacción genotipo por Condiciones Agroclimáticas (ambientes o localidades), estima los componentes principales (CPs) de dicha interacción para establecer el número de CPs que explican más del 75% de la variabilidad de la interacción y ofrecen una explicación confiable del comportamiento de esta (11). De acuerdo con este modelo, en el presente estudio se encontró que los dos (2) primeros CPs fueron altamente significativos ($\alpha < 0.001$) y explican una proporción sustancial de la varianza de la interacción (> 90%) para las variables bajo estudio (tablas 7 y 8); luego son válidos para el análisis de estabilidad y fueron utilizados para elaborar el gráfico biplot.

En el gráfico biplot, los genotipos que se encuentren cerca al origen tendrían la característica de presentar una baja interacción con los ambientes de evaluación (baja interacción genotipo por Condiciones Agroclimáticas [CAC]) y serían los más estables fenotípicamente, esto sumado al hecho de que presenten valores altos de contenido de compuestos fisicoquímicos y funcionales los convertiría en genotipos prometedores tanto para los fitomejoradores como para la industria de procesamiento de la papa y agricultores.

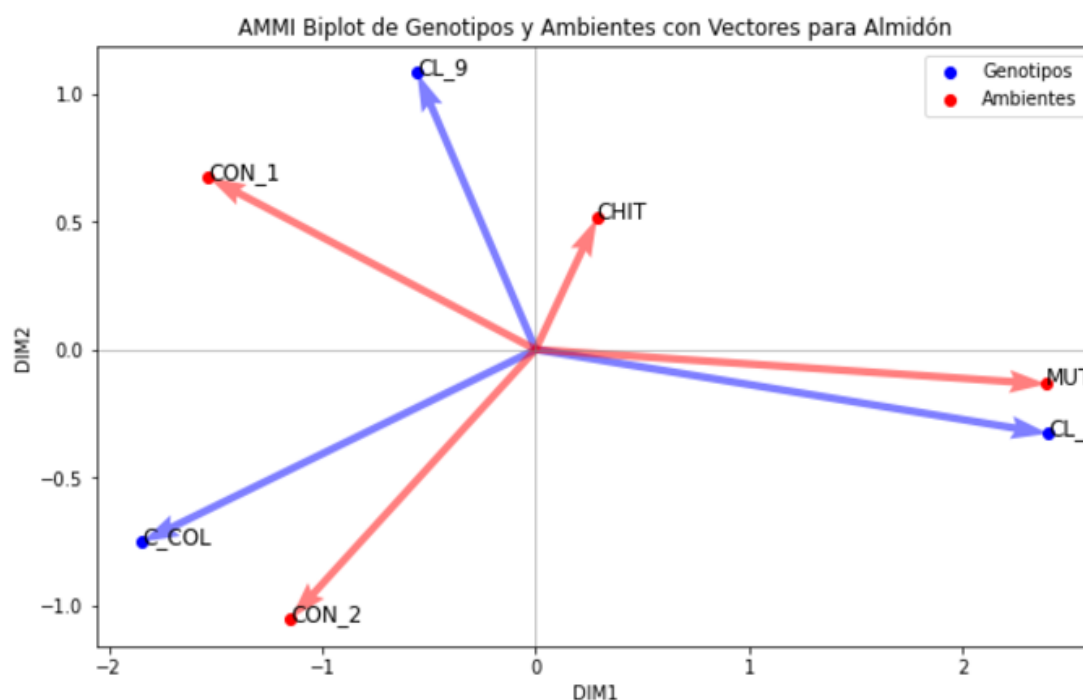
En el Apéndice B se muestra la información acerca de los scores para los componentes principales para los genotipos y los ambientes, de los dos primeros términos AMMI para generar

el gráfico biplot, con la información del tipo, nombre y contenidos promedio de las variables en estudio.

En la figura 7 se muestra el biplot para la variable almidón y en ella se aprecia como el Clon 9 sobresalió en su respuesta con promedios mayores (87.10 g/100 g) a la media general (85.57 g/100 g), además obtuvo adaptación específica para la CAC a Concepción 1 y una adaptación específica favorable en Chitagá con un promedio igual a 93.75 g/100 g. Lo contrario sucedió para el testigo Criolla Colombia cuya cuantificación en esta variable fue menor al promedio general (85.56 g/100 g) y mostró adaptación desfavorable con la CAC Concepción 2. El Clon 2 tienen adaptación a la CAC Mutiscua.

Figura 7

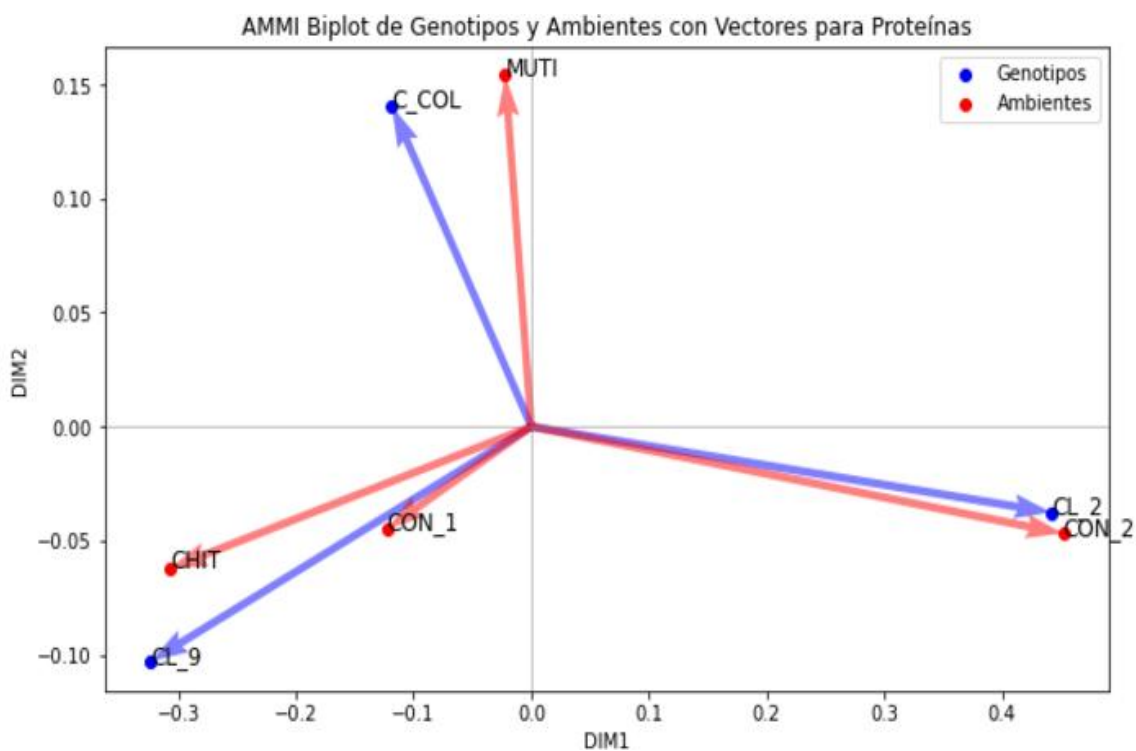
Gráfico del contenido de almidón (g/100 g , BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el testigo Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.



La figura 8 muestra para la variable proteína, la posición de los genotipos y ambientes en términos de los dos primeros componentes principales. Se aprecia que el testigo Criolla Colombia presentó contenido promedio (1.13 g/100 g; BS) superior a la media general (1.10 g/ 100 g; BS). El ambiente Mutiscua ejerció mayor influencia sobre la interacción genotipo por condiciones agroclimáticas. El clon 9 presentó valores promedio de proteínas (1.08 g/100 g; BS) inferiores a la media general y adaptación específica a Chitagá y Concepción 2. El Clon 2 tiene alto efecto de interacción con la CAC Concepción 2.

Figura 8

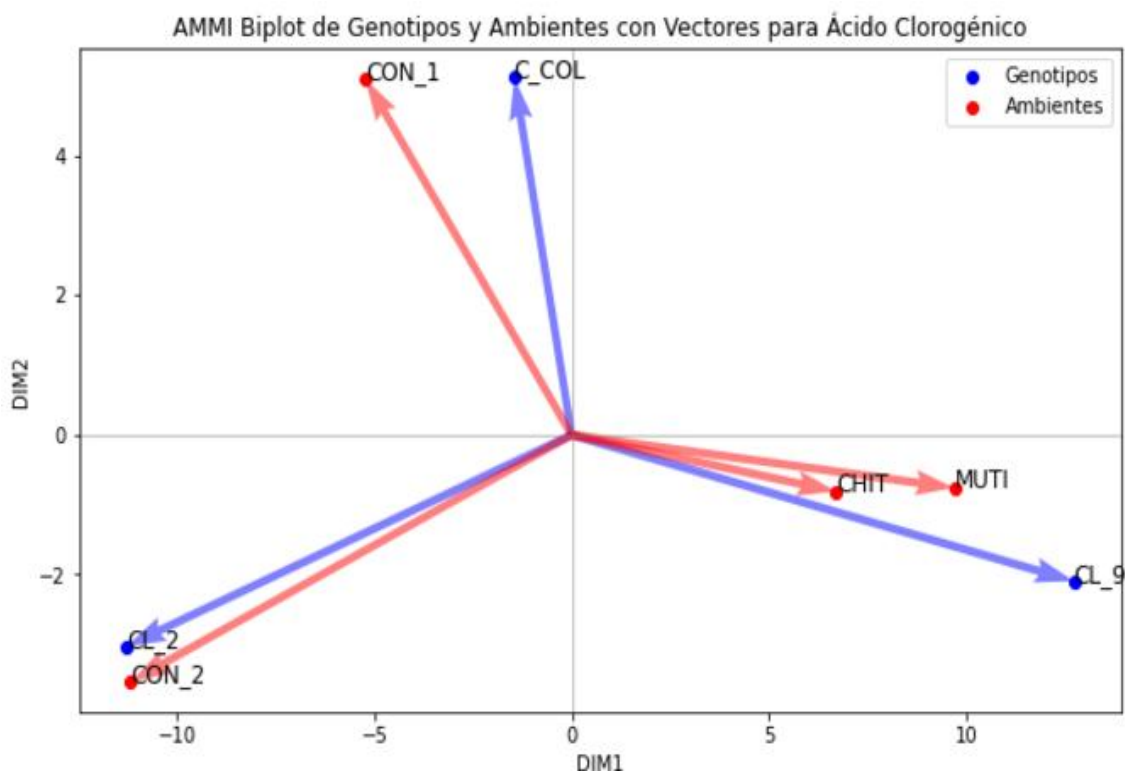
Gráfico del contenido de proteínas (g/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el testigo Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.



En la figura 9 se muestra el *biplot* para la variable ácido clorogénico y se aprecia que el Clon 9 tuvo adaptación específica a Mutiscua y Chitagá y presentó el mayor valor promedio de contenido de ácido Clorogénico (235.25 mg/100 g) y también fue superior a la media general (175 mg/100 g). El contenido promedio de ácido clorogénico (109.84 mg/100 g) para Criolla Colombia fue inferior a la media general (175.00 mg/100 g); mientras que el Clon 2 presentó valores superiores (179.92 mg/100 g) a la media general y adaptación a Concepción 2. Luego se podría considerar el clon 9 como el más prometedor para esta variable, pues su promedio fue superior al promedio general y a Clon 2 y al testigo.

Figura 9

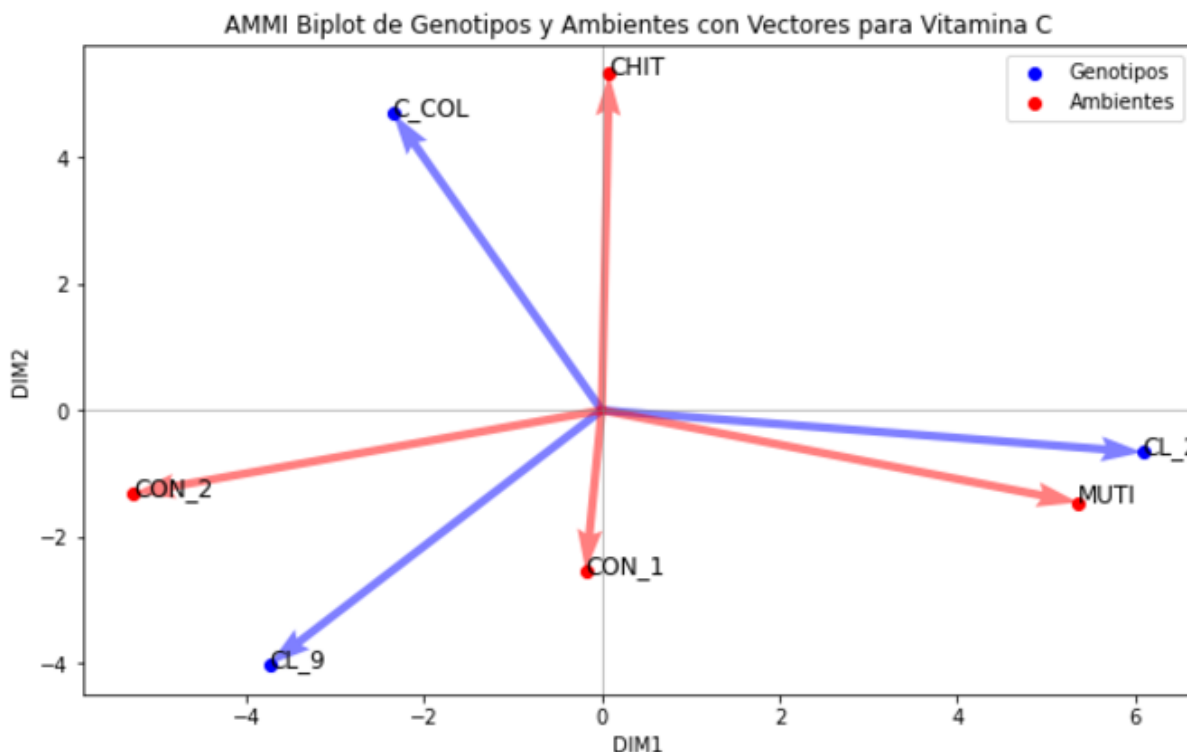
Gráfico del contenido de ácido clorogénico (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.



En la figura 10 se muestra el *biplot* para la variable vitamina C y se aprecia que el Clon 9 muestra un valor promedio de Vitamina C (140.69 mg AA/100 g, BS), superior a la media general (112.44 mg AA/100 g) y adaptación específica favorable a Concepción 1 y 2. Mientras que Clon 2 tienen adaptación específica a Mutiscua y Criolla Colombia a Chitagá.

Figura 10

Gráfico del contenido de vitamina C (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.

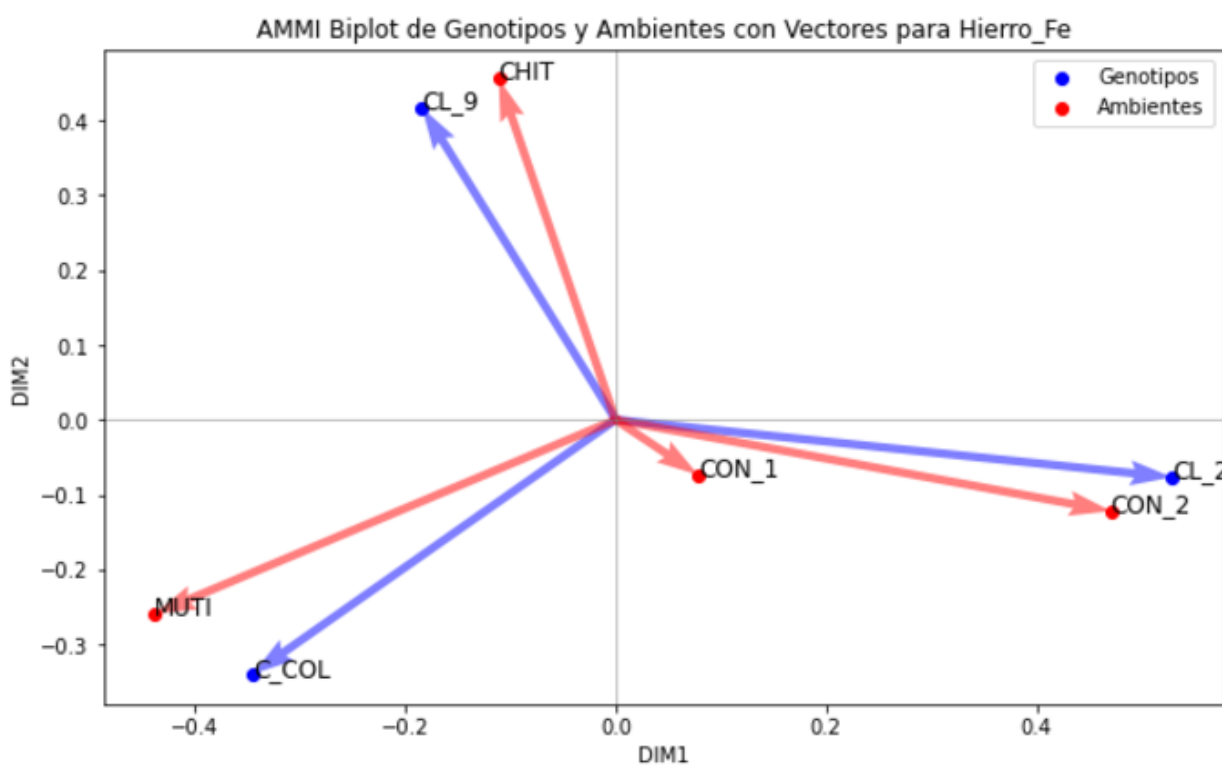


En la figura 11 se muestra el biplot para la variable hierro y se aprecia que el Clon 9 muestra adaptación específica favorable a Chitagá y tiene un valor promedio de contenido de hierro (1.92 mg/100 g, BS) superior a la media general (1.89 mg/100 g, BS). Luego sería un genotipo

prometedor teniendo en cuenta la respuesta a esta variable. Concepción 1 es un ambiente favorable para esta variable, especialmente para el Clon 2.

Figura 11

Gráfico del contenido de hierro (mg/100 g, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.

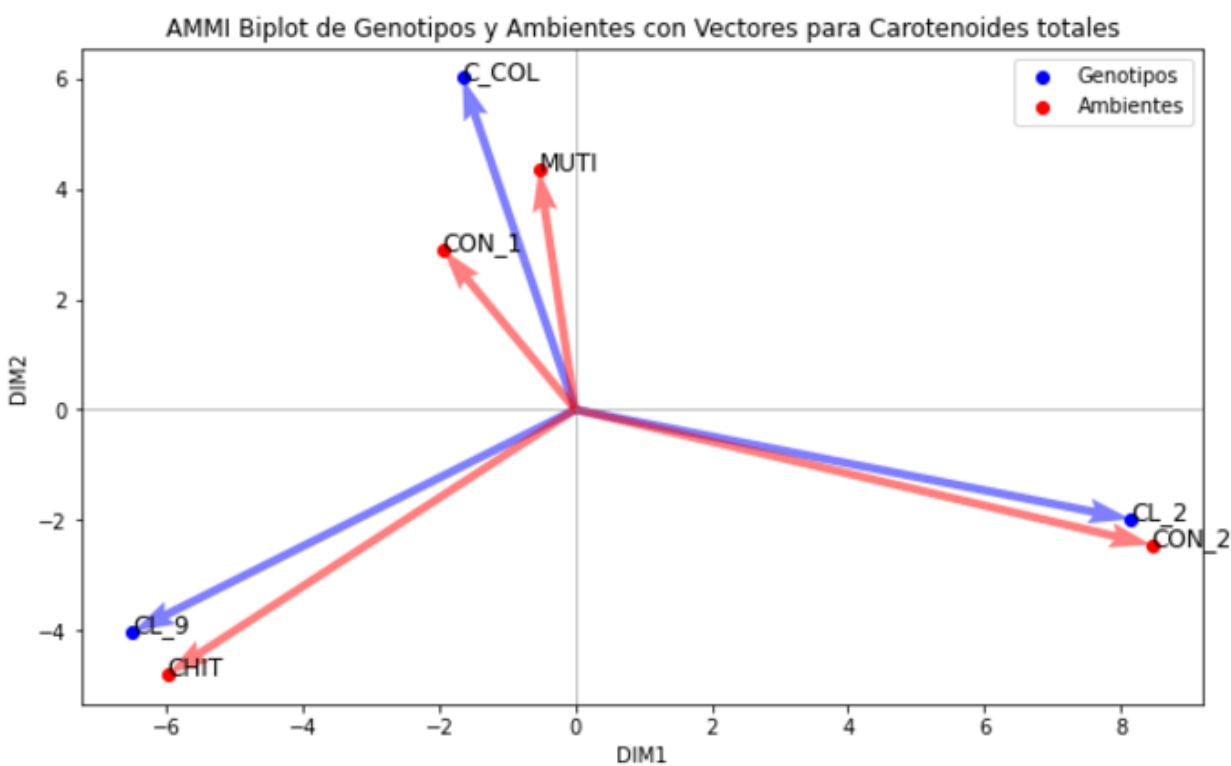


En la figura 12 se muestra el *biplot* para la variable carotenoides totales y se aprecia que el testigo Criolla Colombia posee adaptación específica a Mutiscua y Concepción 1 y un contenido promedio de carotenoides totales (46.00 $\mu\text{g/g}$, BS) inferior a la media general (59.77 $\mu\text{g/g}$, BS), caso contrario del genotipo Clon 9 que tienen adaptación específica a Chitagá y promedio de carotenoides totales (68.09 $\mu\text{g/g}$, BS) superior a la media general, luego, sería un genotipo a tener

en cuenta para fitomejoramiento. El Clon 2 cuenta con adaptación específica a Concepción 2 y promedio superior ($65.21 \mu\text{g/g}$, BS) a la media general pero menor que Clon 9.

Figura 12

Gráfico del contenido de carotenoides totales ($\text{mg}/100 \text{g}$, BS) para la interacción de 2 genotipos de papa más el control Criolla Colombia, evaluados en cuatro localidades (ambientes) de Santander y Norte de Santander.



En resumen, el Clon 9 mostró valores superiores a la media general en contenido de almidón, ácido clorogénico, vitamina C, hierro y carotenoides totales y mostró adaptación específica a Chitagá para la mayoría de las variables; luego se podría proponer como genotipo priorizado ya que destaca por su balance entre adaptación específica y contenido promedio de las variables analizadas superior a la media general, lo que lo hace un genotipo promisorio para programas de mejoramiento o para introducirlo al sistema productivo en el departamento objeto del estudio.

4.3 Resultados y discusión objetivo 3

Identificar la mejor alternativa de uso para el genotipo priorizado en esta investigación a partir de los resultados obtenidos sobre las ventajas fisicoquímicas y funcionales.

Para escoger la mejor alternativa de productos derivados de los genotipos evaluados en las diferentes condiciones agroclimáticas (ambientes o localidades), en el presente estudio se tuvieron en cuenta:

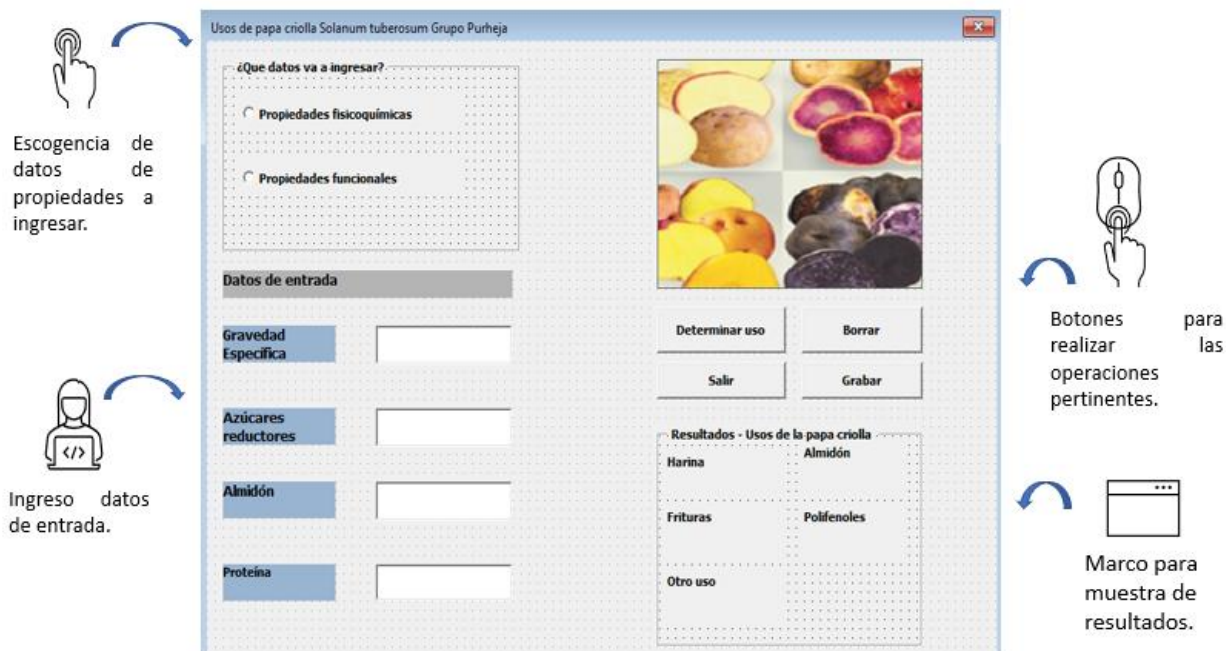
i) los resultados producto de la ejecución del primer objetivo donde se consideraron a las variedades Agrosavia estrella y a los clones 2 y 9 con las mayores ventajas fisicoquímicas y funcionales sobre el testigo Criolla Colombia en cuanto a las variables gravedad específica, almidón, azúcares reductores (glucosa), proteínas, grasas, ácido clorogénico, hierro, zinc, vitamina C y carotenoides totales;

ii) el análisis de estabilidad AMMI y sus gráficos biplot que indicó al Clon 9 como el genotipo con valores más altos de características fisicoquímicas y contenidos funcionales y de adaptación a diferentes ambientes sobre el Clon 2 y Criolla Colombia; y

iii) la evaluación realizada por la interfase en Visual Basic (de creación propia) que determinó que los usos potenciales del Clon 9 podrían ser extracción de almidón, obtención de harina, extracción de ácido clorogénico, extracción de carotenoides, extracción de proteína o consumo en fresco; a partir de la relación de las características fisicoquímicas y funcionales del clon 9 con los parámetros de calidad de la papa criolla. En la figura 13, se presentan el esquema de la interfaz gráfica tipo formulario para determinar usos de la papa criolla *Solanum tuberosum* Grupo Phureja.

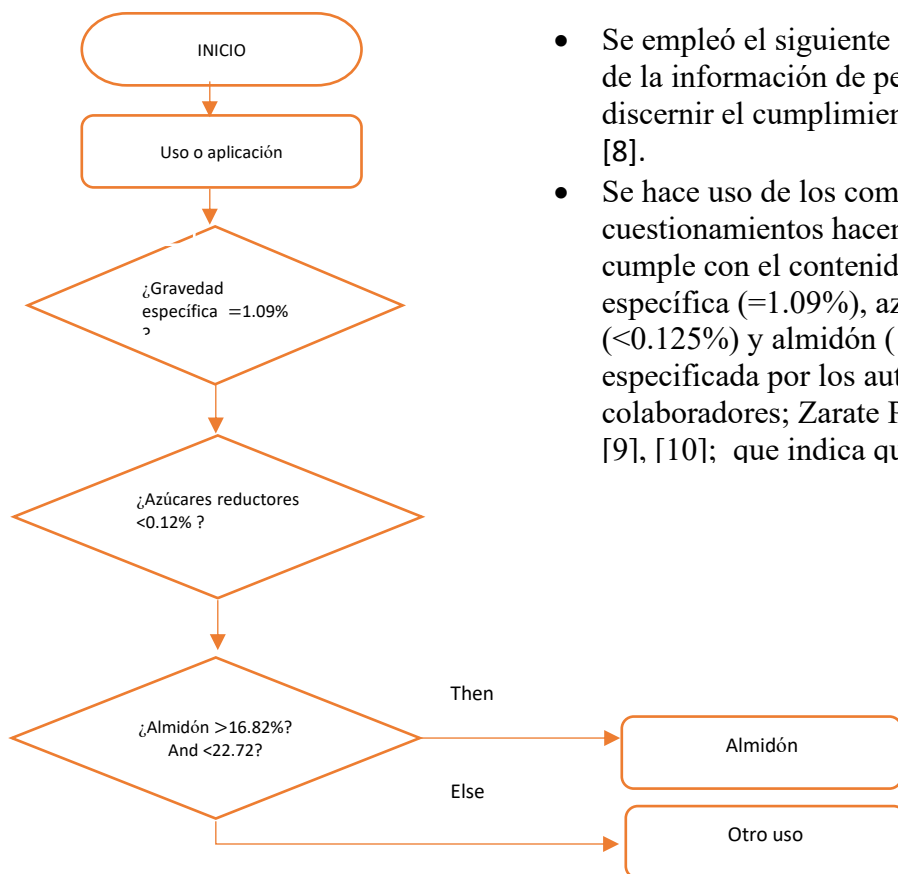
Figura 13

Interfaz gráfica para determinar usos de la papa criolla Solanum tuberosum grupo Phureja



Nota. La imagen de las papas de colores fue tomada de *The Potato and Its Contribution to the Human Diet and Health* (50).

Y en la figura 14 el marco lógico empleado para la programación de la interfaz de visual basic. La interfaz permite, que el usuario ingrese los datos en los botones de captura o ingreso de datos según las propiedades respectivas, y se muestre en el marco de resultados, el uso potencial de la papa, con el botón determinar uso. Adicionalmente cuenta con el botón borrar que permite eliminar los datos ingresados en los botones de ingreso de datos y el botón salir que activa la salida de la interfaz.

Figura 14*Marco lógico*

- Se empleó el siguiente Marco lógico del flujo de la información de permite que me permite discernir el cumplimiento de una condición [8].
- Se hace uso de los comandos if, then, else. Los cuestionamientos hacen referencia a si se cumple con el contenido de gravedad específica (=1.09%), azúcares reductores (<0.125%) y almidón (16.82-22.72 %) especificada por los autores Garnica y colaboradores; Zarate Polanco y colaboradores [9], [10]; que indica que la papa se puede

iv) Seguidamente se realizó el análisis de las opciones de usos potenciales generadas por la herramienta en visual basic por medio de la matriz de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas (FODA) cuyas opciones de preferencia fueron extracción de ácido clorogénico y carotenoides (el análisis de estas dos opciones se presenta en las tablas 9 y 10 y en el complemento C el análisis de las otras opciones), debido a su alto potencial de mercado, beneficios para la salud, y oportunidades de diversificación en productos alimenticios y nutracéuticos.

Tabla 9*Matriz FODA extracción de Ácido Clorogénico*

Idea de Aprovechamiento 1: Extracción de ácido clorogénico	
Fortalezas	Oportunidades
El ácido clorogénico pertenece al grupo de los ácidos hidroxicinámicos que son los compuestos polifenólicos más ampliamente distribuido en el tejido vegetal. Es considerado un antioxidante y ha sido correlacionado positivamente con la prevención de enfermedades crónicas. Es absorbido rápidamente por el intestino delgado y ayuda a la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL, por sus siglas en inglés). Evitan el enranciamiento natural de alimentos. En el genotipo priorizado, clon 9 de papa criolla se encontró valor máximo de contenido de ácido clorogénico de 49.1891 mg/100 g en Base Seca.	Puede ofrecerse a diferentes empresas de alimentos y de fabricación de nutracéuticos, tanto para la conservación de productos como para mejorar el contenido de antioxidantes. Creciente demanda de productos naturales y saludables donde la papa criolla podría ser aprovechada por su contenido de este y otros ácidos hidroxicinámicos. Investigar nuevas aplicaciones para la papa criolla, como la extracción de ácido clorogénico, podría abrir oportunidades en el mercado de alimentos funcionales.
Debilidades	Amenazas
El uso de solventes para la extracción genera aguas que requieren tratamiento. Las regulaciones y normativas pueden afectar la producción y comercialización de la papa criolla. En los próximos años la reglamentación puede ser más estricta para el consumo de alimentos con antioxidantes. La papa criolla puede ser más costosa de producir debido a su cultivo específico y características.	En el mercado la competencia con otras variedades de papa y alimentos similares puede ser una amenaza. Recursos e insumos: Escasez de recursos o insumos necesarios para el cultivo y procesamiento de la papa criolla. Madurez tecnológica: Si no se adoptan tecnologías modernas, podría afectar la eficiencia y calidad del proceso de producción.

Tabla 10*Matriz FODA extracción de carotenoides*

Idea de Aprovechamiento 7: Carotenoides	
Fortalezas	Oportunidades
Son considerados como antioxidantes que contribuyen a prevenir el riesgo de enfermedades crónicas. Contenido de carotenoides totales mayor a 1.35 µg/100 g en Base Seca (Forero et al., 2013), se puede obtener a partir de un residuo (cáscara).	Demanda en la industria alimenticia por colorantes naturales. Puede ser usada en la fabricación de productos de panadería y repostería, en pastas, coladas y como aditivo en alimentos y bebidas, luego las empresas que producen este tipo de alimentos son potenciales consumidores. Hay tecnología existente para la extracción de colorantes de tubérculos similares (batata)
Debilidades	Amenazas
Muestran estabilidad por 15 min a temperaturas entre 50-70°C, pero se degradan en presencia de luz, causando pérdida de color y su función biológica como provitamina A. Forero et al., 2013).	Que existan otros colorantes naturales con procesos de obtención establecidos y con menor costo de extracción (tecnología simple y de fácil instalación). Cambios climáticos, enfermedades o plagas que afecten el cultivo de papa criolla. Que existan políticas comerciales o restricciones de exportación en los próximos años.

Y finalmente, iv) la evaluación por medio de panel de expertos de las dos alternativas de productos para la identificación del uso priorizado se realizó según la metodología propuesta por Godoy (51). Para ello se realizó una encuesta a 10 expertos (las preguntas se muestran en el Apéndice D), donde se tuvo como criterios de inclusión los siguientes: profesionales, empresarios o investigadores categorizados en el sistema de clasificación de investigadores propios de cada país en el área de química e ingeniería química, química de alimentos, ciencia y tecnología de alimentos, biotecnología, ciencias agrarias, ingeniería química, nutrición, industria con experiencia académica, en investigación o en la industria alimentaria. Se incluyó como criterio de exclusión a expertos que no contestaran el 95% de las preguntas. Los criterios de evaluación empleados y la ponderación de dichos criterios se muestran en la tabla 11.

Tabla 11

Criterios de evaluación

# Criterio	Ponderación (P)	Criterios de evaluación	Enunciado
1	8	Procesos de Transformación	Las procesos de transformación ya existen y no requieren mejoras
2	6	Madurez tecnológica	Tecnología de uso simple y fácil instalación
3	10	Mercado actual	Existencia de nichos de mercado para este tipo de producto
4	8	Mercado a 10 años	Existencia de nichos de mercado para este tipo de producto a 10 años
5	7	Recursos económicos	Los recursos económicos para el procesamiento son asequibles
6	8	Sector productivo	Existencia de sectores de la industria con alta demanda para el tipo de producto
7	5	Legislación	Restricciones legales o normas para ofertar el producto (por ej.: normativa de OMS o CODEX, impuestos, requerimientos en rotulados frontales, entre otros)
8	9	Aporte de valor	Transformación de papa criolla para este producto aporta valor agregado a la materia prima

# Criterio	Ponderación (P)	Criterios de evaluación	Enunciado
9	8	Innovación según valor nutricional	Idea innovadora que podría potenciar el valor nutricional
10	8	Innovación según valor funcional	Idea innovadora que podría potenciar sus características funcionales
11	9	Relevancia en el mercado	La idea integrada a procesos de innovación podría potenciar su valor nutricional

El grupo de expertos asignó una valoración para cada criterio como se muestra en la tabla 12 al responder las preguntas de la encuesta que guardan correspondencia con los criterios.

Tabla 12

Puntajes de valoración para cálculo de uso preferente del Clon 9

Puntaje de valoración (V)	
De acuerdo	5
Algo de acuerdo	4
Ni de acuerdo ni en desacuerdo	3
Algo en desacuerdo	2
En desacuerdo	1

Luego se obtuvo el puntaje total (P_t) de cada criterio por la fórmula $P_t = P \times V$. El total obtenido para cada opción de uso se calculó mediante la fórmula:

$$T = \sum P_{ti}$$

Donde:

P_{ti} = puntaje del criterio i

T = puntaje total

El puntaje total de cada opción de uso se muestra en la tabla 13; según estos resultados se observó que la opción de uso extracción de ácido clorogénico obtuvo un puntaje total (353.6) superior al de la extracción de carotenoides (344.7) con una diferencia de 8.9. Sin embargo, al

analizar las medias de los puntajes mediante la prueba T de Student, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.48$, con un intervalo de confianza del 95%). Esto indica que, desde el punto de vista estadístico, ambas opciones de uso son viables.

Tabla 13

Resultados de Evaluación del Puntaje Total por Opción de Uso

Criterio	Ponderación	Extracción ácido clorogénico		Extracción carotenoides	
		Valoración	Pt	Valoración	Pt
1	8	5.0	40.0	3.8	30.4
2	6	3.2	19.2	2.9	17.4
3	10	4.0	40.0	4.3	43.0
4	8	4.3	34.4	4.5	36.0
5	7	2.4	16.8	2.4	16.8
6	8	4.1	32.8	4.3	34.4
7	5	3.8	19.0	4	20.0
8	9	4.3	38.7	4.6	41.4
9	8	4.4	35.2	4.2	33.6
10	8	4.4	35.2	3.9	31.2
11	9	4.7	42.3	4.5	40.5
Puntaje total (T)			353.6		344.7

5. Conclusiones

El presente estudio provee información importante acerca del potencial de los cultivares de papa para su producción, utilización y consumo. Destacándose los clones 2 y 9 por sus ventajas competitivas frente al control Criolla Colombia que podrían considerarse una fuente significativa de antioxidantes y nutrientes en la dieta humana debido a su alto contenido de ácido clorogénico, vitamina C, zinc, carotenoides y almidón; esto representaría un valor agregado para la industria alimentaria y del procesamiento de la papa, abriendo nuevos nichos de mercado para estos cultivares de papa.

Adicionalmente, la presente investigación demostró la amplia variabilidad en las características fisicoquímicas y contenidos en compuestos funcionales que promueven la nutrición y salud dentro de los tubérculos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja bajo estudio.

Las características fisicoquímicas y funcionales de los genotipos estudiados fueron influenciadas por el genotipo, las condiciones agroclimáticas y su interacción; destacándose el Clon 9 por su adaptación a diferentes ambientes y contenido promedio de las variables analizadas superior al Clon 2 y al testigo. Este genotipo puede ser priorizado para su uso en cultivos según el presente estudio.

La evaluación del Clon 9 revela su viabilidad tanto para la extracción de ácido clorogénico como de carotenoides, con puntajes totales de valoración que indican un potencial similar en ambas opciones. A pesar de la ligera ventaja del ácido clorogénico, las diferencias no son estadísticamente significativas, lo que sugiere que ambos procesos son igualmente factibles, según los resultados obtenidos en la presente investigación.

Los resultados de la presente investigación respaldarían la inversión en los programas de mejoramiento para mejorar los nutrientes que promueven la salud en genotipos de papa modernos en contraste con especies nativas como papa Criolla Colombia.

Consecuentemente, el presente estudio provee información importante acerca del potencial de los genotipos estudiados para que científicos mejoren su composición fisicoquímica y funcional e incrementen el estatus de la industria de la papa.

6. Recomendaciones

Para estudios futuros se recomienda determinar el contenido de materia seca de los tubérculos bajo estudio, y el contenido de amilosa y amilopectina ya que, a mayor contenido de materia seca, mayor contenido de materia orgánica y almidón; y a mayor contenido de amilopectina, más digerible son los alimentos preparados con tubérculos de papa, luego estas variables también incidirían en la especificación del uso potencial de la papa hacia consumo en fresco o procesamiento industrial.

Se recomienda identificar y cuantificar los carotenoides individuales presentes en las muestras.

En futuras investigaciones con los clones de estudio se recomienda controlar la humedad en almacenamiento, debido a que una alta humedad promueve la formación de hongos y levaduras haciendo que el almidón de la papa se vuelva susceptible a reacciones de fermentación no deseables en el procesamiento hacia este uso (25).

Igualmente se recomienda ampliar la muestra de expertos para determinar la opción más viable para el genotipo priorizado.

Referencias Bibliográficas

1. M. Andre C, Oufir M, Guignard C, Hoffmann L, Hausman J-F, Evers D, et al. Antioxidant Profiling of Native Andean Potato Tubers (*Solanum tuberosum* L.) Reveals Cultivars with High Levels of β -Carotene, α -Tocopherol, Chlorogenic Acid, and Petanin. *J Agric Food Chem.* 2007 Nov 29;55(26):10839–49.
2. Sampaio SL, Barreira JCM, Fernandes Â, Petropoulos SA, Alexopoulos A, Santos-Buelga C, et al. Potato biodiversity: A linear discriminant analysis on the nutritional and physicochemical composition of fifty genotypes. Vol. 345, *Food Chemistry.* 2021.
3. Instituto Colombiano Agropecuario. Resolución No 3168 de 2015 [Internet]. 2015. p. 97. Available from: <http://www.ica.gov.co/getattachment/4e8c3698-8fcb-4e42-80e7-a6c7acde9bf8/2015R3168.aspx>
4. Zhao J, Zhang Y, Qian Y, Pan Z, Zhu Y, Zhang Y, et al. Coincidence of variation in potato yield and climate in northern China. Vol. 573, *Science of the Total Environment.* 2016. p. 965–73.
5. Núñez CE, Rodríguez LE. Papa criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja). Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de cundinamarca [Internet]. 2020. 137. Available from: http://investigacion.bogota.unal.edu.co/fileadmin/recursos/direcciones/investigacion_bogota/Manuales/09-manual-papa-criolla-2020-EBOOK.pdf
6. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional Cultivo de Papa Criolla [Internet]. 2022. Available from: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
7. Alzate Díaz LG, Cerón Lasso M del S, Espitia Malagón EM, Coronel Ortiz B. Papa criolla Corpoica Sol Andina: variedad de papa criolla para el altiplano cundiboyacense, con excelentes atributos para consumo en fresco y uso industrial [Internet]. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia); 2020. Available from: https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36513/Ver_documento_36513.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. Zapata J, Navas G, Tamayo A, Diaz C. Manejo Agronomico De La Papa Criolla Para El Procesamiento Industrial [Internet]. boletin tecnico CORPOICA. 2006. 43 p. Available from: http://books.google.com.co/books?id=XiqyCp3s5_EC&pg=PT44&dq=ciclo+de+cultivo+de+papa+criolla&hl=es&sa=X&ei=PcYfUoPxM_OssAT5y4DYCg&ved=0CDsQ6AEWAQ#v=onepage&q=ciclo+de+cultivo+de+papa+criolla&f=false
9. Thomas S, Vásquez-Benítez JD, Cuéllar-Cepeda FA, Mosquera-Vásquez T, Narváez-Cuenca CE. Vitamin C, protein, and dietary fibre contents as affected by genotype, agro-climatic conditions, and cooking method on tubers of *Solanum tuberosum* Group Phureja. *Food Chem.* 2021;349(September 2020).
10. Martínez, Nancy M, & Ligarreto GA. Evaluación de cinco genotipos promisorios de papa *Solanum tuberosum* sp. andígena según desempeño agronómico y calidad industrial. *Agron Colomb* [Internet]. 2005;23(1):17–27. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-

- 99652005000100003&lng=en&tlng=es.
11. Crossa J, Cornelius PL, Yan W. Biplots of linear-bilinear models for studying crossover genotype x environment interaction. *Crop Sci.* 2002;42(2):619–33.
 12. Tirado M. R, Tirado L. R, Mendoza C. J. INTERACCIÓN GENOTIPO x AMBIENTE EN RENDIMIENTO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) CON PULPA PIGMENTADA EN CUTERVO, PERÚ. *Chil J Agric Anim Sci* [Internet]. 2018;(ahead):0–0. Available from: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0719-38902018005000502&lng=en&nrm=iso&tlng=en
 13. Gómez R. Guía para las caracterizaciones morfológicas básicas en colecciones de papas nativas. *Cent Int la Papa* [Internet]. 2000; Available from: https://www.researchgate.net/profile/Rene-Gomez-6/publication/267991711_Guía_para_las_Caracterizaciones_Morfológicas_Básicas_en_Colecciones_de_Papas_Nativas/links/548ab5970cf214269f1ada82/Guia-para-las-Caracterizaciones-Morfológicas-Básicas-en-Colecciones
 14. Contreras Estrella MR. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE ALMIDÓN Y MATERIA SECA CON LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE CINCO VARIEDADES DE PAPA (*Solanum tuberosum*)”. 2017;80.
 15. Malaver, Jhon; Rodríguez S. OPTIMIZACION DE LAS CONDICIONES DE EXTRACCION DE POLIFENOLES A PARTIR DE LA BATATA (*IPOMOEA BATATAS LAM*) Y AJUSTE DE LOS PARAMETROS CINETICOS [Internet]. Universidad Industrial de Santander. 2017. Available from: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2017/166415.pdf>
 16. Valiñas MA, Lanteri ML, ten Have A, Andreu AB. Chlorogenic acid, anthocyanin and flavan-3-ol biosynthesis in flesh and skin of Andean potato tubers (*Solanum tuberosum* subsp. *andigena*). *Food Chem.* 2017;229:837–46.
 17. Risner CH. Simultaneous determination of theobromine, (+)-catechin, caffeine, and (-)-epicatechin in standard reference material baking chocolate 2384, cocoa, cocoa beans, and cocoa butter. *J Chromatogr Sci.* 2008;46(10):892–9.
 18. Andre CM, Ghislain M, Bertin P, Oufir M, Herrera MDR, Hoffmann L, et al. Andean potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) as a source of antioxidant and mineral micronutrients. *J Agric Food Chem.* 2007;55(2):366–78.
 19. Ibanez F. Protocolo para la determinación de carotenoides en frutos nativos. 2019;(September 2018):1–4.
 20. Hejtmánková K, Kotíková Z, Hamouz K, Pivec V, Vacek J, Lachman J. Influence of flesh colour, year and growing area on carotenoid and anthocyanin content in potato tubers. *J Food Compos Anal.* 2013;32(1):20–7.
 21. Andre CM, Oufir M, Guignard C, Hoffmann L, Hausman JF, Evers D, et al. Antioxidant profiling of native Andean potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) reveals cultivars with high levels of β -carotene, α -tocopherol, chlorogenic acid, and petanin. *J Agric Food Chem.* 2007;55(26):10839–49.
 22. Pinhero RG, Waduge RN, Liu Q, Sullivan JA, Tsao R, Bizimungu B, et al. Evaluation of nutritional profiles of starch and dry matter from early potato varieties and its estimated glycemic impact. *Food Chem* [Internet]. 2016;203:356–66. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.040>
 23. Andersen SSH, Heller JMF, Hansen TT, Raben A. Comparison of low glycaemic index and

- high glycaemic index potatoes in relation to satiety: A single-blinded, randomised crossover study in humans. *Nutrients*. 2018;10(11).
24. Lynch DR, Liu Q, Tarn TR, Bizimungu B, Chen Q, Harris P, et al. Glycemic index - A review and implications for the potato industry. *Am J Potato Res*. 2007;84(2):179–90.
 25. Garnica H, Ana Magdalena, Romero B, Ángela Rocío, Prieto C, Lena, Cerón L, María del Socorro, & Argüelles C J. Characterization of promising potato clones (*Solanum tuberosum* L. subspecies andigena) for starch extraction.pdf [Internet]. *Agronomía Colombiana*; 2012. p. 326–34. Available from: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-99652012000300003&script=sci_abstract&tlng=es
 26. Ekin Z. Some analytical quality characteristics for evaluating the utilization and consumption of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *African J Biotechnol* [Internet]. 2011 Jul 4;10(32):6001–10. Available from: <http://academicjournals.org/journal/AJB/article-abstract/70547E432065>
 27. Vivanti V, Finotti E, Friedman M. Level of acrylamide precursors asparagine, fructose, glucose, and sucrose in potatoes sold at retail in Italy in the United States. *J Food Sci*. 2006;71(2):81–5.
 28. Campos H, Ortiz O. The potato crop: Its agricultural, nutritional and social contribution to humankind. *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*. 2019. 1–518 p.
 29. Narváez-Cuenca C-E, Peña C, Restrepo-Sánchez L-P, Kushalappa A, Mosquera T. Macronutrient contents of potato genotype collections in the *Solanum tuberosum* Group Phureja. *J Food Compos Anal* [Internet]. 2018 Mar;66:179–84. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889157517302971>
 30. Bártová V, Bárta J, Brabcová A, Zdráhal Z, Horáčková V. Amino acid composition and nutritional value of four cultivated South American potato species. *J Food Compos Anal* [Internet]. 2015 Jun;40:78–85. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889157515000204>
 31. Hussain M, Qayum A, Xiuxiu Z, Liu L, Hussain K, Yue P, et al. Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein, and its possible future based products. Vol. 148, *Food Research International*. 2021.
 32. Deußer H, Guignard C, Hoffmann L, Evers D. Polyphenol and glycoalkaloid contents in potato cultivars grown in Luxembourg. *Food Chem*. 2012;135(4):2814–24.
 33. Silveira AC, Vilaro F, Kvapil MF, Del Carmen Rodriguez S, Zaccari F. Physical-chemical characterization and potential for frying of genetic potato (*Solanum tuberosum*) materials. *Rev Chapingo, Ser Hortic*. 2020;26(2):143–57.
 34. André CM, Oufir M, Hoffmann L, Hausman J-F, Rogez H, Larondelle Y, et al. Influence of environment and genotype on polyphenol compounds and in vitro antioxidant capacity of native Andean potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *J Food Compos Anal* [Internet]. 2009 Sep;22(6):517–24. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S088915750800197X>
 35. Camire ME. Potatoes and Human Health. In: *Advances in Potato Chemistry and Technology* [Internet]. Elsevier; 2016. p. 685–704. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128000021000236>
 36. Dale MFB, Griffiths DW, Todd DT. Effects of Genotype, Environment, and Postharvest Storage on the Total Ascorbate Content of Potato (*Solanum tuberosum*) Tubers. *J Agric*

- Food Chem [Internet]. 2003 Jan;51(1):244–8. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf020547s>
37. Ikanone CEO, Oyekan PO. Effect of Boiling and Frying on the Total Carbohydrate, Vitamin C and Mineral Contents of Irish (*Solanum tuberosum*) and Sweet (*Ipomea batatas*) Potato Tubers. Niger Food J [Internet]. 2014;32(2):33–9. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30115-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30115-6)
 38. Cuéllar-Cepeda F-A, Parra-Galindo M-A, Urquijo J, Restrepo-Sánchez L-P, Mosquera-Vásquez T, Narváez-Cuenca C-E. Influence of genotype, agro-climatic conditions, cooking method, and their interactions on individual carotenoids and hydroxycinnamic acids contents in tubers of diploid potatoes. Food Chem [Internet]. 2019 Aug;288:127–38. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814619304686>
 39. Burgos G, Amoros W, Salas E, Muñoa L, Sosa P, Díaz C, et al. Carotenoid concentrations of native Andean potatoes as affected by cooking. Food Chem [Internet]. 2012 Aug;133(4):1131–7. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308814611012398>
 40. Forero L. Carotenoids Extracted from Promising Clones of Criolla Potato (*Solanum tuberosum* Group Phureja) for Food Industry. 2005; Available from: <http://ojs.papaslatinas.org/index.php/rev-alap/article/view/200>
 41. Beltrán-Penagos MA, Sánchez-Camargo A del P, Narváez-Cuenca CE. Proximal composition, bioactive compounds and biorefinery approach in potato tubers of *Solanum tuberosum* Group Phureja: a review. Int J Food Sci Technol. 2020;55(6):2282–95.
 42. Sanchez Rivera LN, Arenas Pinto BC. Producción y caracterización fisicoquímica de una harina vegetal a base de papa [Internet]. Universidad Industrial de Santander. Universidad Industrial de Santander; 2023. Available from: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15289>
 43. Shen R, Yang S, Zhao G, Shen Q, Diao X. Identification of carotenoids in foxtail millet (*Setaria italica*) and the effects of cooking methods on carotenoid content. J Cereal Sci [Internet]. 2015 Jan;61:86–93. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0733521014002057>
 44. López-Cobo A, Gómez-Caravaca AM, Cerretani L, Segura-Carretero A, Fernández-Gutiérrez A. Distribution of phenolic compounds and other polar compounds in the tuber of *Solanum tuberosum* L. by HPLC-DAD-q-TOF and study of their antioxidant activity. J Food Compos Anal. 2014;36(1–2):1–11.
 45. Burgos G, Salas E, Amoros W, Auqui M, Muñ Oa L, Kimura M, et al. Total and individual carotenoid profiles in *Solanum phureja* of cultivated potatoes: I. Concentrations and relationships as determined by spectrophotometry and HPLC. [cited 2021 May 31]; Available from: <http://research.cip.cgiar.org/genebank/>
 46. Burgos G, Auqui S, Amoros W, Salas E, Bonierbale M. Ascorbic acid concentration of native Andean potato varieties as affected by environment, cooking and storage. J Food Compos Anal [Internet]. 2009 Sep;22(6):533–8. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889157508001415>
 47. Morillo-Velarde R. Agrupamiento de ensayos, análisis combinado [Internet]. 2008. p. 119. Available from: http://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337161059Agrupamiento_de_ensayos.pdf

48. Tirado M. R, Tirado L. R, Mendoza C. J. INTERACCIÓN GENOTIPO x AMBIENTE EN RENDIMIENTO DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) CON PULPA PIGMENTADA EN CUTERVO, PERÚ. *Chil J Agric Anim Sci*. 2018;(ahead):0–0.
49. Piñeros-Niño C, Narváez-Cuenca C-E, Kushalappa AC, Mosquera T. Hydroxycinnamic acids in cooked potato tubers from *Solanum tuberosum* group Phureja. *Food Sci Nutr* [Internet]. 2017 May;5(3):380–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/fsn3.403>
50. Burgos G, Zum Felde T, Andre C, Kubow S. The potato and its contribution to the human diet and health. *Potato Crop Its Agric Nutr Soc Contrib to Humankind* [Internet]. 2019 Jan 1 [cited 2025 Feb 1];37–74. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-28683-5_2
51. Godoy DGM. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIAS PARA EL APROVECHAMIENTO INTEGRAL DEL FRUTO DE MANGOSTAN A PARTIR DE SU CARACTERIZACION FISICOQUIMICA [Internet]. Universidad Industrial de Santander; 2017. Available from: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2017/170638.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Resultados análisis de varianza combinado por localidad

Análisis de varianza combinado para la variable humedad de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	31.3021***	10.4340	38.90	<.0001	13.92
Bloque (CAC)	8	1.8111 ^{ns}	0.2264 ^{ns}	0.84 ^{ns}	0.5723 ^{ns}	0.81
Genotipo	5	63.5756***	12.7151	47.40	<.0001	28.27
Genotipo x CAC	10	134.2885***	13.4288	50.06	<.0001	59.71
Error	30	8.0469***	0.2682			3.58
Corregido Total	56	224.8949				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9642					
Coefficiente de variación (CV)	0.5394					
Promedio	96.0196					

Análisis de varianza combinado para la variable gravedad específica de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	0.0013*	0.0007	3.32	0.0329	10.89
Bloque (CAC)	8	0.0013 ^{ns}	0.0002	0.75	0.6470	6.57
Genotipo	5	0.0035*	0.0007	3.25	0.0183	17.78
Genotipo x CAC	10	0.0073**	0.0007	3.44	0.0042	37.60
Error	30	0.0064	0.0002			32.79
Corregido Total	56	0.0194				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.6721					
Coefficiente de variación (CV)	1.3782					
Promedio	1.0576					

Análisis de varianza combinado para la variable glucosa de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	2.2858***	0.7619	100.44	<.0001	27.60
Bloque (CAC)	8	0.0166 ^{ns}	0.0021	0.27	0.9700	0.20
Genotipo	5	2.3306***	0.4661	61.44	<.0001	28.14
Genotipo x CAC	10	2.6774***	0.2677	35.29	<.0001	32.32
Error	30	0.2276	0.0076			2.75
Corregido Total	56	8.2831				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9725					
Coefficiente de variación (CV)	14.2849					
Promedio	0.6097					

Análisis de varianza combinado para la variable sacarosa de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	0.4471***	0.1490	106.06	<.0001	14.85
Bloque (CAC)	8	0.0129 ^{ns}	0.00161	1.15	0.3624	0.43
Genotipo	5	0.5119***	0.1024	72.87	<.0001	17.00
Genotipo x CAC	10	2.0213***	0.2021	143.86	<.0001	67.12
Error	30	0.0422	0.0014			1.40
Corregido Total	56	3.0115				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9860					
Coefficiente de variación (CV)	9.5729					
Promedio	0.3916					

Análisis de varianza combinado para la variable almidón de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	355.1403***	118.3801	31.26	<.0001	22.38
Bloque (CAC)	8	13.7041	1.7130	0.45	0.8793	0.86
Genotipo	5	136.2249**	27.2449	7.19	0.0002	8.59
Genotipo x CAC	10	919.8330***	91.9833	24.29	<.0001	57.97
Error	30	113.6173	3.7872			7.16
Corregido Total	56	1586.6838				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9284					
Coefficiente de variación (CV)	2.2781					
Promedio	85.4249					

Análisis de varianza combinado para la variable cenizas de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	2.1785***	0.7262	45.03	<.0001	31.38
Bloque (CAC)	8	0.1253 ^{ns}	0.0157	0.97	0.4767	1.80
Genotipo	5	1.6533***	0.3307	20.50	<.0001	23.82
Genotipo x CAC	10	2.3092***	0.2309	14.32	<.0001	33.26
Error	30	0.4838	0.0161			6.97
Corregido Total	56	6.9419				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9303					
Coefficiente de variación (CV)	4.0966					
Promedio	3.0999					

Análisis de varianza combinado para la variable grasas de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	0.1347***	0.0449	24.45	<.0001	11.07
Bloque (CAC)	8	0.0081 ^{ns}	0.0010	0.55	0.8102	0.66
Genotipo	5	0.4738***	0.0948	51.61	<.0001	38.94
Genotipo x CAC	10	0.5362***	0.0536	29.21	<.0001	44.08
Error	30	0.0551	0.0018			4.53
Corregido Total	56	1.2166				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9547					
Coefficiente de variación (CV)	6.4940					
Promedio	0.6598					

Análisis de varianza combinado para la variable proteínas de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	0.1929***	0.0643	38.66	<.0001	13.11
Bloque (CAC)	8	0.0111 ^{ns}	0.0014	0.83	0.5815	0.75
Genotipo	5	0.6666***	0.1333	80.15	<.0001	45.30
Genotipo x CAC	10	0.3945***	0.0394	23.72	<.0001	26.81
Error	30	0.0499	0.0017			3.39
Corregido Total	56	1.4715				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9660					
Coefficiente de variación (CV)	3.5113					
Promedio	1.1615					

Análisis de varianza combinado para la variable ácido clorogénico de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	407189.904***	135729.968	956.47	<.0001	25.11
Bloque (CAC)	8	333.368 ^{ns}	41.671	0.29	0.9626	0.02
Genotipo	5	229112.579***	45822.516	322.90	<.0001	14.13
Genotipo x CAC	10	1037405.79***	103740.579	731.04	<.0001	63.97
Error	30	57257.231	1908.57			3.53
Corregido Total	56	1621587.768				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9974					
Coefficiente de variación (CV)	5.6571					
Promedio	210.5745					

Análisis de varianza combinado para la variable ácido cafeico de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	684.3441***	228.1147	147.70	<.0001	26.65
Bloque (CAC)	8	4.7343 ^{ns}	0.5918	0.38	0.9211	0.18
Genotipo	5	735.5183***	147.1037	95.25	<.0001	28.64
Genotipo x CAC	10	1033.8543***	103.3854	66.94	<.0001	40.26
Error	30	46.3333	1.5444			1.80
Corregido Total	56	2568.1638				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9819					
Coefficiente de variación (CV)	7.6924					
Promedio	16.1557					

Análisis de varianza combinado para la variable catequina de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	2054.8128***	684.9376	475.25	<.0001	23.04
Bloque (CAC)	8	3.2099 ^{ns}	0.4012	0.28	0.9673	0.04
Genotipo	5	2934.0647***	586.8129	407.16	<.0001	32.90
Genotipo x CAC	8	4421.7829***	552.7229	383.51	<.0001	49.58
Error	26	537.4718	20.6720			6.03
Corregido Total	50	8917.9939				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9958					
Coefficiente de variación (CV)	5.9170					
Promedio	20.2892					

Análisis de varianza combinado para la variable capacidad antioxidante de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	3013.8432***	1004.6144	35.60	<.0001	12.72
Bloque (CAC)	8	444.6838	55.5855	1.97	0.0856	1.88
Genotipo	5	7273.4803***	1454.6961	51.55	<.0001	30.69
Genotipo x CAC	10	11618.2548***	1161.8255	41.17	<.0001	49.03
Error	30	846.6464	28.2216			3.57
Corregido Total	56	23696.6496				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9643					
Coefficiente de variación (CV)	9.1153					
Promedio	58.2802					

Análisis de varianza combinado para la variable vitamina C de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	44371.9264***	14790.6422	3385.38	<.0001	42.83
Bloque (CAC)	8	16.9955 ^{ns}	2.12443	0.49	0.8555	0.02
Genotipo	5	54861.0717***	10972.2143	2511.39	<.0001	52.96
Genotipo x CAC	9	18400.8656***	2044.5406	467.97	<.0001	17.76
Error	28	14222.3313	507.9404			13.73
Corregido Total	53	103593.7380				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9988					
Coefficiente de variación (CV)	2.0618					
Promedio	101.3755					

Análisis de varianza combinado para la variable hierro de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	4.6152***	1.5384	94.26	<.0001	41.45
Bloque (CAC)	8	0.0975	0.0122	0.75	0.6505	0.88
Genotipo	5	3.5234***	0.7047	43.18	<.0001	31.64
Genotipo x CAC	10	1.2101***	0.1210	7.41	<.0001	10.87
Error	30	0.4896	0.0163			4.40
Corregido Total	56	11.1356				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9560					
Coefficiente de variación (CV)	6.4537					
Promedio	1.9795					

Análisis de varianza combinado para la variable zinc de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	1.4260***	0.4753	4771.85	<.0001	52.47
Bloque (CAC)	8	0.0026 ^{ns}	0.0003	3.29	0.0081	0.10
Genotipo	5	0.5636***	0.1127	1131.57	<.0001	20.74
Genotipo x CAC	10	0.3919***	0.0392	393.46	<.0001	14.42
Error	30	0.4896	0.0163			0.11
Corregido Total	56	11.1356				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9989					
Coefficiente de variación (CV)	0.8643					
Promedio	1.1547					

Análisis de varianza combinado para la variable carotenoides totales de 5 genotipos de papa *Solanum tuberosum* grupo Phureja más el testigo Criolla Colombia evaluados en 4 ambientes (localidades) de Santander y Norte de Santander

Fuente de Variación	GL	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F Value	Pr > F	Porcentaje de variación (%)
Condición Agroclimática (CAC)	3	5088.2439***	1696.0813	1000.08	<.0001	8.01
Bloque (CAC)	8	26.3607 ^{ns}	3.2951	1.94	0.0899	0.04
Genotipo	5	10612.1226***	2122.4245	1251.47	<.0001	16.70
Genotipo x CAC	10	49129.1529***	4912.9153	2896.87	<.0001	77.32
Error	30	1390.01	46.3337			2.19
Corregido Total	56	63540.7046				
Coefficiente de determinación (R ²)	0.9991					
Coefficiente de variación (CV)	2.2503					
Promedio	57.8706					

Apéndice B. Scores de los componentes principales (CP 1, CP 2, CP 3) y la media para cada ambiente y genotipo, de los términos AMMI para el gráfico del *biplot*.

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable almidón.

	Factores		Almidón (g/100 g)	CP 1	CP 2	CP 3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	85.59	2.40288	-.32828	-7.57165E-08
	Clon 9	CL_9	87.10	-.55580	1.08047	-7.57165E-08
	Criolla Colombia	C_COL	84.01	-1.84708	-.75219	-7.57165E-08
Ambiente			91.83	.28768	.51322	9.16181E-08
	Chitagá	CHIT	83.16	-1.53424	.67329	4.40978E-08
	Concepción 1	CON_1	85.56	-1.14884	-1.05171	6.6633E-08
	Concepción 2	CON_2	81.72	2.39541	-.13480	4.91987E-08
	Mutiscua	MUTI	85.59	2.40288	-.32828	-7.57165E-08

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable proteínas.

	Factores		Proteínas (g/100 g)	CP 1	CP 2	CP 3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	1.10	.44186	-.03762	6.33334E-09
	Clon 9	CL_9	1.08	-.32334	-.10292	6.33334E-09
	Criolla Colombia	C_COL	1.13	-.11852	.14054	6.33334E-09
Ambiente			1.06	-.30701	-.06218	8.3394E-09
	Chitagá	CHIT	1.15	-.12252	-.04486	-2.99692E-09
	Concepción 1	CON_1	1.22	.45175	-.04685	5.05306E-09
	Concepción 2	CON_2	0.99	-.02222	.15390	4.034E-09
	Mutiscua	MUTI	1.10	.44186	-.03762	6.33334E-09

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable ácido clorogénico.

	Factores		Ácido clorogénico (mg/100 g)	CP1	CP2	CP3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	179.92	-11.2821	-3.02199	.000000079
	Clon 9	CL_9	235.25	12.7367	-2.09274	.000000079
	Criolla Colombia	C_COL	109.84	-1.4546	5.11473	.000000079
Ambiente	Chitagá	CHIT	185.90	6.7078	-.80913	-.000000124
	Concepción 1	CON_1	143.09	-5.2344	5.09725	-.000000033
	Concepción 2	CON_2	207.30	-11.1805	-3.53002	-.000000028
	Mutiscua	MUTI	163.72	9.7071	-.75810	.000000036

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable vitamina C.

	Factores		Vitamina C (mg/100 g)	CP1	CP2	CP3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	100.02	6.08775	-.66437	.000000110
	Clon 9	CL_9	140.69	-3.74088	-4.01986	.000000110
	Criolla Colombia	C_COL	96.62	-2.34687	4.68423	.000000110
Ambiente	Chitagá	CHIT	116.45	.08308	5.31322	.000000099
	Concepción 1	CON_1	147.69	-.17938	-2.54219	.000000130
	Concepción 2	CON_2	125.99	-5.26782	-1.31365	.000000070
	Mutiscua	MUTI	59.64	5.36411	-1.45737	.000000071

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable hierro.

	Factores		Hierro (mg/100 g)	CP1	CP2	CP3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	1.90	.52908	-.07685	9.98214E-09
	Clon 9	CL_9	1.92	-.18397	.41692	9.98214E-09
	Criolla Colombia	C_COL	1.84	-.34510	-.34007	9.98214E-09
Ambiente	Chitagá	CHIT	1.60	-.11107	.45561	0
	Concepción 1	CON_1	2.14	.07867	-.07386	-1.64051E-08
	Concepción 2	CON_2	2.24	.47107	-.12207	4.92773E-09
	Mutiscua	MUTI	1.56	-.43867	-.25969	2.34949E-09

Valores escalares de los componentes principales y la media para cada ambiente y genotipo, de la variable carotenoides totales.

	Factores		Carotenoides totales (mg/100 g)	CP1	CP2	CP3
	Nombre	Código				
Genotipo	Clon 2	CL_2	65.21	8.14804	-1.98761	.000000097
	Clon 9	CL_9	68.09	-6.49319	-4.02707	.000000097
	Criolla Colombia	C_COL	46.00	-1.65485	6.01468	.000000097
Ambiente	Chitagá	CHIT	57.26	-5.97935	-4.79706	.000000087
	Concepción 1	CON_1	61.99	-1.94057	2.90001	.000000046
	Concepción 2	CON_2	72.58	8.45493	-2.45170	.000000079
	Mutiscua	MUTI	47.24	-.53501	4.34875	.000000110

Apéndice C. Matriz FODA de opciones de uso.

Idea de Aprovechamiento 2: Proteína de papa	
Fortalezas	Oportunidades
<p>la proteína de papa criolla es de alta calidad al tener un alto perfil de aminoácidos como el aminoácido esencial lisina que se encuentra en poca cantidad en los cultivos principales como arroz y trigo. Adicionalmente la proteína de este tubérculo posee un alto valor biológico (VB:70-90) comparable con el huevo (VB:100), arroz (VB:) y es libre de alérgenos.</p>	<p>Puede ofrecerse a empresas de alimentos tanto para suplemento (batido) nutricional, o para fortificar u aumentar la solubilidad y emulsión de preparaciones de alimentos y bebidas y para consumidores que deseen productos libres de alérgenos y que prefieran proteína vegetal. Las cáscaras recicladas como subproducto del procesamiento podrían aprovecharse como fuente de compuestos polifenólicos y de carotenoides para producir otros productos alimenticios, incluidos alimentos funcionales y nutracéuticos (López-Cobo et al., 2013).</p>
Debilidades	Amenazas
<p>Los clones estudiados poseen bajo contenido de proteínas (<2%). El uso de solventes para su extracción genera aguas residuales que requieren tratamientos y pueden interferir con la regulación ambiental.</p>	<p>Requiere de mayores estudios. Existencia de proteínas de menor costo y mayor producción (proteína de soya).</p>
Idea de Aprovechamiento 3: Harina de papa	
Fortalezas	Oportunidades
<p>No contiene alérgenos como el trigo, haciéndola adecuada para personas que padecen enfermedad celíaca o intolerancia al gluten. Los niveles totales de vitaminas y minerales en la harina de papa son más altos que en la harina de trigo. Chun y col. (2005) - Liu 2016. Su proceso de extracción tiene un efecto menos contaminante que las aguas residuales generadas en la producción de almidón a nivel industrial (Xu et al., 2017).</p>	<p>puede ser usada en la fabricación de productos de panadería y repostería, en pastas, coladas y como aditivo en alimentos y bebidas, luego las empresas que producen este tipo de alimentos son potenciales consumidores. Importante para los mercados de "alimentos precocidos" (convenience food market), "de rápida preparación o instantáneos" y "Sin gluten" (gluten-free market). El mercado nacional no se está produciendo y comercializando la harina de papa local, en ciertos almacenes de cadenas se está vendiendo harina de papa importada, aunque estos almacenes suelen ser escasos y difícil de encontrar el producto. (https://es.scribd.com/document/401804418/Estudio-de-Mercado-Produccion-de-Harina-de-Papa). Las cáscaras recicladas como subproducto del procesamiento hacia hojuelas podrían aprovecharse como fuente de compuestos polifenólicos y de carotenoides para producir otros productos alimenticios, incluidos alimentos funcionales y nutracéuticos (López-Cobo et al., 2013).</p>
Debilidades	Amenazas
<p>Bajo consumo y menos usos de la harina de papa con respecto a otras harinas comerciales como la de trigo, maíz y arroz. Requiere de método químico o térmico o la combinación de los dos para inhibir el pardeamiento enzimático; adicionalmente, los clones de papa evaluados</p>	<p>En los próximos años la reglamentación puede ser más estricta para el consumo de harinas. Competencia por el mercado debido a la presencia de otros tipos de harina como la de trigo, maíz y arroz.</p>

Idea de Aprovechamiento 3: Harina de papa

tienen alto contenido de humedad (>75%), lo que requeriría mayor tiempo en el proceso de secado aumentando los costos de operación, además disminuiría el rendimiento de obtención de harina (J. Alonso., et al. 2014).

Idea de Aprovechamiento 4: Fritura de papas

Fortalezas

Los clones de papa estudiados tienen mayor gravedad específica (≥ 1.080) y bajos niveles de azúcares reductores, dando como resultado frituras con menor contenido de aceite, más crocantes y sin coloración oscura.

Oportunidades

El agua generada en su procesamiento puede ser utilizada para la extracción de almidón como subproducto. Igualmente, las cáscaras recicladas como subproducto del procesamiento hacia hojuelas podrían aprovecharse como fuente de compuestos polifenólicos y de carotenoides para producir otros productos alimenticios, incluidos alimentos funcionales y nutraceuticos (López-Cobo et al., 2013). Buena crocancia y baja retención de aceite de sus hojuelas freídas.

Debilidades

Pardeamiento enzimático o pigmentación por la liberación de carotenoides por efecto de tratamiento térmico.

Amenazas

Regulación de productos ultraprocesados.

Idea de Aprovechamiento 5: Almidón nativo	
Fortalezas	Oportunidades
<p>En los genotipos de papa criolla estudiados en las diferentes localidades se encontró un contenido promedio de almidón del 16.63%, valor aceptable para el uso de tubérculos de papa para la obtención de almidón nativo (Garnica H, Ana Magdalena, Romero B, Ángela Rocío, Prieto C, Lena, Cerón L, María del Socorro, & Argüelles C, n.d.). El almidón nativo es aquel que no ha sufrido modificación química durante su obtención. Debido a su bajo precio, biodegradabilidad, buenas propiedades mecánicas y de barrera es una de las materias primas más usadas para el empaque y como aditivo en formulación de alimentos (Sadegh-Hassani & Mohammadi Natfchi., 2014).</p>	<p>Se puede emplear en la elaboración de mortadela, biopolímeros, productos de panadería y repostería. Se puede usar en la industria de alimentos como ingrediente funcional por sus propiedades estabilizantes, gelificantes y espesantes (Garnica) y en la elaboración de films biodegradables para empaque de alimentos. En su producción se generan subproductos con alto contenido en proteínas, aminoácidos libres y sales que podrían emplearse en aplicaciones alimentarias, biotecnológicas y farmacéuticas. Las cáscaras de papa generadas como subproducto son buena fuente de vitamina C, fibra dietaria y fitonutrientes como carotenoides, polifenoles y flavonoides que se pueden emplear en la industria farmacéutica o nutracéutica. Los subproductos también pueden ser empleados en procesos de fermentación para la producción de bioetanol y ácido láctico.</p>
Debilidades	Amenazas
<p>La tecnología utilizada para la extracción de almidón de papa genera aguas residuales que requieren de su purificación tanto el agua de la fruta como la pulpa. Su alto contenido de humedad (80%) requiere un secado costoso debido al problema de deterioro si no se trata (S. Survase., et al. 2016).</p>	<p>Hay un mercado competitivo por la presencia de otros tipos de almidones.</p>

Idea de Aprovechamiento 6: Consumo en fresco	
Fortalezas	Oportunidades
<p>Puede ser consumida en fresco después de cocción. Tiene alto contenido de energía, carotenoides totales, es buena fuente de vitamina C, hierro. La papa es una buena fuente de minerales y vitamina C. La vitamina C actúa como antioxidante al proteger los tejidos del estrés oxidativo. Las variedades pigmentadas de papa tienen un elevado contenido de vitamina C y antocianinas naturales, con propiedades antioxidantes que proveen beneficios potenciales para la salud y mecanismos de defensa contra la acción de radicales libres de oxígeno (ROS). Contenido de vitamina C mayor a 121.4 mg/100 g en Base Seca (BS).</p>	<p>Es un producto de la canasta básica en Colombia, países europeos y asiáticos. Colombia es el principal el productor y consumidor de papa criolla en América Latina.</p>
Debilidades	Amenazas
<p>Desconocimiento de las ventajas fisicoquímicas y funcionales por parte de la población consumidora.</p>	<p>Competencia con el mercado internacional. Es susceptible a plagas de insectos.</p>

Apéndice D. Formato de cuestionario para expertos

**ENCUESTA ONLINE A EXPERTOS PARA IDENTIFICAR LA MEJOR
ALTERNATIVA DE PRODUCTOS DERIVADOS DEL GENOTIPO DE PAPA
CRIOLLA PRIORIZADO (CLON 9)**

CUESTIONARIO: Identificación de la mejor alternativa de productos derivados del clon 9 de papa criolla

Gracias por participar en esta encuesta. Mediante el siguiente formulario se busca analizar el potencial del clon 9 de papa Criolla (*Solanum tuberosum* grupo Phureja), de la colección de trabajo de la corporación AGROSAVIA, como fuente de ácido clorogénico y carotenoides para usos industriales y nutricionales. Este clon presenta en Base Seca (BS), altos contenidos de gravedad específica (desde 1.0367 hasta 1.0833), almidón (desde 81.7760 hasta 92.1403 g/100 g), ácido clorogénico (desde 125.9938 hasta 349.1891 mg/100 g), vitamina C (desde 73.6750 hasta 186.8300 mg/100 g), carotenoides totales (35.8776 – 123.7245 µg/g β caroteno); y bajos contenidos de proteínas (desde 0.9620 hasta 1.1721 g/100 g), grasa (0.5107 – 0.7288 g/100 g) y contenidos de glucosa y sacarosa entre bajos (0.2231 y 0.2426 g/100 g, respectivamente) y altos (0.6942 y 1.2761 g/100 g, respectivamente).

La encuesta le tomará algunos minutos para desarrollarla y le preguntaremos sobre temas relacionados con productos, procesos de transformación, madurez tecnológica, mercado, insumos y recursos, sectores productivos, legislación, aporte de valor e innovación. La información que nos brinde será manejada con estricta confidencialidad y contribuirá a identificar la mejor estrategia de transformación y comercialización.

1. Nombres y apellidos
2. Fecha de diligenciamiento

3. Institución a la que pertenece

4. ¿Cuál es su profesión?

5. ¿En cuál de los siguientes campos relacionados con alimentos tiene experiencia?

a) investigación/docencia

b) industria alimentaria

c) nutrición/salud

d) desarrollo de nuevos productos

6. ¿Cuántos años de experiencia tiene en el sector?

Menor de cinco (5) años

Mayor a cinco (5) años

De cinco a diez años

Más de diez años

4. ¿Pertenece al sistema nacional de investigadores de su país?

Si

No

5. ¿Cree que los procesos de transformación actuales para extraer ácido clorogénico del Clon 9 requieren mejoras?

6. ¿Cree que los procesos de transformación actuales para obtener carotenoides como pigmentos del Clon 9 requieren mejoras?

7. ¿Considera que existe suficiente madurez tecnológica para la extracción de ácido clorogénico del Clon 9?

8. ¿Considera que existe suficiente madurez tecnológica para la obtención de carotenoides como pigmentos del Clon 9?

9. Actualmente, ¿cree que existen nichos de mercado nacionales e internacionales para productos derivados del Clon 9 como extracción de ácido clorogénico?

10. Actualmente, ¿cree que existen nichos de mercado nacionales e internacionales para productos derivados del Clon 9 como obtención de carotenoides como pigmentos?

11. ¿Considera que dentro de 10 años existirán nichos de mercado nacionales e internacionales para productos derivados del Clon 9 como ácido clorogénico?

12. ¿Considera que dentro de 10 años existirán nichos de mercado nacionales e internacionales para productos derivados del Clon 9 como obtención de carotenoides para pigmentos?

13. ¿Los recursos económicos actuales para procesar el Clon 9 hacia la extracción de ácido clorogénico son asequibles?

14. ¿Los recursos económicos actuales para procesar el Clon 9 hacia la obtención de carotenoides como pigmentos son asequibles?

15. ¿Existen sectores de la industria con alta demanda para el Clon 9 como fuente de ácido clorogénico?

16. ¿Existen sectores de la industria con alta demanda para el Clon 9 como fuente de carotenoides como pigmentos?

17. ¿Considera que hay restricciones legales o normas relacionadas con la comercialización del producto (por ej: normativa de OMS o CODEX alimentario, impuestos, requerimientos en rotulados frontales, entre otros) para la comercialización de ácido clorogénico extraído del Clon 9?

18. ¿Considera que hay restricciones legales o normas relacionadas con la comercialización del producto (por ej: normativa de OMS o CODEX alimentario, impuestos, requerimientos en

rotulados frontales, entre otros) para la comercialización de carotenoides como pigmentos extraídos del Clon 9?

20. ¿Transformar el Clon 9 para obtener ácido clorogénico aporta valor agregado a la materia prima?

21. ¿Transformar el Clon 9 para obtener carotenoides como pigmentos aporta valor agregado a la materia prima?

22. ¿El uso del Clon 9 para extracción de ácido clorogénico integrado a procesos de innovación podría potenciar su valor nutricional?

23. ¿El uso del Clon 9 para obtener carotenoides como pigmentos integrado a procesos de innovación podría potenciar su valor nutricional?

24. ¿El uso del Clon 9 para obtener extracción ácido clorogénico integrado a procesos de innovación podría potenciar sus características funcionales?

25. ¿El uso del Clon 9 para obtener carotenoides como pigmentos, integrado a procesos de innovación podría potenciar sus características funcionales?

26. ¿El uso del Clon 9 para extracción de ácido clorogénico integrado a procesos de innovación podría aumentar su relevancia en el mercado?

27. ¿El uso del Clon 9 para obtener carotenoides como pigmentos integrado a procesos de innovación podría aumentar su relevancia en el mercado?