





Título de la obra

Atributos de calidad nutricional y agroindustrial

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo VII -

Atributos de calidad nutricional y agroindustrial de los ajís en Colombia: descripción de la diversidad fisicoquímica de frutos de *Capsicum* spp. provenientes del BGV

Esteban Castaño Llanos, Jaison Martínez Saldarriaga, Gleyder Yeraldín Bedoya Vélez,
Maira Alejandra Vega Muñoz, Juan Camilo Henao Rojas,
Guillermo León Montoya Peláez

Este capítulo presenta la caracterización fisicoquímica de 245 genotipos de *Capsicum* spp. pertenecientes al banco de germoplasma de la Nación, con el propósito de evaluar su aptitud agroindustrial. Mediante un análisis de agrupamiento K-means, se identificaron 12 categorías con propiedades homogéneas, definidas a partir de variables como pH, sólidos solubles, materia seca y parámetros de textura. Los frutos analizados mostraron un pH ligeramente ácido (4,5-5,5), contenidos de sólidos solubles entre 5,3 y 12,9 °Brix y porcentajes de materia seca del 7,8 al 20,5 %. Las pruebas de textura registraron niveles de firmeza de hasta 1.970 g y consistencias de

3.175 g/s, asociadas a la presencia de polisacáridos estructurales. Se cuantificaron carotenoides totales de hasta 18,47 mg/g y capsaicinoides de hasta 1.260 ppm, equivalentes a niveles de picor superiores a 100.000 unidades Scoville. Estos perfiles permiten definir usos comerciales específicos: el grupo 7 es idóneo para condimentos en polvo por su alta firmeza, mientras que los grupos 2, 8 y 10 destacan para la extracción de colorantes y la producción de salsas por su elevada consistencia y pigmentación. En conjunto, esta diversidad genética constituye un recurso estratégico para la innovación en las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola nacional.





Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Introducción

En el amplio universo de la agricultura, los pimientos y ajís del género *Capsicum* spp. se destacan como elementos emblemáticos de una riqueza biológica sin precedentes. En este capítulo se ofrecerá información sobre la diversidad fisicoquímica de los frutos provenientes de la colección de germoplasma de AGROSAVIA. Con una perspectiva holística, se explorarán los atributos que definen la calidad nutricional y agroindustrial de este género. También se abordará la importancia vital de la seguridad alimentaria y la calidad nutricional en su producción y comercialización. En estas páginas se invita a descubrir la diversidad agrícola colombiana que cobra vida a través del lente de la investigación.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Calidad y nutrición

En la era moderna, el conocimiento y el deseo de los consumidores por adquirir alimentos de mayor nutrición y estética han experimentado un apreciable aumento. En este contexto, surgen dos requisitos fundamentales que deben seguirse para su comercialización: seguridad y calidad (Hew et al., 2024). La seguridad alimentaria implica que todas las personas tengan acceso físico y económico a suficiente alimento inocuo y nutritivo para satisfacer sus necesidades y preferencias nutricionales con miras a una vida activa y saludable. Por otro lado, cuando se habla de calidad alimentaria, se hace referencia a las características físicas, químicas y microbiológicas que afectan el valor nutricional y la aceptabilidad por parte del consumidor (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por su sigla en inglés], 2011). Es así como, bajo estas dos premisas, la seguridad alimentaria, sus prácticas y principios siempre estarán ligadas al aseguramiento de la calidad de los alimentos (Gordillo & Méndez Jerónimo, 2013; Hew et al., 2024).

Por lo anterior, hablar de calidad en este escenario implica entender que cada alimento posee características distintivas en sabor, textura, apariencia y nutrición, que contribuyen a la aceptabilidad por parte de los consumidores. No obstante, la composición química de los alimentos o de sus productos derivados es la principal característica que los distingue. Esta composición es el resultado de numerosos y diversos compuestos, cada uno con propiedades únicas (Ali et al., 2023). Estas pueden ser sustancias como proteínas, lípidos, carbohidratos, aminoácidos, metabolitos, vitaminas, minerales, entre otras (De Man et al., 2018; Granato et al., 2011; Pace et al., 2020). Por eso, conocer, identificar y conservar esta composición química es de suma importancia para asegurar la calidad de los alimentos en el tiempo.

Existen diversos aspectos que definen la calidad de estos: lo higiénico y lo sanitario; la inocuidad; la calidad bromatológica; las propiedades nutricionales y su composición química, y la calidad sensorial u organoléptica, por ejemplo, son algunos ti-

pos de calidad en lo que concierne a los alimentos. La calidad abarca una gran variedad de aspectos, incluyendo seguridad higiénica y sanitaria, inocuidad, composición bromatológica, propiedades nutricionales, así como perfil sensorial y organoléptico. Estos son solo algunos ejemplos de los diferentes aspectos que contribuyen a la calidad de la comida (Prieto et al., 2008; Ali et al., 2023). Cada alimento puede describirse mediante variables físicas, químicas y microbiológicas que, según la percepción y las preferencias del consumidor, se traducen en características o atributos de calidad. Es imprescindible para las industrias comprender la relación entre las propiedades de lo que se consume, evaluadas a través de las diferentes variables, y los atributos de calidad percibidos. De esta manera, un conocimiento adecuado de estas propiedades y de sus valores mínimos permitiría incorporar los atributos de calidad deseados al producto final, gestionando los procesos de la cadena alimentaria (Prieto et al., 2008). En el contexto actual, se ha observado un aumento en la demanda de productos alimenticios que, además de cumplir con los estándares de calidad anteriormente mencionados, posean cualidades biofuncionales. Esto se debe a que las personas son cada vez más conscientes de los posibles efectos sobre la salud que posee el consumo de la comida adecuada (Tripathy et al., 2023). Por consiguiente, los alimentos biofuncionales han ganado popularidad, ya que dentro de su composición química se encuentran minerales, vitaminas, carotenoides, antioxidantes

y fitoesteroides, los cuales son funcionales y beneficiosos para la salud (Hew et al., 2024; Ahmad et al., 2019; Balahbib et al., 2021; Hassan et al., 2019; Karaman et al., 2023; Średnicka-Tober et al., 2022). Al analizar la diversidad de los cultivares de los ajís y pimentones, es evidente que sus características morfológicas, como el tamaño, la forma y el color, son criterios fundamentales para su clasificación. Sin embargo, la calidad de estos frutos va más allá de su apariencia externa. En particular, el color, la pungencia y el sabor son aspectos cruciales que no solo definen la aceptabilidad del consumidor, sino que también revelan la presencia de compuestos bioactivos cruciales para la salud. Entre estos compuestos se encuentran los carotenoides, los capsaicinoides y otros metabolitos volátiles responsables de los atributos sensoriales distintivos del ají (Hassan et al., 2019). La amplia variedad de fitoquímicos presentes en estos frutos, como flavonoides, vitaminas, terpenos y polifenoles, influye tanto en sus cualidades organolépticas como en su valor nutricional (Cervantes-Hernández et al., 2019). Esta relación entre los metabolitos y las características del ají resalta la importancia de comprender su composición química y sus propiedades funcionales, en la búsqueda de alimentos de alta calidad y valor nutricional.

El color, por ejemplo, que desempeña un papel crucial en la calidad del ají, está estrechamente relacionado con el contenido de pigmentos presente en sus tejidos. Entre estos pigmentos, los

Foto: Esteban Castaño Llanos



carotenoides son especialmente relevantes, ya que son los responsables de dar el característico rojo a muchos productos alimenticios. Por ejemplo, xantofilas, como la capsantina y la capsorubina, pertenecientes a los carotenoides, predominan como moléculas responsables del tono rojo en los ajís (Alamu et al., 2023; Hassan et al., 2019). Además, existen otros carotenoides, como el β -caroteno y la zeaxantina, relacionados con las tonalidades naranjas, mientras que la luteína y la violaxantina se relacionan con tonalidades amarillas. Además de su contribución al color, los carotenoides poseen propiedades nutricionales y farmacológicas significativas. Se ha demostrado que tienen efectos antioxidantes, neuroprotectores, cardioprotectores y beneficios para la salud visual (Li et al., 2024). Debido a estas cualidades, los carotenoides están ganando interés en diferentes áreas de investigación, por ejemplo, en la formulación de colorantes alimentarios y como suplemento en alimentación animal (Abd El-Hack et al., 2022; Alamu et al., 2023).

Los capsaicinoides, al igual que los carotenoides, juegan un papel crucial en la composición y características del ají. Sus dos moléculas principales son la capsaicina y la dihidrocapsaicina, que constituyen la mayoría de los capsaicinoides presentes en el fruto y que son las responsables de su característica pungencia, de manera que producen una sensación de calor o picor al ser consumidas, a diferencia de los capsinoides, que se encuentran en los pimientos dulces del género *Capsicum* y no

producen esta sensación. El capsiato y el dihidro-capsiato son los dos principales análogos de los capsinoides (Cervantes-Hernández et al., 2019). La influencia de los capsaicinoides en mamíferos es notable debido a su interacción con los receptores nerviosos denominados TRPV1, localizados en las terminaciones de las fibras nerviosas mediadoras del dolor y presentes en la lengua y el intestino, tanto grueso como delgado. Estos receptores, además de transmitir el dolor, desempeñan un papel importante en el control del peso corporal, lo que hace que los capsaicinoides tengan aplicaciones médicas significativas. Por un lado, se utilizan como tratamiento para modular el dolor neuropático y actúan reduciendo la sustancia P en la sangre, para aliviar el dolor en pacientes afectados. Por otro lado, moléculas como la capsaicina y su análogo, el capsiato, influyen en el metabolismo humano estimulando la secreción de hormonas como las catecolaminas, lo que promueve la reducción del tejido adiposo: mediante el aumento del consumo de oxígeno, la oxidación de lípidos genera una sensación de saciedad y aumenta, en consecuencia, el gasto energético (García Fernández, 2018).

Otro ejemplo de compuestos químicos de interés en los ajís son los fenólicos, que presentan una gran variedad en términos de solubilidad, polaridad y estructura. Sin embargo, su cualidad más relevante es su fuerte actividad antioxidante, por la cual pueden proteger al cuerpo de enfermedades provocadas por el estrés oxidativo (Vaz et al., 2022).

Esto se debe a que ciertos trastornos se encuentran relacionados con la edad y pueden ser provocados por radicales libres, lo que implica la generación de estrés oxidativo y, por ende, una oxidación de los componentes celulares. En este caso, los antioxidantes y, en especial, este grupo de moléculas protegen al organismo al neutralizar o eliminar estas especies reactivas (Granato et al., 2011).

Las dietas ricas en vegetales se han relacionado con un menor riesgo de desarrollar algunas enfermedades, como diabetes, cáncer, padecimientos cardiovasculares y problemas neurológicos y cognitivos. Estos impactos en la salud están relacionados con la cantidad de sustancias bioactivas en los alimentos, particularmente los compuestos fenólicos (Neis et al., 2022). En el ají es posible encontrar el ácido p-cumárico, el ácido ferúlico, la miricetina, la luteolina y la quercetina, que son los principales compuestos presentes en el género *Capsicum* (Karaman et al., 2023; Sutliff et al., 2021).

Estos beneficios para la salud, relacionados con la diversidad química de los ajís, confirman los efectos nutraceuticos que posee su consumo o, en pocas palabras, hacen referencia a esa calidad biofuncional, innata de estos frutos. De hecho, existen diversos estudios clínicos que soportan las propiedades de los ajís y sus efectos en el cuerpo. Un ejemplo son los trabajos relacionados con tratamientos contra dolores crónicos causados por diferentes enfermedades. En este

caso, el compuesto activo presente es la capsaicina, el cual ha sido incluido en formulaciones tópicas para el tratamiento de afecciones como la neuropatía diabética dolorosa, la neuropatía por VIH y la neuralgia posherpética. De hecho, la capsaicina tópica en altas concentraciones (8 al 10 %) tiene efectos comparables a los de otros tratamientos tradicionales para el dolor crónico (Derry et al., 2013). En la misma línea de aplicaciones médicas, existen estudios relacionados con la creación y aplicación de parches tópicos terapéuticos con presencia de capsaicina (8 %) para el tratamiento de dolor crónico, los cuales han sido utilizados en terapias similares a las mencionadas anteriormente. En la actualidad, se adelantan ensayos enfocados en la evaluación de la eficacia de estos parches en el tratamiento del dolor neuropático periférico de pacientes con cáncer, es decir, del dolor causado por tratamientos anticancerígenos comunes, como la radiación, la quimioterapia y la cirugía (Morisson, 2022), y también como terapia médica para el tratamiento del dolor en el pecho causado por isquemia miocárdica (Menzies, 2021).

Otro ejemplo de desarrollos clínicos en relación con los ajís son los estudios que se adelantan referentes a la ingesta de carotenoides o la inclusión de estos en la alimentación, los cuales, gracias a sus propiedades antioxidantes, y en especial al β -caroteno como precursor de la vitamina A, poseen un rol importante en la dieta hu-



mana. Es el caso del estudio clínico desarrollado por Moran (2024), en el que se pretende comprender el efecto de la ingesta de carotenoides en la nutrición durante el embarazo y cómo puede mejorar la comprensión de las necesidades nutricionales de las mujeres embarazadas y sus bebés, a través de mediciones de carotenoides en los ojos, la piel y la sangre en diferentes etapas del embarazo, debido a que estos pueden combatir la inflamación e incluso pueden beneficiar la memoria y la capacidad de pensamiento.

La búsqueda de alimentos de calidad y con valor nutricional se ha convertido en prioridad en la era moderna, en la cual la seguridad alimentaria y la calidad intrínseca son requisitos fundamentales para su comercialización. Comprender las interacciones entre la composición química de los alimentos y sus propiedades funcionales es esencial para garantizar su calidad y utilidad. En este sentido, los ajís representan un caso de estudio interesante, pues su diversidad química y sus beneficios a la salud ofrecen oportunidades en diferentes industrias. En este contexto, los estudios fisicoquímicos proporcionan información valiosa sobre las características de estos frutos y su impacto comercial. Así, al entender sus características fisicoquímicas y su relación con la calidad es posible apreciar cómo la ciencia alimentaria ofrece una comprensión más profunda de los alimentos, así como herramientas para seleccionar los frutos con mayor potencial comercial.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Diversidad fisicoquímica

Se ha observado que algunos ajís tienen un sabor más fresco que otros. Esto se explica a través de la ciencia detrás de los alimentos, específicamente, mediante las características fisicoquímicas, las cuales permiten medir, en estos y en otros alimentos, su nivel de calidad y deseabilidad, que se establece según determinados rasgos:

» **Humedad:** indica la cantidad de agua presente en los frutos, siendo el opuesto directo de la materia seca.

» **Sólidos disueltos:** también conocidos como grados Brix, están relacionados con la dulzura de los frutos y abarcan una amplia gama de compuestos, incluyendo azúcares, flavonoides o ácidos que afectan el sabor del ají.

» **pH:** proporciona información sobre la seguridad alimentaria del ají y también afecta la percepción del sabor en la boca.

» **Color:** para la colorimetría, la percepción del color puede ofrecer información sobre algunos compuestos presentes en el fruto y sobre su grado de madurez.

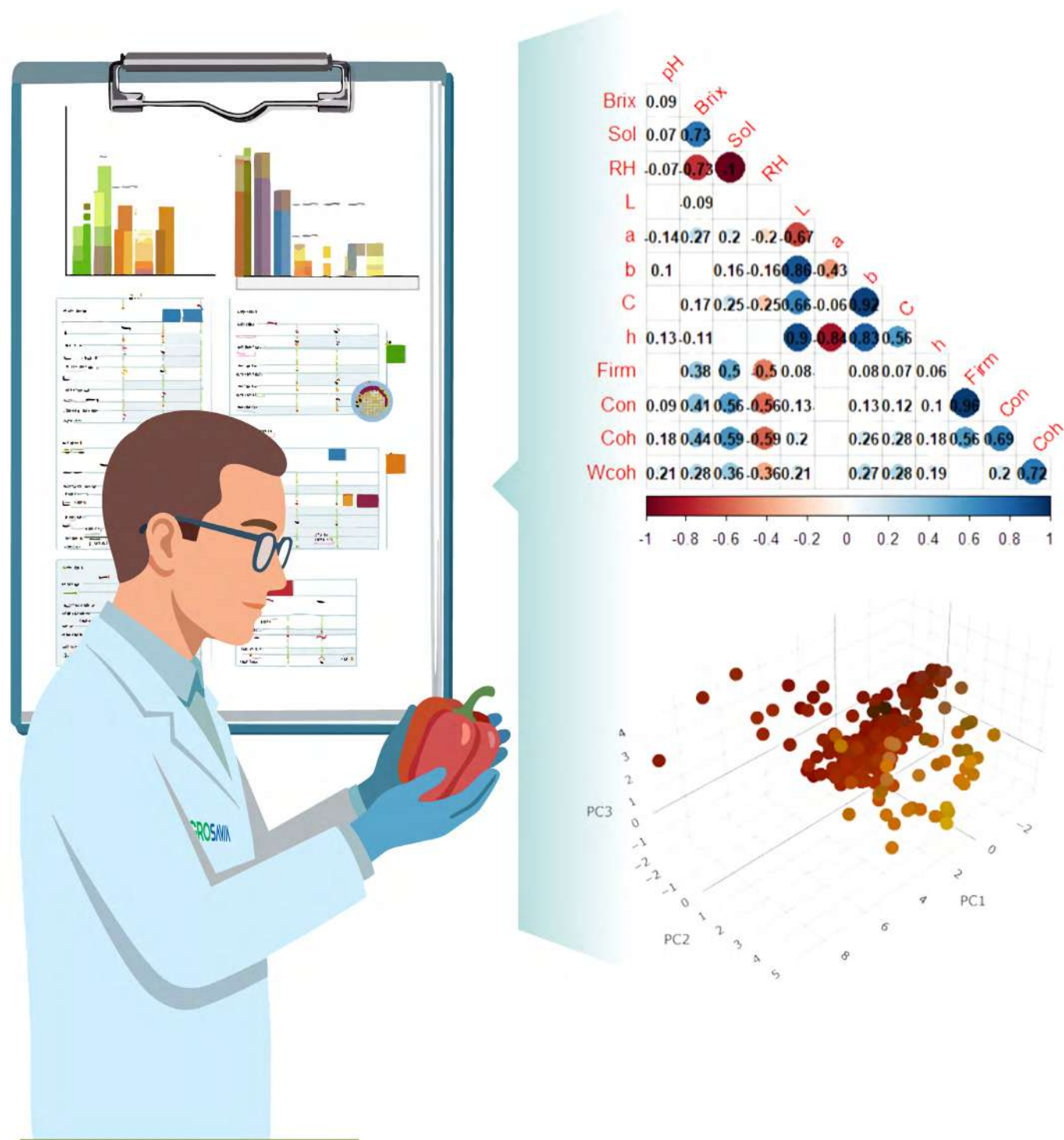
» **Textura:** es la sensación táctil que se obtiene al comer el producto, que puede variar entre lo suave y lo jugoso, o entre lo duro y lo fibroso, y que está asociada a las moléculas presentes en aquel.

Al comprender estas características, es posible evaluar la calidad de los frutos y elegir aquellos con mayor impacto comercial. Para entender mejor estos parámetros fisicoquímicos se llevan a cabo estudios en diversos lugares del mundo, donde se ofrecen los productos en diferentes presentaciones, como deshidratados, en pasta o en polvo, y se evalúa cómo esto afecta la calidad durante su procesamiento y almacenamiento, lo que permite tener un control en su comercialización (Joshi et al., 2017, Mi et al., 2023, Woldemariam et al., 2021).

Por ende, velando por la seguridad alimentaria, y con el objetivo de encontrar frutos de ají con características diferenciales que permitan incursionar en el mercado con competencias específicas de agronomía, se ha llevado a cabo un estudio que involucró todos los genotipos del género *Capsicum* bajo custodia de AGROSAVIA, y se estableció un umbral del peso del fruto mayor a un gramo para considerarlo apto agroindustrialmente.

Se caracterizaron 245 pastas de ají de acuerdo con el pH, los sólidos solubles, la materia seca, la firmeza, la consistencia, la cohesión entendida como la fuerza de los enlaces internos que mantienen la integridad del alimento y el trabajo de cohesión que define área bajo la curva del segundo ciclo de compresión, cuantificando la energía necesaria para vencer dichas fuerzas internas. También se consideraron parámetros de colorimetría triestímulo que permitieron obtener un pseudocolor para cada una. A partir de estas, se realizó una correlación de Spearman al 5 % de significancia, con la que se descartaron variables que tuvieran una correlación dependiente. A partir de las variables resultantes se realizó un análisis de agrupamiento por el método *K-means*, por el cual se encontró la presencia de 12 tipos de ají con características fisicoquímicamente homogéneas y diferencias significativas entre ellos. Este flujo de proceso estadístico puede verse en la figura 7.1.





	pH	Brix	Sol	RH	L	a	b	C	h	Firm	Con	Coh	Wcoh
Brix	0.09												
Sol	0.07	0.73											
RH	-0.07	0.73											
L	-0.09												
a	-0.14	0.27	0.2	-0.2	0.67								
b	0.1	0.16	-0.16	0.89	0.43								
C	0.17	0.25	-0.25	0.66	0.06	0.92							
h	0.13	0.11		0.9	0.84	0.83	0.56						
Firm	0.38	0.5	-0.5	0.08	0.08	0.07	0.06						
Con	0.09	0.41	0.56	-0.56	0.13	0.12	0.1	0.96					
Coh	0.18	0.44	0.59	-0.59	0.2	0.26	0.28	0.18	0.56	0.69			
Wcoh	0.21	0.28	0.36	-0.36	0.21	0.27	0.28	0.19	0.2	0.72			

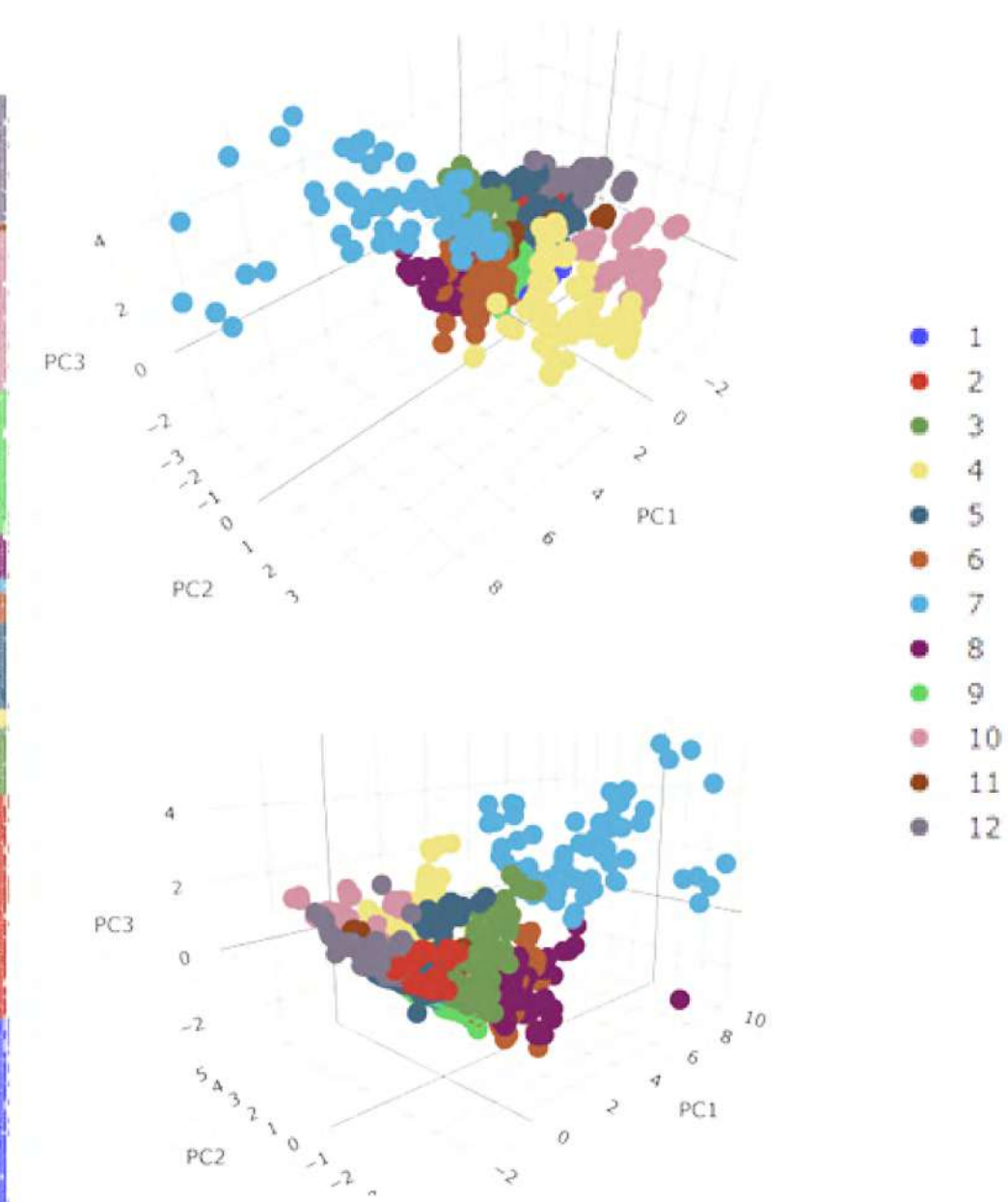
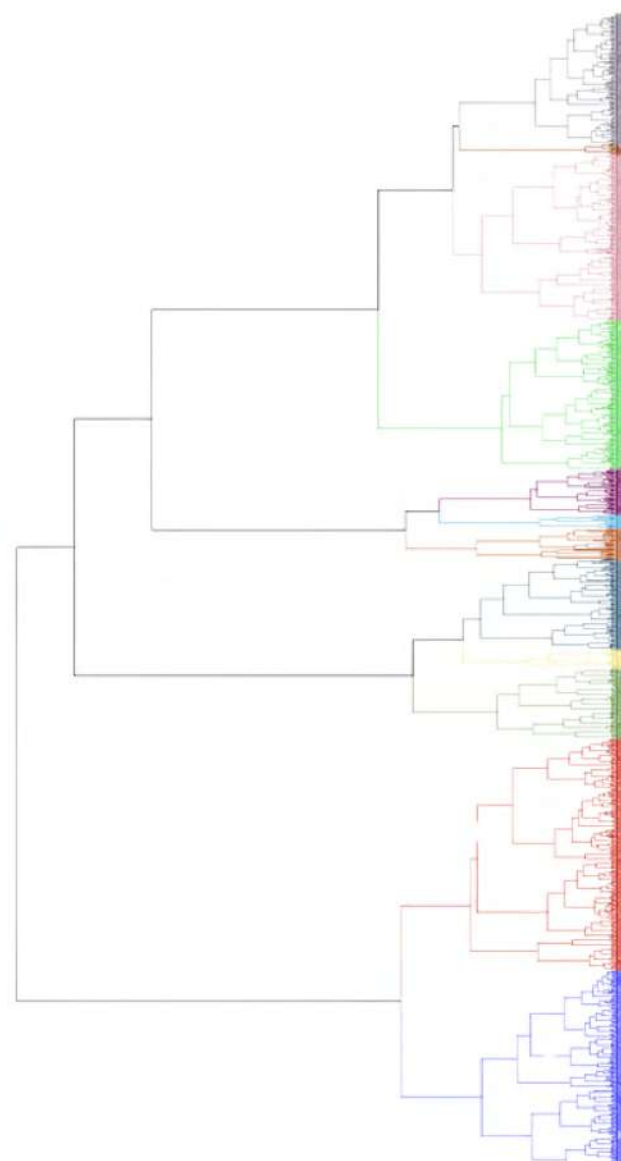


Figura 7.1. Resultados del análisis estadístico para la identificación del número de tipos de ají.
Fuente: Elaboración propia

A partir de estos 12 tipos, se seleccionaron aleatoriamente múltiples frutos de estos grupos para comprender su contenido de carotenoides y capsaicinoides, los cuales están directamente relacio-

nados con el potencial antioxidante y la pungencia, respectivamente. En las figuras 7.2 a 7.13 se puede observar el comportamiento de estos grupos y el pseudocolor que los identifica.

Grupo 1

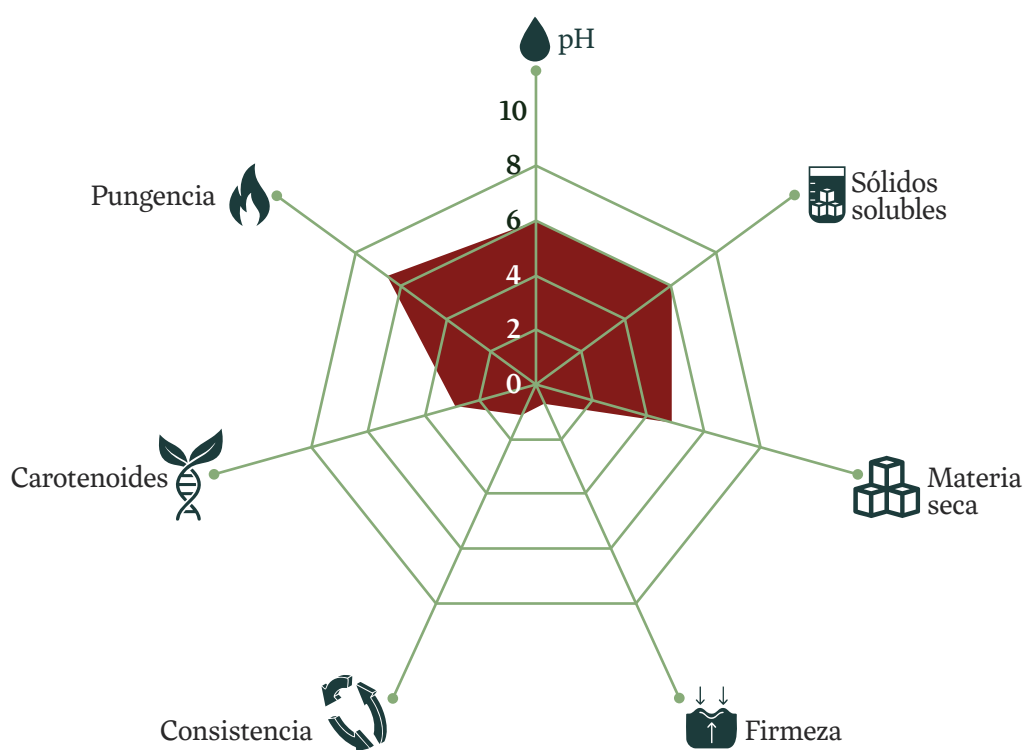


Figura 7.2. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 1.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 2

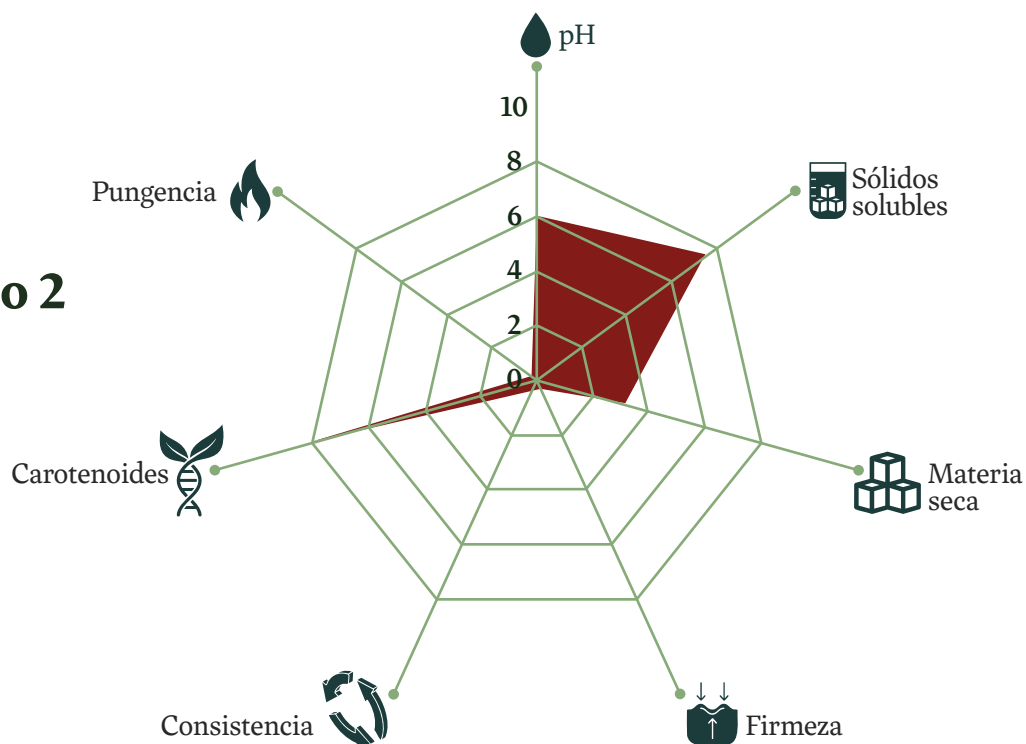


Figura 7.3. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 2.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 3

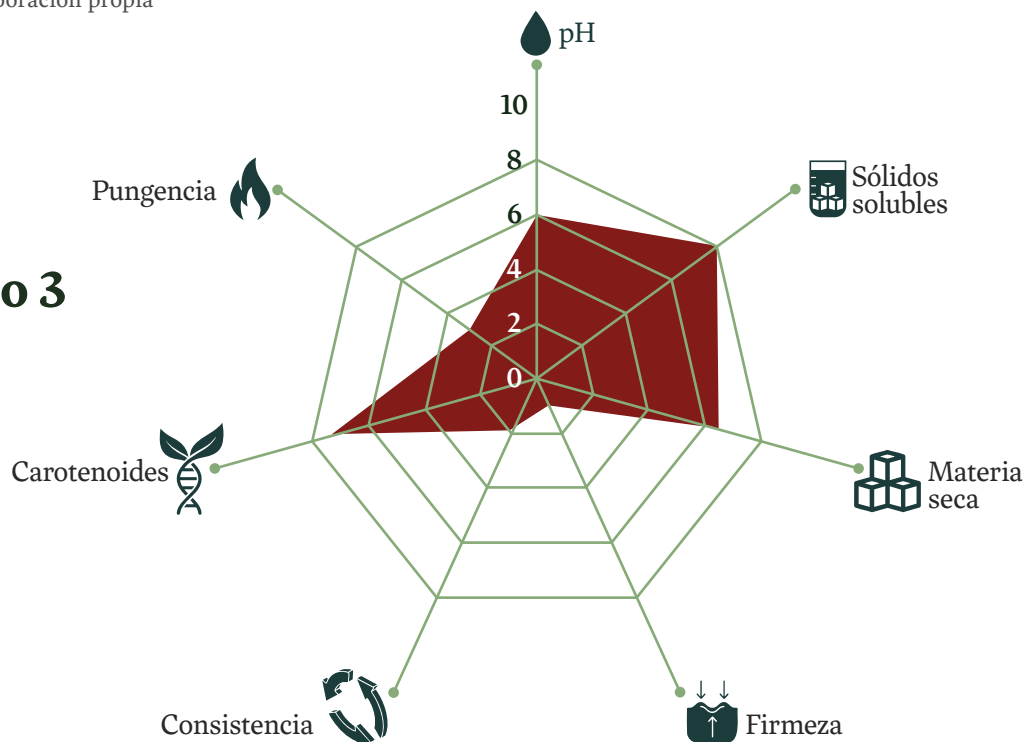


Figura 7.4. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 3.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 4

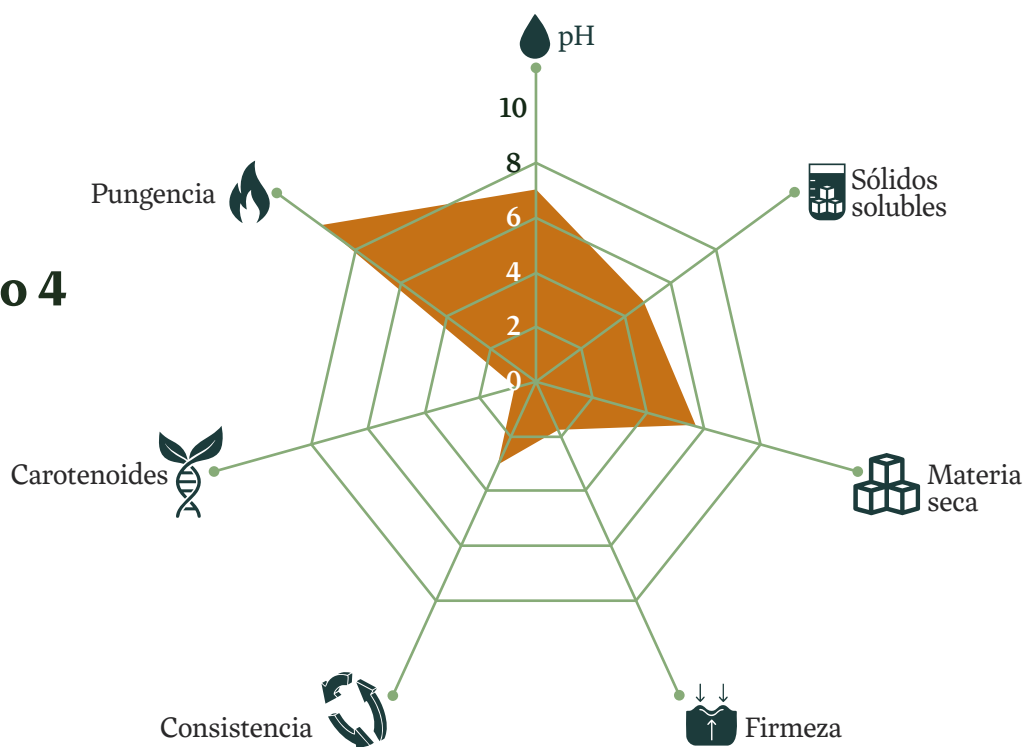


Figura 7.5. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 4.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 5

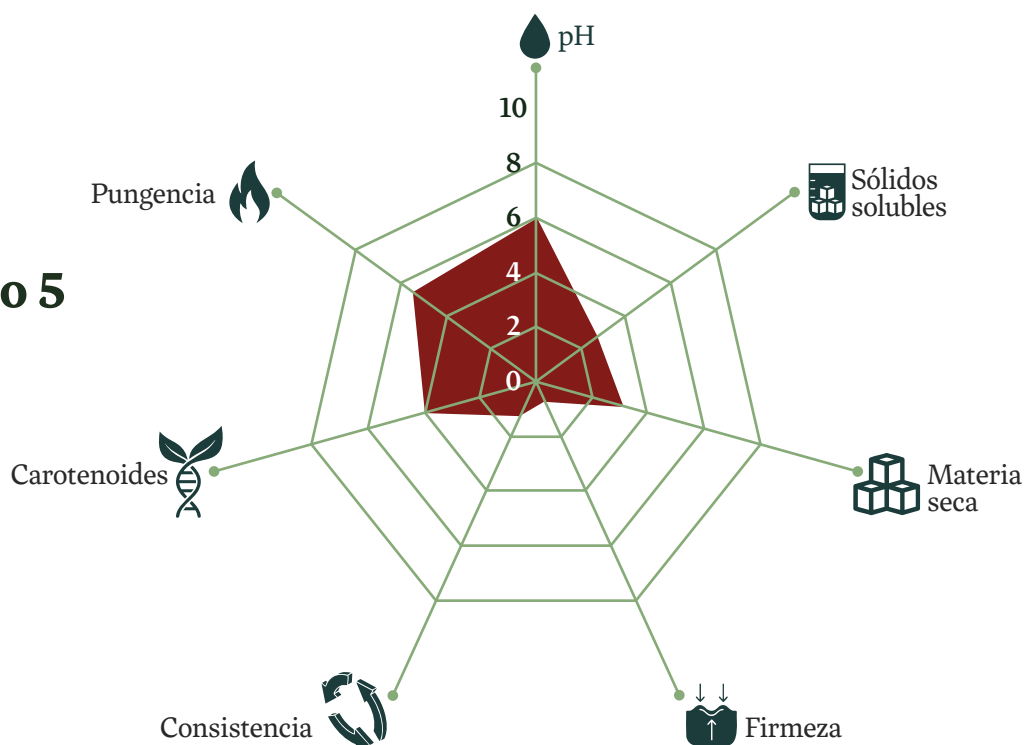


Figura 7.6. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 5.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 6

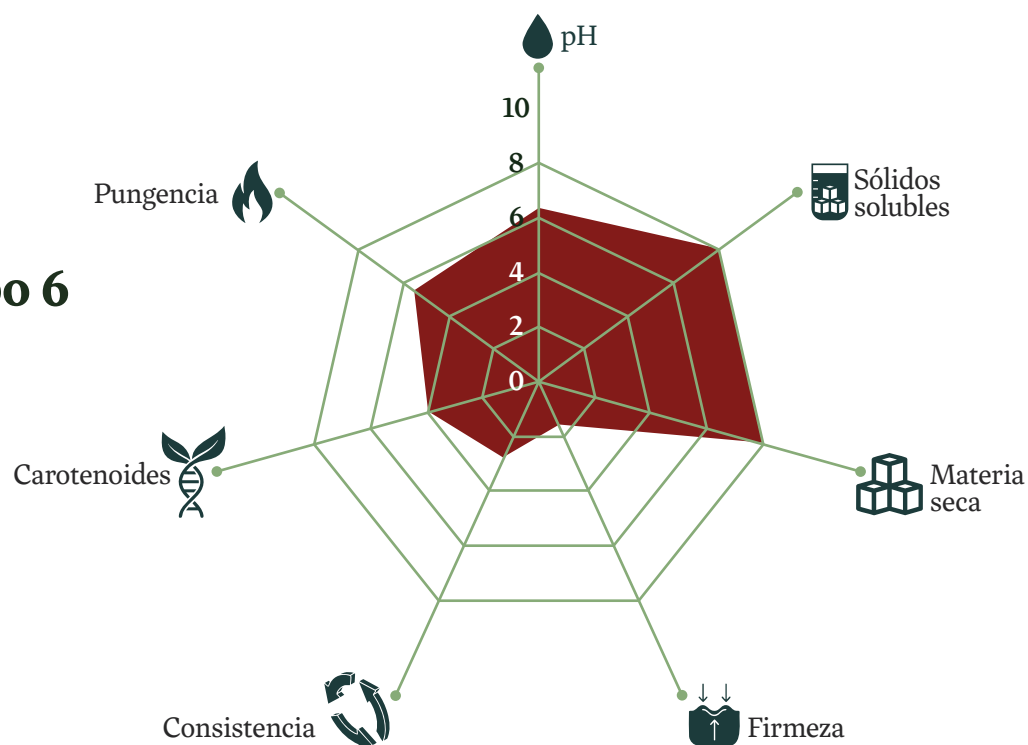


Figura 7.7. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 6.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 7

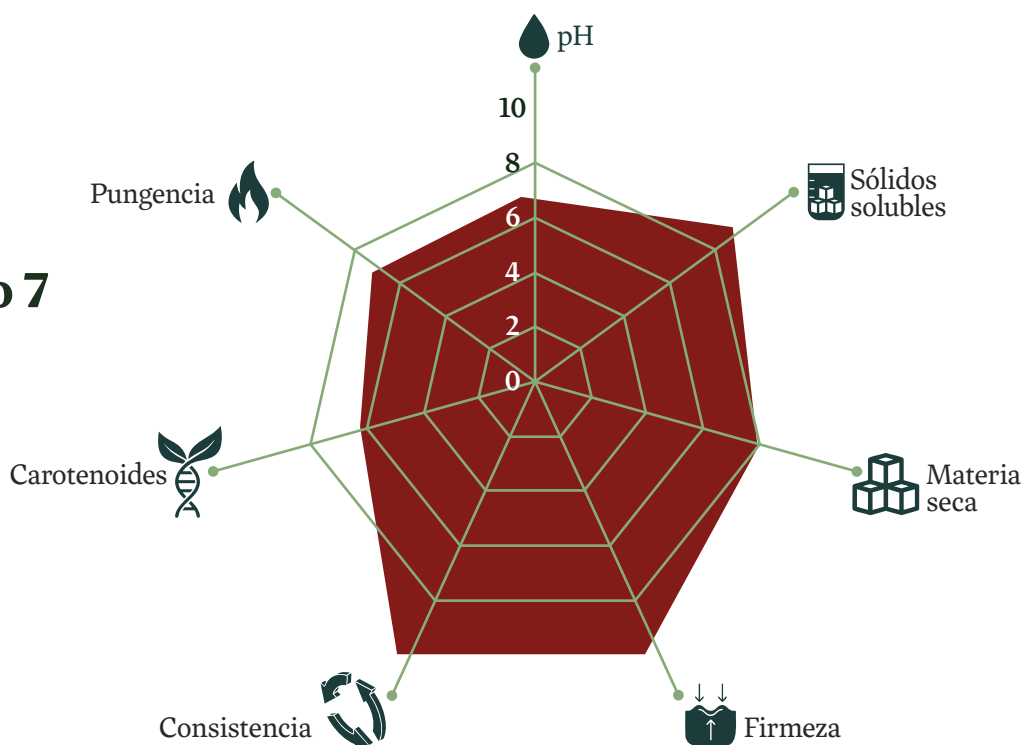


Figura 7.8. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 7.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 8

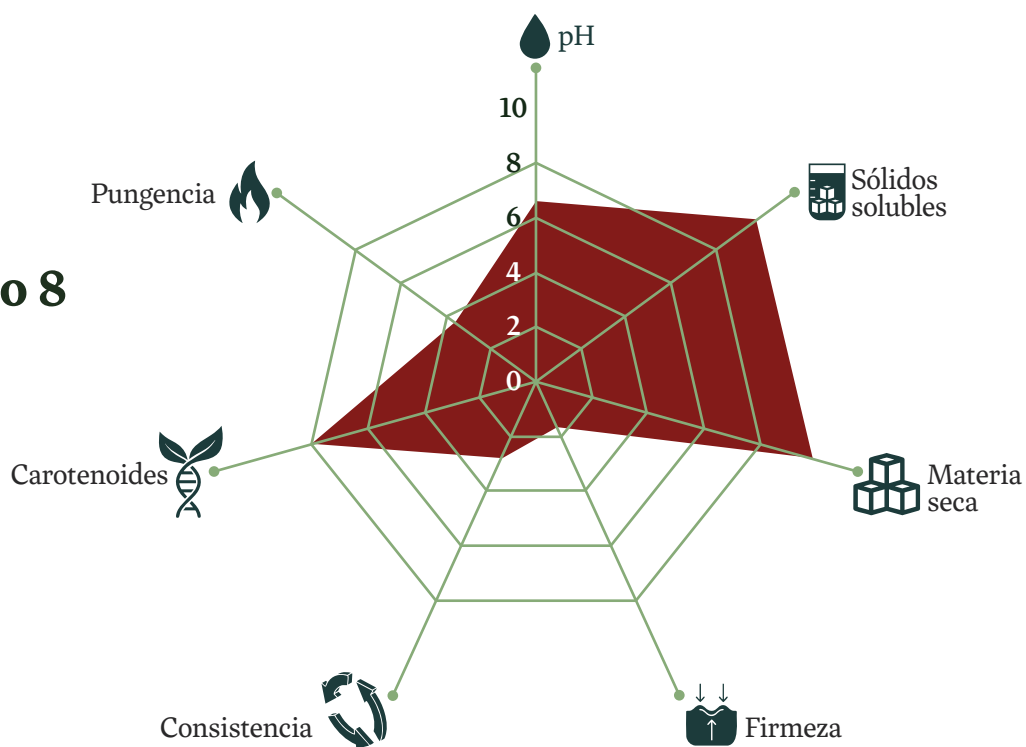


Figura 7.9. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 8.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 9

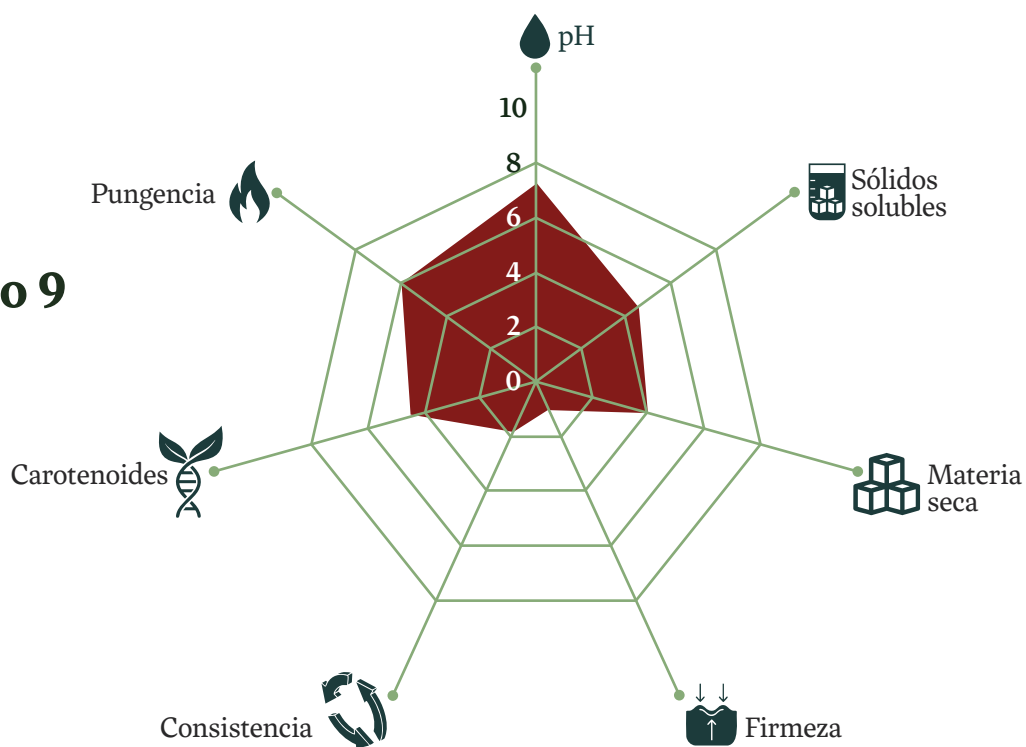


Figura 7.10. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 9.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 10

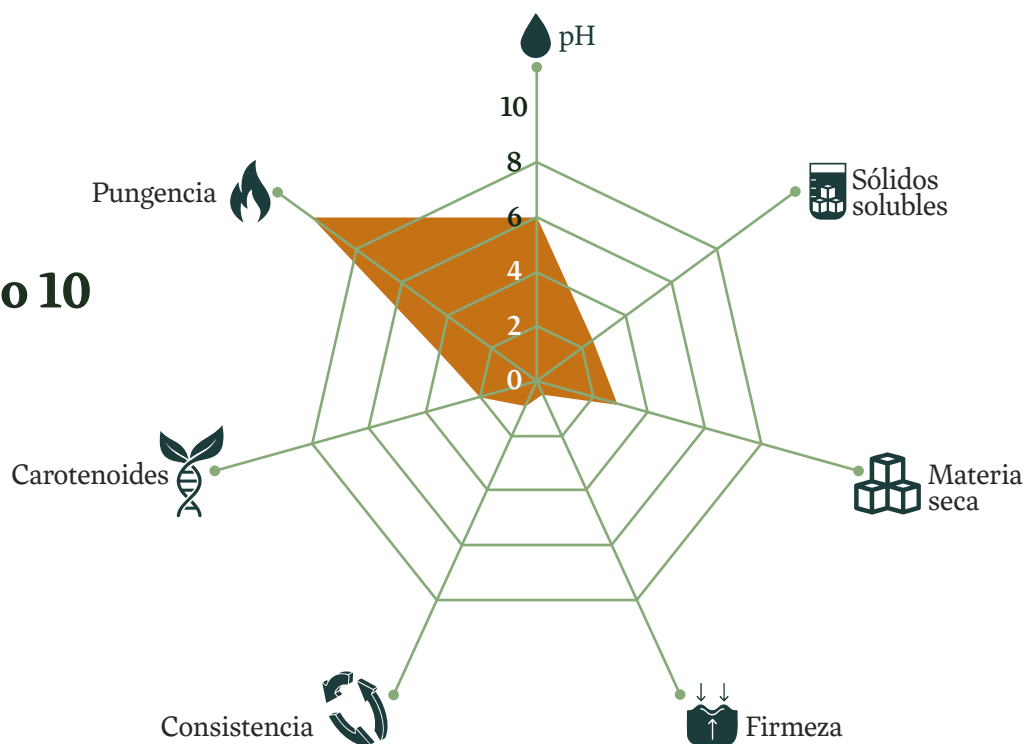


Figura 7.11. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 10.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 11

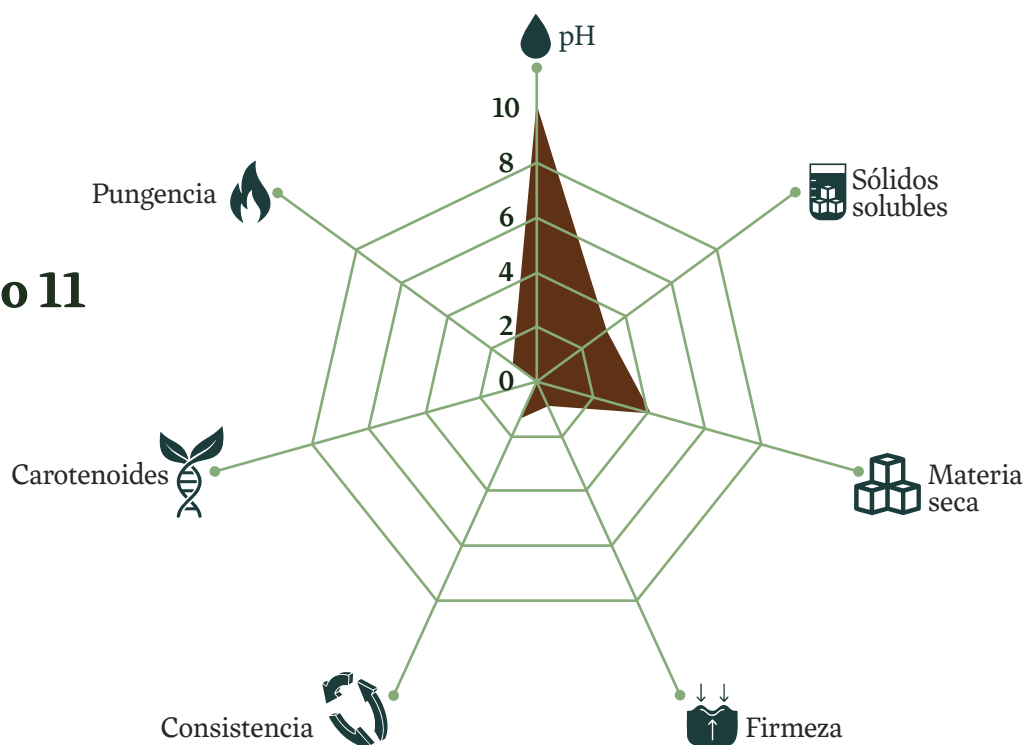


Figura 7.12. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 11.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 12

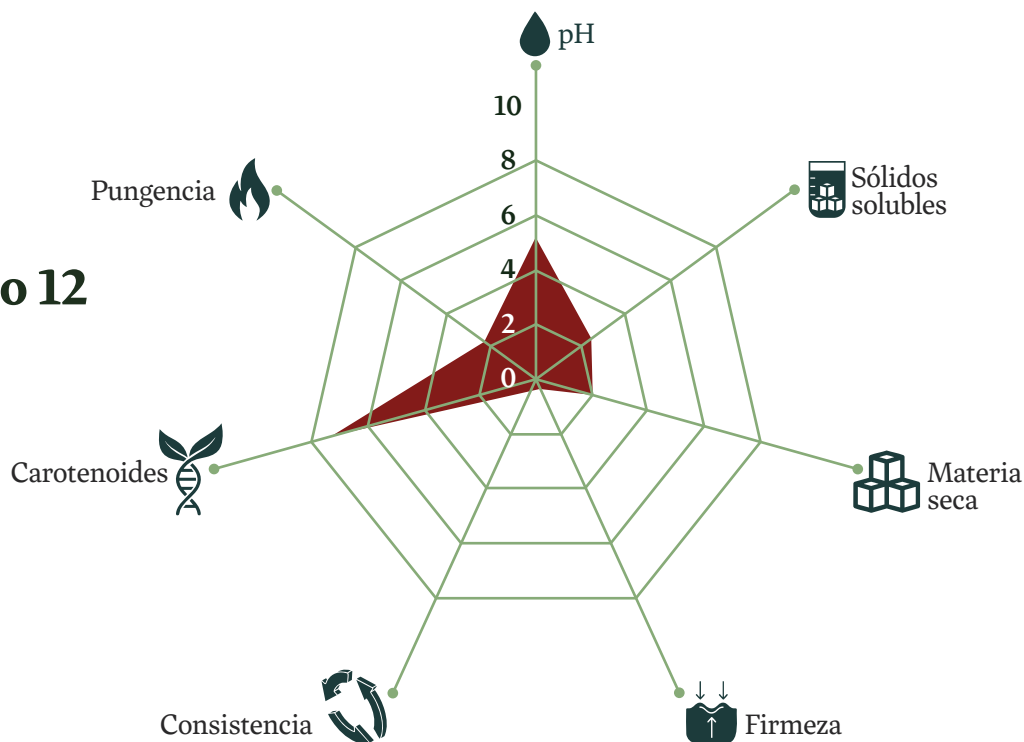


Figura 7.13. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 12.

Fuente: Elaboración propia

Para interpretar estos resultados se debe comprender en profundidad qué representa y cómo afecta cada característica fisicoquímica la calidad del fruto. Se iniciará por entender el pH (o acidez), que es una escala que va desde 0 hasta 14 y mide la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución. En otros términos, un pH de 0 indica una alta acidez, mientras que un pH de 14 indica alta alcalinidad; un pH de 7 es considerado neutro, como es el caso del agua. En lo que se refiere a los frutos de ají, su pH se encuentra en un rango de entre 4,5 y 5,5, lo que los clasifica como ligeramente ácidos. Por lo tanto, los grupos que muestran una tenden-

cia alta hacia 10 tienen un pH menos ácido (5,2), como el grupo 11 (figura 7.12), mientras que aquellos que muestran una medida cercana a “0” son más ácidos (4,5), como el grupo 12 (figura 7.13).

Según Bello y Palacios (2013), el pH juega un papel importante en el procesamiento de los alimentos, con efectos que incluyen la desnaturalización de proteínas; la gelificación de compuestos; actividades enzimáticas asociadas a las proteínas presentes; crecimiento e inactivación de microorganismos, y reacciones químicas, como la de Maillard. En el caso de los componentes bioactivos, como

los carotenoides y las vitaminas, se ha demostrado que presentan una mayor inestabilidad química ante una prolongada o alta presencia de ácidos, lo que genera reacciones de protonación, isomerización y degradación (Bello et al., 2013).

Un pH bajo puede deberse a la alta concentración de ácidos orgánicos, que tiene incidencia directa en el sabor y el aroma del fruto. En ajís se han reportado el éster butílico del ácido butanoico, el éster hexílico del ácido acético, el salicilato de metilo, entre otros (Mi et al., 2023), que son característicos de notas frutales. Sin embargo, un pH bajo puede ser benéfico, dependiendo del propósito final de los frutos. Según un estudio realizado por Liu et al. (2023), un pH bajo inhibe la proliferación de ciertos microorganismos, lo que permite extender la vida útil de los alimentos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de pH entre las distintas clasificaciones fisicoquímicas (análisis de varianza [Anova, por su sigla en inglés] $p < 0,001$), lo cual confirma la existencia de grupos diferenciables según su grado de acidez. En general, los materiales pertenecientes a la clasificación 1 presentaron los valores más bajos de pH ($4,88 \pm 0,16$), mientras que los de la clasificación 4 mostraron los valores más altos ($5,02 \pm 0,15$), seguidos por las clasificaciones 11, 10 y 9, que conforman un grupo estadísticamente homogéneo según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Estas diferencias, aunque sutiles, son relevantes estadísticamente. Desde una perspectiva sensorial y tecnológica: los frutos con pH más bajo tienden a expresar perfiles gustativos más ácidos y frescos, mientras que los materiales con pH más elevado pueden percibirse como más dulces o balanceados, lo cual influye directamente en la aceptación del consumidor (Castaño et al., 2025).

Del mismo modo, el pH puede activar las enzimas encargadas de la degradación de la pectina y, de esta manera, modificar la textura que se percibe del fruto. Adicionalmente, algunos estudios han demostrado que el pH tiene un efecto considerable en la percepción de sabores dulces y ácidos (Bello et al., 2013; Baccichet et al., 2021). Es por esto por lo que el pH es un indicador de calidad asociado tanto al producto como al proceso productivo, siendo imperativa su comprensión y optimización, con el fin de alcanzar las características organolépticas demandadas y así garantizar la seguridad alimentaria del consumidor final.

Para el caso de los sólidos solubles, es una medida que proporciona información sobre la cantidad de compuestos disueltos en el agua del fruto, incluyendo principalmente azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, carotenoides, vitaminas, algunos alcaloides y flavonoides. Sin embargo, es común encontrar en frutas y hortalizas que esta medida tiene una alta correlación con los azúcares. Para los frutos de ají estudiados, se encontró una me-



dida promedio para sólidos solubles entre 5,3 y 12,9 grados Brix, lo que corresponde a 0 y 10, respectivamente. Según la figura 9, el grupo 8 tiene la población con mayor valor para este atributo, a diferencia del grupo 12 (figura 7.13), que tiene el menor.

Aunque el ají ha sido juiciosamente estudiado, principalmente en sus características de contenido de capsaicinoides, carotenoides y vitaminas, aún hacen falta estudios que logren mapear más características de interés agroindustrial. Uno de los estudios que logra cuantificar estas características y tiene en cuenta un perfil más detallado en la composición de los frutos fue realizado por Kim et al. (2019) en Corea del Sur, donde lograron caracterizar 12 cultivos de ají *Capsicum annuum* L. bajo múltiples variables bromatológicas. Así, encontraron que la cantidad de azúcares libres estaba altamente afectada por el genotipo del cultivo,

las condiciones del suelo y la maduración del fruto, siendo los dos últimos rasgos los más beneficiados con cultivos a mayores temperaturas. También se tuvo en cuenta el perfil de aminoácidos y el de ácidos grasos, variables relevantes dado que el ají es una fuente considerable de aminoácidos como: ácido glutámico y prolina, y ácidos grasos como ácido palmítico, linoleico y linolénico, siendo estos entre el 10 y 5 %, y 19, 40 y 15 % de la materia seca, perteneciente a estos dos nutrientes respectivamente.

En general, los frutos de ají cuentan con un 10 % de proteína con respecto a la materia seca. Esta se encuentra parcialmente soluble, lo que constituye su perfil de aminoácidos, el cual puede variar según la especie de *Capsicum* spp. Estos aminoácidos tienen un efecto importante en la percepción sensorial del producto, siendo responsables directos del sabor amargo (tirosina, leucina, isoleucina, valina, fenila-



Foto: Estreban Castaño Llanos



lanina, lisina, histidina y arginina), el sabor dulce (treonina, serina, glicina, alanina y metionina) y el sabor umami (ácido glutámico y ácido aspártico). Este último, considerado el sabor “delicioso”, es uno de los elementos que más contribuye a la percepción sensorial característica del ají; sin embargo, por el contenido de proteína que contiene puede pasar desapercibido (Liu et al., 2023).

Los sólidos solubles también son una medida que se emplea comúnmente para determinar el tiempo de cosecha de los frutos; pueden asociarse a concentraciones del 80 % de azúcares disueltos en el jugo del fruto, aunque estas medidas varían principalmente por el genotipo del cultivo y por factores abióticos. El aumento en la acumulación de azúcares disueltos se debe principalmente al transporte de nutrientes por la savia y a la descomposición de las reservas de almidón dentro del fruto, lo que coinci-

de con el aumento en el grado de madurez fisiológica, que alcanza su mayor valor cuando el fruto está maduro. Aunque está ampliamente documentada y es bastante asequible, la determinación de madurez asociada a la concentración de sólidos solubles mediante la refractometría se considera una técnica destructiva (Villaseñor-Aguilar et al., 2020).

La materia seca, también conocida como sólidos totales, es la proporción del fruto que queda después de retirar toda el agua presente en él, razón por la cual es el directo inverso de la humedad, ya que da cuenta de los componentes que no son agua. Esta medida abarca un amplio espectro de tipos de compuestos, en el que se encuentran principalmente carbohidratos, proteínas, grasas, minerales, vitaminas, compuestos fenólicos y bioactivos. Para los frutos de ají estudiados se tiene una medida media de 7,8 a 20,5 %, lo que corresponde a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13.

Para industrias como la alimentaria o la agrícola, la materia seca permite entender a grandes rasgos la calidad nutricional de los frutos: entre mayor sea su valor, mayor será su potencial nutricional. Sin embargo, este valor juega un papel importante al estar altamente correlacionado con la textura, el sabor, el aroma, la vida útil y la seguridad alimentaria de los productos. Otros estudios mapean esta característica como primer acercamiento, para luego considerar aspectos nutricionales, como las proporciones de la materia seca en relación con la cantidad de ácidos grasos, fibras solubles e insolubles, proteínas, carbohidratos, entre otros elementos (Kim et al., 2019; Pino et al., 2007; Hernández et al., 2021; Solís-Marroquín et al., 2017).

La cantidad de agua presente en los frutos puede incidir de manera perjudicial en la correcta preservación de los alimentos. El estudio realizado por Aşkin Uzel (2017) para pastas de ají demuestra que hubo una mayor cantidad de microorganismos proliferantes que afectan de manera negativa la calidad de la pasta. Para controlar el crecimiento de microorganismos hubo que añadir múltiples preservantes, como benzoato de sodio o sorbato de potasio, los cuales demostraron tener una mejora significativa en la percepción tanto del color como del aroma y el sabor de la pasta. En alimentos como el polvo de ají, la susceptibilidad en contaminación es mucho menor, dado que la proporción de agua presente, aproximadamente $< 10\%$, reduce la actividad de microorganismos y enzimas, responsables del dete-

rioro del producto (Kim et al., 2019; Woldemariam et al., 2021). Esto es importante ya que al reducir el riesgo de contaminación se asegura que aquel sea apto para el consumo humano, con lo que se protege la salud de los consumidores finales.

Otra característica de especial interés es la textura. Esta se considera un conjunto de propiedades que describen cómo el alimento se comporta y se percibe al tacto. En este estudio se tuvieron en cuenta características como la firmeza, la consistencia, la cohesión y el trabajo de cohesión; sin embargo, solo se hará referencia a la firmeza y a la consistencia.

La firmeza es la resistencia que ejerce el alimento cuando se le aplica una presión al manipularlo, es decir, qué tan compacto o sólido resulta. En este caso, habría que imaginar la resistencia que haría la pasta de ají al ser extendida con un cuchillo. Mientras menos firmeza posea, se comportará más como un líquido acuoso. Por otra parte, la consistencia se refiere a la uniformidad y homogeneidad del alimento; es una fuerza manifestada en términos de qué tan unidos se mantienen sus componentes. Aquí ha de imagine la pasta de ají con uniformidad, sin percepción de grumos o separación de fases, entre mayor sea su valor. Para las pastas de ají estudiadas, se encontraron frutos con firmezas de 30 y 1.970 g, y consistencias de 93 g/s y 3.175 g/s, respectivamente, para 0 y 10, en las figuras 7.1 a 7.13. Las medidas de “g” y “g/s” corresponden al sistema internacional de unidades para gramos fuerza y gramos fuerza por segundo, respectivamente.

La textura está altamente relacionada a la composición química del alimento, por ejemplo, se han identificado algunos polímeros y polisacáridos que tienen incidencia directa en la firmeza y consistencia de los frutos. Algunos de estos biopolímeros son la cutina y el cután, que están asociados a la cutícula de la fruta. Su función estructural les permite hacer más rígida la pared celular, con lo que una mayor proporción de estos indica un grado de firmeza mayor (Shechter et al., 2010). Sin embargo, al ser completamente insolubles y tener una alta resistencia a la degradación mecánica, no aportan a propiedades de la textura, como la consistencia (Tafolla-Arellano et al., 2013). Por otra parte, la pectina es el polisacárido más incidente en la textura; su capacidad de solubilizarse en agua le permite formar agregados con polímeros y poseer propiedades reológicas elásticas y viscoelásticas (Konishi et al., 2022 y Hernández-Pérez et al., 2020), lo que la convierte en un elemento clave en la consistencia de las pastas.

También es importante tener presente el color de los frutos, que está relacionado directamente con los carotenoides. Los carotenoides

son pigmentos lipofílicos con alta capacidad antioxidante y algunos de ellos son precursores de vitamina A. Los más representativos para el género *Capsicum* son capsantina, capsantina-3,6-epóxido, capsorrubina, β -caroteno, β -criptoxantina, luteína, zeaxantina, antheraxantina y violaxantina (Hassan et al., 2019). Dependiendo del grado de madurez y del cultivo, los frutos pueden presentar diferentes coloraciones, como verde, marrón, amarillo, naranja y rojo, cada una de ellas con una proporción diferente de cada carotenoide. En este estudio se realizó la valoración total de carotenoides, por lo que no fue posible cuantificar la proporción de cada uno. Sin embargo, se ha reportado en diferentes estudios cómo es la distribución de estos de acuerdo con la coloración del fruto (figura 7.14). Para los frutos de ají estudiados, se encontró una media para los carotenoides totales entre 0,15 y 18,47 mg/g, que corresponde a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13. El grupo 2 (figura 7.3) es el que contiene mayor promedio y el grupo 11 (figura 7.12), el de menor contenido medio de esta característica.



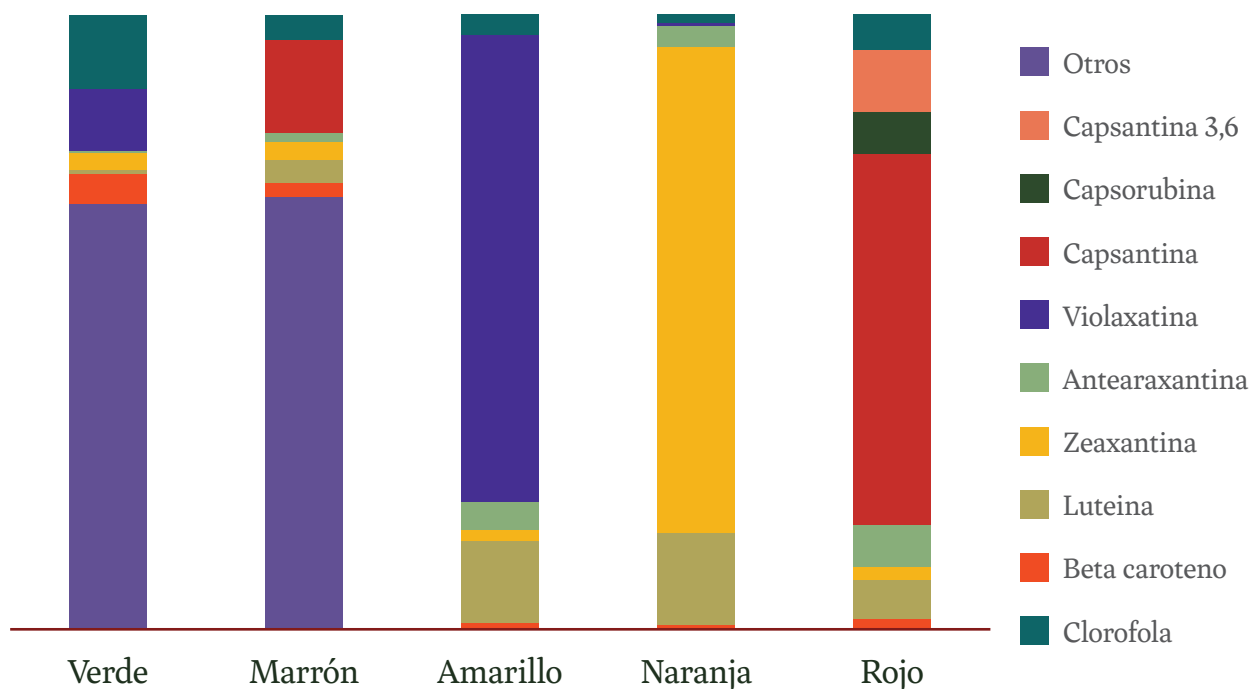


Figura 7.14. Distribución de carotenoides según la coloración del fruto.

Fuente: Elaboración propia con base en Hassan et al. (2019)

La coloración rojiza está dada mayoritariamente por capsantina, capsorubina y criptoxantina, mientras que la coloración amarilla-anaranjada se debe al β -caroteno, zeaxantina, violaxantina y β -criptoxantina (Hernández-Pérez et al., 2020). La combinación de estos con la clorofila, que es de tonalidad verde, da como resultado un color característico de algunos frutos de *Capsicum* marrones. Sin embargo, la concentración de estos carotenoides depende mayoritariamente del estado de madurez del fruto. Existen modelos predictivos del estado de cosecha de estos frutos mediante la

coloración que poseen; a diferencia de la técnica de los grados Brix, estos no son destructivos, lo que no implica una pérdida en los rendimientos de la productividad agrícola (Villaseñor-Aguilar et al., 2020). Adicionalmente, estos compuestos tienen un alto potencial antioxidante y permiten conservar la coloración ante factores oxidantes, como la luz y el oxígeno. Se ha demostrado también, en múltiples estudios, que el consumo de estos reduce el estrés oxidativo y ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares (Hassan et al., 2019; Hernández-Pérez et al., 2020).

Finalmente, la pungencia de los ajís es su característica más representativa. Relacionado con este tema, aunque se postula que las plantas del género *Capsicum* desarrollaron estas moléculas como una estrategia evolutiva de defensa frente a depredadores y patógenos —tales como roedores y hongos (Perry et al., 2007; Tewksbury & Gary, 2001)—, se ha evidenciado que el consumo de capsaicinoides estimula la liberación de endorfinas y dopamina. Este proceso neuroquímico mitiga la percepción del dolor y promueve sensaciones de placer o euforia en el ser humano (Pasierski & Szulczyk, 2022). Es por ello por lo que a muchas personas les gusta consumir ají, sin embargo, la sensación de bienestar puede variar de persona a persona y depende de factores individuales, como la tolerancia al picante y las preferencias personales. Para los frutos de ají estudiados, se encontró una media para los capsaicinoides totales entre 0 y 1.260 ppm, que corresponden a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13.

Entender los capsaicinoides totales proporciona información sobre la intensidad del picor de los ajís. La escala de Scoville (1912) ha perdurado como una herramienta de clasificación de los fru-

tos según el grado de picante. La escala define 5 niveles: no pungente (0-700 SHU), medianamente pungente (700-3.000 SHU), moderadamente pungente (3.000-25.000 SHU), altamente pungente (25.000-70.000 SHU) y extremadamente pungente (> 80.000 SHU). Para convertir la concentración de capsaicinoides en ppm o $\mu\text{g/g}$ a unidades Scoville SHU, simplemente se multiplica el valor por 15 (Penagos-Calvete, et al., 2019; Hernández—Pérez, et al., 2020). Así, se tienen frutos que van desde ser libres de picante hasta extremadamente picantes, con valores superiores a 100.000 SHU.

Tras explorar en detalle las características fisicoquímicas que influyen en la calidad del fruto, queda claro que aún queda mucho por entender. Sin embargo, estos resultados ofrecen una visión más profunda de la complejidad del género *Capsicum* y abren la puerta a un vasto campo de estudio. Comprender a fondo cómo estas características afectan la calidad del fruto permite apreciar mejor su diversidad y potencial, lo que traza un camino para futuras aplicaciones y usos de este germoplasma. Para finalizar, las tabla 7.1 y 7.2 resumen las variaciones encontradas en los distintos tipos de ají.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Tabla 7.1. Resumen de características fisicoquímicas para los 12 grupos fisicoquímicamente homogéneos de ají del germoplasma vegetal de AGROSAVIA

Clúster	pH	Brix (°)	Sólidos (%)	Firmeza (g)	Consistencia (g/s)	Carotenoides (mg/g)	Capsaicinoides (ppm)	Clasificación Scoville	Pseudocolor	Código HEX
1	4,89	9,90	13,98	139,99	410,54	5,12	818,94	Moderado		#A22A00
2	4,92	10,90	12,03	74,81	213,15	18,47	46,04	No pungente		#821400
3	4,93	11,10	16,02	214,14	609,78	14,00	317,99	Mediano		#891A00
4	4,97	8,90	15,07	365,44	1.064,45	1,32	1.161,32	Moderado		#C37200
5	4,90	7,40	11,85	149,54	439,84	7,40	693,97	Moderado		#8B1D00
6	4,94	11,10	18,04	329,62	967,87	7,57	720,16	Moderado		#972500
7	4,97	12,30	18,55	1.969,18	3.175,37	10,53	806,83	Moderado		#902200
8	4,95	12,90	20,51	338,36	942,29	14,64	449,08	Moderado		#8F1B00
9	4,98	8,70	12,48	212,89	653,29	8,46	735,32	Moderado		#921F00
10	4,93	7,20	11,58	133,80	383,53	3,32	1.260,36	Moderado		#B66F00
11	5,18	7,60	12,60	181,77	521,37	0,16	131,90	Mediano		#4E2400
12	4,87	7,00	10,21	58,50	171,56	13,24	278,13	Mediano		#831C00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.2. Desviación estándar de las características fisicoquímicas para los 12 grupos fisicoquímicamente homogéneos de ají del germoplasma vegetal de AGROSAVIA

Clúster	pH	Brix (°)	Sólidos (%)	Firmeza (g)	Consistencia (g/s)	Carotenoides (mg/g)	Capsaicinoides (ppm)
1	0,16	1,02	2,00	32,18	79,06	2,34	1.051,99
2	0,18	1,20	1,57	79,41	142,30	8,64	97,10
3	0,15	1,28	1,86	305,00	518,01	9,32	296,24
4	0,15	1,46	2,48	332,00	603,16	1,32	754,76
5	0,15	1,00	1,87	181,67	320,20	3,95	707,04
6	0,16	1,04	1,67	152,26	386,27	4,44	813,68
7	0,14	2,32	4,68	689,52	840,47	7,30	335,10
8	0,10	1,56	5,81	199,13	454,92	9,28	589,83
9	0,10	1,27	1,47	56,25	163,00	4,71	864,23
10	0,25	1,04	1,27	121,63	266,16	3,37	1.723,22
11	0,24	0,91	2,95	150,44	333,50	-	160,29
12	0,15	0,88	1,70	78,28	135,91	7,77	433,85

Fuente: Elaboración propia

Aplicabilidad de los resultados obtenidos

El género *Capsicum*, con su amplia variedad de especies, ofrece múltiples oportunidades de transformación agroindustrial que tienen un impacto significativo en la economía. Como se ha descrito, los frutos de este género contienen una diversidad de metabolitos valiosos en la industria alimentaria y que pueden incursionar en los mercados cosmético, farmacéutico y químico. En Colombia se dispone de aproximadamente 1.000 genotipos del género *Capsicum*. Esta amplia diversidad constituye una oportunidad estratégica para el fortalecimiento de la producción comercial y la exportación de productos derivados.

Además, los productos derivados del *Capsicum*, como el ají fermentado y la paprika, ofrecen beneficios económicos significativos. El ají fermentado, rico en antioxidantes, como los flavonoides, ácidos fenólicos, estilbenos y lignanos, tiene aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en la farmacéutica (Liu et al.,2023), lo que amplía su potencial comercial. Por otro lado, la paprika, obtenida de los ajís dulce y maduro, se utiliza en varios productos, desde encurtidos hasta salsas, lo que contribuye a diversificar la oferta agroindustrial y genera más ingresos para los productores (Rugeles et al., 2010).

Además de su impacto en la industria alimentaria, los frutos de *Capsicum* también tienen aplicaciones comerciales en otros sectores económicos. La capsaicina, uno de los ingredientes activos del *Capsicum*, se utiliza en la industria farmacéutica para el trata-

miento de diversas afecciones, desde artritis hasta dolores musculares; sirve además como protección cardiovascular, y llega incluso a ser un suplemento dietario para disminuir la incidencia del cáncer (Hernández—Pérez et al., 2020; Rugeles et al., 2010). En el sector agrícola, el *Capsicum* se emplea como insecticida y controlador de plagas, lo que proporciona una alternativa sostenible para el manejo de cultivos, y contribuye a la seguridad alimentaria y la productividad agrícola. Los frutos del género también podrían ser empleados en la producción de cosméticos para labios y mejillas, pues por su contenido de antioxidantes darían beneficios a la apariencia cutánea,

mientras que por su moderada o baja pungencia podrían fungir como voluminizadores.

En el marco de este estudio, se pueden explorar posibles aplicaciones para cada grupo de ají identificado en función de sus características físico-químicas. A continuación, se desglosa al menos una aplicación para cada grupo:

» **Grupo 1:** por su moderada pungencia, contenido medio de carotenoides y color naranja intenso, podría emplearse para la producción de salsas picantes con una tonalidad diferencial (figura 7.15).



Figura 7.15. Aspecto promedio de la pasta del grupo 1.

Foto: Esteban Castaño Llanos

» **Grupo 2:** por su casi nula pungencia, alta consistencia y contenido de carotenoides, es ideal para extraer pigmentos con tonos rojos profundos o como aditivo capaz de pigmentar y espesar diferentes salsas y aderezos.

» **Grupo 3:** por su moderada pungencia, apreciable firmeza y consistencia, así como por su alto contenido de sólidos y su tono rojo quemado, podría emplearse como aderezo líquido —gracias a sus grados Brix—, aprovechando el equilibrio de sus propiedades.

» **Grupo 4:** dada su moderada pungencia, pero baja firmeza y alta consistencia, resulta perfecto para salsas con un tono amarillo dorado (figura 7.16).



Figura 7.16. Aspecto promedio de la pasta del grupo 4.

Foto: Esteban Castaño Llanos

podría ser empleado en la fabricación de adobos que resalten tanto el sabor como el color de las carnes. También podría ser un aditivo fitogénico, por su alto contenido de carotenoides, como suplemento alimenticio para humanos y animales.

» **Grupo 9:** con propiedades medias, una pungencia moderada y color rojo quemado, podría emplearse como acompañamiento en múltiples platos, así como en salsas que aporten tanto color como picor.

» **Grupo 10:** por sus propiedades medias, una pungencia entre moderada y alta, y su amarillo quemado, podría emplearse como acompañamiento de variadas preparaciones, así como en salsas que aporten picor y un color distintivo (figura 7.17).

» **Grupo 5:** pese a que tiene bajo contenido de sólidos y pocos grados Brix, su firmeza y tonalidad rojo sangre lo convierten en un buen suplemento nutricional, como fruto fresco, gracias a su contenido medio de carotenoides.

» **Grupo 6:** con moderada pungencia, apreciable consistencia y alto contenido de sólidos, además de su tono rojo terracota, resulta ideal como condimento líquido.

» **Grupo 7:** por su moderada pungencia, notoria firmeza, alto contenido de sólidos y color rojo ladrillo, destaca como posible condimento en presentación en polvo.

» **Grupo 8:** por su tono rojo fuego, junto con sus altos valores en consistencia, sólidos y grados Brix,



Figura 7.17. Aspecto promedio de la pasta del grupo 10.

Foto: Esteban Castaño Llanos



» **Grupo 11:** por su color café intenso y llamativo, junto con sus propiedades medias en consistencia y grados Brix, podría emplearse en la producción de salsas picantes de nivel medio (figura 7.18).

Figura 7.18. Aspecto promedio de la pasta del grupo 11.

Foto: Esteban Castaño Llanos

» **Grupo 12:** de color marrón rojizo quemado, bajo en firmeza y consistencia, pero con un contenido alto de carotenoides, podría servir como acompañamiento de comidas y como suplemento alimenticio (figura 7.19).

Figura 7.19. Aspecto promedio de la pasta del grupo 12.

Foto: Esteban Castaño Llanos



Las propiedades agroindustriales de estos frutos ofrecen una amplia gama de aplicaciones comerciales y beneficios económicos en diferentes sectores. En el capítulo 8 se explorarán con mayor detalle las posibles transformaciones del *Capsicum* y los sectores de interés relacionados con él. Allí podrá descubrirse cómo estos frutos versátiles pueden ser aprovechados para impulsar el desarrollo económico, la innovación y la sostenibilidad en múltiples industrias.

Reflexión

En este capítulo se analizaron de manera integral las características fisicoquímicas que determinan la calidad del fruto de *Capsicum* spp., así como su potencial de aprovechamiento agroindustrial en el contexto colombiano. Los resultados obtenidos evidencian que variables como el pH, los sólidos solubles, la firmeza y la consistencia desempeñan un papel determinante en la definición de atributos sensoriales y tecnológicos. En particular, se observó que los materiales con mayor contenido de sólidos solubles y menor pH presentan un perfil idóneo para la elaboración de productos procesados, como salsas y encurtidos, mientras que los frutos con mayor firmeza y contenido de agua se proyectan como materias primas adecuadas para consumo fresco o deshidratado.

Estos hallazgos reafirman el valor de la diversidad genética del género *Capsicum* en Colombia como fuente de innovación para las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola. Las variaciones observadas en los perfiles fisicoquímicos entre especies y variedades sugieren un potencial diferencial para la extracción de compuestos bioactivos, pigmentos naturales y metabolitos secundarios, con aplicaciones en el desarrollo de bioingredientes funcionales, productos nutraceuticos y biopesticidas de origen vegetal.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el aprovechamiento de esta biodiversidad debe enmarcarse en estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*, acompañadas del fortalecimiento de cadenas de valor que promuevan la participación de productores locales. La integración de prácticas agrícolas sostenibles y la gestión responsable de los recursos genéticos no solo aseguran la continuidad de este patrimonio biológico, sino que consolidan una base científica para impulsar modelos bioeconómicos regionales. De este modo, la biodiversidad del *Capsicum* se posiciona como un eje estratégico para la competitividad agroindustrial y la construcción de un futuro sostenible basado en la riqueza natural de Colombia.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Referencias

- Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Elbestawy, A. R., Gado, A. R., Nader, M. M., Saad, A. M., El-Tahan, A. M., Taha, A. E., Salem, H. M., & El-Tarabily, K. A. (2022). Hot red pepper powder as a safe alternative to antibiotics in organic poultry feed: an updated review. *Poultry Science*, 101(4), 101684. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2021.101684>
- Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Sabir Tariq, R. M., Azam, M., & Akhtar, S. (2019). Phytochemicals in daucus carota and their health benefits—review article. *Foods*, 8(9), 424. <https://doi.org/10.3390/FOODS8090424>
- Alamu, A. E., Ade-Omowaye, B. I. O., Akinwande, B. A., Dudu, O. E., & Obori, F. O. (2023). Pigments and colour characteristics: influence of drying methods on Nigerian pepper (*Capsicum frutescence*). *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100760. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100760>
- Ali, S., Rezende, V. T., Ullah, S., De Paiva, E. L., Tonin, F. G., Abdullah, Corassin, C. H., & De Oliveira, C. A. F. (2023). Food processing and challenges in the food production and quality: the foodomics approach. *Food Bioscience*, 56, 103217. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2023.103217>
- Alimentarius, C. (2011). *Codex standard*. FAO.
- Andrés-Bello, A., Barreto-Palacios, V., García-Segovia, P., Mir-Bel, J., & Martínez-Monzó, J. (2013). Effect of pH on color and texture of food products. *Food Engineering Reviews*, 5(3), 158-170. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-013-9067-2>
- Aşkin Uzel, R. (2017). Alternative methods to preserve sweet red pepper paste quality: effect of temperature and protective agents. *Anadolu University Journal of Science and Technology*, 18(3), 695-704. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/332459>
- Balahbib, A., Omari, N., El Hachlafi, N., El Lakhdar, F., Menyiy, N., El Salhi, N., Mrabti, H. N., Bakrim, S., Zengin, G., & Bouyahya, A. (2021). Health beneficial and pharmacological properties of p-cymene. *Food and Chemical Toxicology*, 153, 112259. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112259>
- Cervantes-Hernández, F., Alcalá-González, P., Martínez, O., & Ordaz-Ortiz, J. J. (2019). Placenta, pericarp, and seeds of tabasco chili pepper fruits show a contrasting diversity of bioactive metabolites. *Metabolites*, 9(10), 206. <https://doi.org/10.3390/metabo9100206>
- DeMan, J. M., Finley, J. W., Hurst, W. J., & Lee, C. Y. (2018). *Principles of food chemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63607-8>
- Derry, S., Sven-Rice, A., Cole, P., Tan, T., & Moore, R. A. (2013). Topical capsaicin (high concentration) for chronic neuropathic pain in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 28(2), CD007393. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23450576/>
- García Fernández, N. (2018). *Actividad biológica de los principales compuestos bioactivos presentes en Capsicum sp.* [Tesis de pregrado, Universitat de les Illes Balears] <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/147267>



- Gordillo, G., & Méndez Jerónimo, O. (2013). *Seguridad y soberanía alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/3/ax736s/ax736s.pdf>
- Granato, D., Katayama, F. C. U., & De Castro, I. A. (2011). Phenolic composition of South American red wines classified according to their antioxidant activity, retail price and sensory quality. *Food Chemistry*, 129(2), 366-373. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.04.085>
- Hassan, N. M., Yusof, N. A., Yahaya, A. F., Rozali, N. N. M., & Othman, R. (2019). Carotenoids of *Capsicum* fruits: pigment profile and health-promoting functional attributes. *Antioxidants*, 8(10), 469. <https://doi.org/10.3390/antiox8100469>
- Hernández—Pérez, T., Gómez—García, M. del R., Valverde, M. E., & Paredes—López, O. (2020). *Capsicum annuum* (hot pepper): an ancient Latin—American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972-2993. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33337034/>
- Hernández-Salinas, G., Arenas-Lozano, A. E., Luna-Cavazos, M., Ramírez-Rivera, E. de J., Purroy-Vásquez, R., Sotelo-Leyva, C., & Castillo-Zamudio, R. I. (2021). Composición proximal en morfotipos de chile Comapeño (*Capsicum annuum* L.) de Oaxaca y Veracruz, México, y su relación con factores climáticos. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 7. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071018>
- Hew, P. S., Jinap, S., Jambari, N. N., Murugesu, S., Sanny, M., Khatib, A., & Sukor, R. (2024). Quality and safety of food product - current assessment, issues, and metabolomics as a way forward. *Food Chemistry Advances*, 4, 100632. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2024.100632>
- Joshi, D. D., Changkija, S., Sujata, W., Somkuwar, B. G., Rana, V. S., & Talukdar, N. C. (2017). Nutraceutical from *Capsicum chinense* fruits in shelf-stable herbal matrix. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 42, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.006>
- Karaman, K., Pinar, H., Ciftci, B., & Kaplan, M. (2023). Characterization of phenolics and tocopherol profile, capsaicinoid composition and bioactive properties of fruits in interspecies (*Capsicum annuum* x *Capsicum frutescens*) recombinant inbred pepper lines (RIL). *Food Chemistry*, 423, 136173. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136173>
- Kim, E.-H., Lee, S.-Y., Baek, D.-Y., Park, S.-Y., Lee, S.-G., Ryu, T.-H., Lee, S.-K., Kang, H. J., Kwon, O.-H., Kil, M., & Oh, S.-W. (2019). A comparison of the nutrient composition and statistical profile in red pepper fruits (*Capsicum annuum* L.) based on genetic and environmental factors. *Applied Biological Chemistry*, 62, 48. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0456-y>
- Konishi, A., Terabayashi, S., & Itai, A. (2022). Relationship of cuticle development with water loss and texture of pepper fruit. *Canadian Journal of Plant Science*, 102(1), 103-111. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjps-2021-0031>
- Li, Y., Li, T., Yan, Z., Bariami, W., Wu, C., Yan, S., Fan, G., Li, X., Zhou, D., Cong, K., & Cheng, J. (2024). Carotenoids in berries: composition, benefits, metabolic processes and influencing factors - A review. *Scientia Horticulturae*, 329, 112956. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2024.112956>

- Liu, Z., Cai, S., Zhang, S., Xiao, Y., Devahastin, S., Guo, C., Wang, Y., Wang, T., & Yi, J. (2023). A systematic review on fermented chili pepper products: sensorial quality, health benefits, fermentation microbiomes, and metabolic pathways. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104189. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104189>
- Menzies, D. (2021). *Chest pain perception and capsaicin sensitivity*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT02346916>
- Mi, S., Li, T., Sang, Y., Wang, X., & Duan, Y. (2023). Effect of cold shock precooling on the physicochemical, physiological properties and volatile profiles of chili peppers during postharvest storage. *LWT*, 187, 115300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115300>
- Moran, N. E. (2024). *Maternal Carotenoids Across Pregnancy Study (MCAPS)*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06004479?intr=Carotenoid%20%20Intake&rank=2&tab=table>
- Morisson, S. (2022). *Clinical Trial Assessing the Efficacy of Capsaicin Patch (Qutenza®) in Cancer Patients With Neuropathic Pain*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03317613?intr=-Capsaicin&rank=2#publications>
- Neis, E. R., Covinich, M. M., & Scipioni, G. P. (2022). Polyphenol content, color and acceptability of carrot pickles added with yerba mate powder extract. *Brazilian Journal of Food Technology*, 25, e2021013. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.01321>
- Pace, B., Capotorto, I., Cefola, M., Minasi, P., Montemurro, N., & Carbone, V. (2020). Evaluation of quality, phenolic and carotenoid composition of fresh-cut purple Polignano carrots stored in modified atmosphere. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, 103363. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103363>
- Pasierski, M., & Szulczyk, B. (2022). Beneficial effects of capsaicin in disorders of the central nervous system. *Molecules*, 27(8), 2484. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35458680/>
- Penagos-Calvete, D., Guauque-Medina, J., Villegas-Torres, M. F., & Montoya, G. (2019). Analysis of triacylglycerides, carotenoids and capsaicinoids as disposable molecules from *Capsicum* agroindustry. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0111-2>
- Pino, J., González, M., Ceballos, L., Centurion-Yah, A., Trujillo-Aguirre, J., Latournerie-Moreno, L., & Sauri-Duch, E. (2007). Characterization of total capsaicinoids, colour and volatile compounds of Habanero chilli pepper (*Capsicum chinense* Jack.) cultivars grown in Yucatan. *Food Chemistry*, 104(4), 1682-1686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.12.067>
- Prieto, M., Mouwen, J. M., López Puente, S., & Cerdeño Sánchez, A. (2008). Concepto de calidad en la industria agroalimentaria. *Interciencia*, 33(4), 258-264. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33933405.pdf>
- Rugeles, L., Ávila, J., Morales, A., Huertas, A., Guaitero, B., & Bonilla, C. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena de hortalizas en Colombia: salsa de ají*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/fa209c8e-7077-4ddb-ad85-25384fa97473/content>
- Scoville, W. L. (1912). Note on *Capsicum*. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 1, 453-454. <https://www.sizes.com/library/metrhist/scoville.pdf>



- Shechter, M., Xing, B., & Chefetz, B. (2010). Cutin and cutan biopolymers: their role as natural sorbents. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1139-1146. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0313>
- Solís-Marroquín, D., Lecona-Guzmán, C. A., Ruiz-Lau, N., Ocampo, P., Rodas-Trejo, J., Gonzáles-Santiago, C., González-Mejía, O., & Gordillo-Páez, L. (2017). Análisis bromatológico de frutos de chile “siete caldos” (*Capsicum annuum*) cultivados en condiciones de cielo abierto y casa sombra. *Agroproductividad*, 10(9), 34-40. <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/249320055.pdf>
- Średnicka-Tober, D., Kopczyńska, K., Góralska-Walczak, R., Hallmann, E., Barański, M., Marszałek, K., & Kazmierczak, R. (2022). Are organic certified carrots richer in health-promoting phenolics and carotenoids than the conventionally grown ones? *Molecules*, 27(13), 4184. <https://doi.org/10.3390/molecules27134184>
- Sutliff, A. K., Saint-Cyr, M., Hendricks, A. E., Chen, S. S., Doenges, K. A., Quinn, K., Westcott, J., Tang, M., Borengasser, S. J., Reisdorph, R. M., Campbell, W. W., Krebs, N. F., & Reisdorph, N. A. (2021). Lipidomics-based comparison of molecular compositions of green, yellow, and red bell peppers. *Metabolites*, 11(4), 241. <https://doi.org/10.3390/metabo11040241>
- Tafolla-Arellano, J. C., González-León, A., Tiznado-Hernández, M. E., Zacarías García, L., & Báez-Sañudo, R. (2013). Composición, fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 3-12. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/249>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Gupta, A. K., Srivastav, P. P., Patel, A. R., Chávez González, M. L., Utama, G. L., & Aguilár, C. N. (2023). Nanoencapsulation of biofunctional components as a burgeoning nanotechnology-based approach for functional food development: a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102890. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102890>
- Vaz, A. A., Odriozola-Serrano, I., Oms-Oliu, G., & Martín-Belloso, O. (2022). Physicochemical properties and bioaccessibility of phenolic compounds of dietary fibre concentrates from vegetable by-products. *Foods*, 11(17), 2578. <https://doi.org/10.3390/foods11172578>
- Villaseñor-Aguilar, M.-J., Bravo-Sánchez, M.-G., Padilla-Medina, J.-A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R.-G., García-Rodríguez, F.-J., & Barranco-Gutiérrez, A.-I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) by artificial vision system for quality control. *Applied Sciences*, 10(15), 5097. <https://doi.org/10.3390/app10155097>
- Woldemariam, H. W., Admassu Emire, S., Getachew Teshome, P., Toepfl, S., & Aganovic, K. (2021). Physicochemical, functional, oxidative stability and rheological properties of red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder and paste. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1416-1437. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1969945>

